

# RECICLAJE Y EFICIENCIA EN EL USO DE NUTRIENTES EN SISTEMAS AGROFORESTALES NUTRIENTS USE IN AGROFORESTRY SYSTEMS: RECYCLE AND EFFICIENCY

Florencia Montagnini <sup>1</sup>

Carl F. Jordan <sup>2</sup>

Rodrigo Matta Machado <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)  
(7170) Turrialba, COSTA RICA

<sup>2</sup> University of Georgia, Department of Ecology  
Athens, Georgia 30602, USA

<sup>3</sup> Univ. Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas  
Belo Horizonte, M.G. 31270.010, BRAZIL

## SUMMARY

In tropical humid regions, soil nutrients are key factors affecting plant productivity and the sustainability of production systems. A key element in promoting the sustainability of agricultural systems is the use of species that have good nutrient conserving mechanisms, and that at the same time yield economic or subsistence products. Examples of such systems are presented, and agroforestry systems are suggested where species selection and system design promote nutrient conservation. The nutrient use efficiency of species is advanced as an integrative concept that can be useful in species choice and design of agroforestry systems. Additional considerations are presented on the socioeconomic factors that must be taken into account in the promotion of sustainable agroforestry systems, especially for small farmers.

**Key words:** Nutrient conservation, feasibility, productivity, traditional systems, sustainability

## RESUMEN

En regiones tropicales húmedas, los nutrientes del suelo son factores claves que influyen sobre la productividad de las plantas y la sustentabilidad a largo plazo de un sistema de producción. Un aspecto clave en el incremento de la sustentabilidad de sistemas agrícolas es la incorporación de especies que poseen adaptaciones dirigidas a una mejor captura y conservación de nutrientes, mientras que al mismo tiempo producen una cosecha de valor económico o de subsistencia. Se presentan ejemplos de sistemas tradicionales con estas características, y se sugieren sistemas agroforestales con selección de especies y diseños que promuevan la conservación de nutrientes. Se presenta la eficiencia en el uso de nutrientes como un concepto integrador que puede contribuir a la elección de especies y su diseño espacial o temporal en sistemas agroforestales. Se agregan consideraciones de tipo socioeconómico que deben tomarse en cuenta al promover sistemas agroforestales sostenibles, especialmente para pequeños agricultores.

**Palabras clave:** conservación de nutrientes, factibilidad, productividad, sistemas tradicionales, sostenibilidad

## INTRODUCCION

En regiones tropicales húmedas, los nutrientes del suelo son factores claves que influyen sobre la productividad de las plantas y la sustentabilidad a largo plazo de un sistema de producción. Por mucho tiempo se ha afirmado que las pérdidas de nutrientes y el incremento en la invasión de malezas son los principales factores que contribuyen al abandono de campos de cultivos anuales después de 2-4 años de uso (Watters 1971, Van Wambeke 1992, Bandy et al. 1993). El incremento en la invasión de malezas en terrenos de agricultura luego de la pérdida de nutrientes, resulta de una mayor habilidad de las mismas para absorber escasos nutrientes en comparación con la mayoría de los cultivos anuales, eliminando a éstos en la competencia por el uso de nutrientes y otros recursos. Muchas especies de malezas son leñosas perennes cuya habilidad para competir depende de una variedad de mecanismos de absorción y conservación de nutrientes, a su vez dependientes de la estructura y adaptaciones de su aparato radicular, la presencia de tallos leñosos, y la producción de hojarasca. Un aspecto clave en el incremento de la sustentabilidad de sistemas agrícolas es la incorporación de especies que poseen este tipo de adaptaciones dirigidas a una

mejor captura y conservación de nutrientes, mientras que al mismo tiempo producen una cosecha de valor económico o de subsistencia. Muchas poblaciones indígenas han desarrollado estos sistemas a través del proceso de prueba y error, y este artículo presenta un ejemplo de los Kayapó, en el Amazonas de Brasil. La importancia de la fijación de nitrógeno en especies de sistemas agroforestales está ampliamente reconocida. En este artículo, discutimos éste y otros efectos de las especies leñosas sobre la fertilidad del suelo, las interacciones entre especies de plantas leñosas, y la importancia del diseño adecuado de sistemas agroforestales. Finalmente, el concepto de la eficiencia en el uso de nutrientes en las plantas es presentado como una herramienta potencial útil para el diseño y manejo de los sistemas agroforestales.

## **DINAMICA DE NUTRIENTES EN SISTEMAS AGROFORESTALES**

### **Características Generales del Ciclaje de Nutrientes en Sistemas Agroforestales**

La Fig. 1 muestra un diagrama del ciclaje de nutrientes en la situación básica de los sistemas agroforestales, con los componentes árboles y cultivos, adaptado de Young (1989). El ciclo contiene cajas que representan almacenajes o reservorios de nutrientes, flujos dentro del sistema, y ganancias y pérdidas. Los reservorios son los tallos y raíces de árboles y cultivos, residuos vegetales, fauna del suelo, materia orgánica del suelo, minerales de arcilla, y el almacenaje de nutrientes disponibles en forma mineral en la solución del suelo. Los principales flujos internos se dirigen desde el componente plantas al componente de residuos vegetales, y por medio de la fauna del suelo al humus. A través del proceso de mineralización, los nutrientes llegan a la solución del suelo en forma mineral, y retornan a las plantas por la absorción de las raíces. Las entradas o ganancias del sistema son los nutrientes contenidos en la lluvia y polvo atmosférico, residuos orgánicos traídos de fuera del sistema, fertilizantes, meteorización de las rocas, y, para el nitrógeno, la fijación simbiótica y asimbiótica. Las pérdidas incluyen lixiviación, erosión, cosecha (incluido el pastoreo de animales), más las pérdidas gaseosas en las quemaduras, la volatilización y la desnitrificación.

Las principales pérdidas ocasionadas por las quemaduras se limitan al nitrógeno y el azufre, mientras que la mayoría de los otros nutrientes son retenidos en las cenizas y otros restos de la quema. Por otro lado, la lixiviación y la erosión pueden ocasionar pérdidas de cualquier nutriente. La inmovilización

por fijación en minerales secundarios de arcillas puede ser importante para el fósforo y algunos microelementos. Un aspecto importante es la gran proporción de nutrientes que se encuentra retenido en forma orgánica en un momento dado. Por ejemplo, para el nitrógeno, solamente un 1% se encuentra disponible en forma mineral en la solución del suelo. Una vez mineralizados los nutrientes son disponibles para la absorción por parte de las raíces, pero al mismo tiempo pueden perderse por lixiviación.

El objetivo del diseño y manejo de los sistemas agroforestales es modificar el ciclaje de nutrientes de manera de hacer un uso más eficiente de los mismos, sea que éstos provengan de fuentes naturales o fertilizantes. Específicamente, es deseable reducir la relación entre entradas-salidas y el reciclaje interno. Los sistemas agrícolas son ampliamente abiertos, con entradas y salidas de hasta un 40% del reciclaje, mientras que los ecosistemas de bosques son más cerrados, con entradas y salidas a veces llegando a no más del 10% del reciclaje interno (Young 1989). Si se puede reducir esta relación, los nutrientes son re-utilizados más frecuentemente por las plantas antes de perderse del sistema. En general, los sistemas agroforestales pueden promover ciclajes de nutrientes más cerrados que los sistemas agrícolas, por medio del reciclaje en los residuos de hojas y raíces. Además, es posible sincronizar la liberación de nutrientes con los requerimientos de los cultivos, controlando la calidad, tiempo y forma de adición de los residuos vegetales. En las siguientes secciones se presentan ejemplos en los cuales se mejora el reciclaje de nutrientes por medio de prácticas tendientes a aumentar o mejorar la liberación de nutrientes y su sincronización con los requerimientos de los cultivos, a la vez que se minimizan las pérdidas del ecosistema.

### **Ejemplos de Sistemas Agroforestales Tradicionales**

La agricultura migratoria ha sido practicada en los trópicos por muchos siglos. Actualmente, la agricultura migratoria (también llamada "de corta y quema") es la práctica de uso de la tierra predominante en aproximadamente un 30% de los suelos arables del mundo y provee alimentos para un estimado de 300 millones de la población más pobre del mundo (Andriessse y Schelhaas 1987). La agricultura migratoria tradicional utiliza largos períodos de recuperación de los terrenos abandonados (barbechos) entre períodos cortos de cultivo. Estos largos períodos de abandono, hacen que la técnica tradicional sea sostenible pero también requiere de mayores extensiones de tierra. Cuando la tierra es escasa, los

agricultores disminuyen el período de recuperación de los terrenos y aumentan la duración de los períodos de cultivo, resultando en una disminución de los nutrientes del suelo, caída de la productividad y aumento de la invasión de malezas.

Una alternativa que ha sido adoptada con cierto éxito es el uso de "barbechos mejorados" (Nair 1990, Kass et al. 1993). Por ejemplo, en sistemas experimentales de barbechos en el Amazonas peruano, especies arbóreas mejoradoras del suelo fueron plantadas en terrenos abandonados de agricultura migratoria (Szott et al. 1991). Se plantaron dos leguminosas leñosas tolerantes a la acidez del suelo, *Cajanus cajan* e *Inga edulis*. Dos años después de plantadas, los niveles totales de Ca y Mg del ecosistema habían declinado, sin embargo el N y K total habían aumentado. Los niveles de P también aumentaron aunque sólo luego de 4.5 años. En general, el sistema de "barbecho mejorado" resultó en aumentos netos de varios nutrientes importantes en la nutrición de las plantas del ecosistema. De manera adicional, aunque el uso de especies herbáceas inicialmente resultó en un rápido control de las malezas, sólo se obtuvo una supresión efectiva de las malezas a través de la implantación de leguminosas leñosas. Experiencias tales como las descritas por Szott et al. (1991) son de relevancia especial en Centro América y otras regiones donde la tierra es escasa y los períodos de barbecho no son lo suficientemente prolongados como para restaurar la capacidad productiva de los suelos (Watters 1971, Sips 1993, Montagnini and Mendelsohn 1996).

### **El ejemplo de los Kayapó en Brasil**

Existen numerosos ejemplos de prácticas agrícolas llevadas a cabo por pueblos indígenas, o por pioneros tales como los caboclos del Amazonas, que utilizan árboles para mantener o restaurar la fertilidad del suelo sin utilizar ningún fertilizante químico (Anderson 1990, Gómez-Pompa y Kaus 1990, Subler y Uhl 1990, Balée 1992, Lescure et al. 1992, Nations 1992, Jordan 1995). Un ejemplo bien documentado es el de los Kayapó en Brasil (Posey 1982). Los Kayapó viven hoy en una reserva de 2.5 millones de hectáreas en la cuenca del Rio Xingú en la región del Amazonas. Aunque los Kayapó son nómadas por la mayor parte del año, el cultivo de plantas para alimentos y medicinas es una parte importante de su cultura. El proceso de cultivo comienza con el aclareo de un área de terreno de forma circular. Los árboles son cortados de tal manera que los troncos apuntan hacia la periferia, y la mayor parte de la biomasa de la

copa termina cerca del perímetro del círculo. Cultivos de raíces tales como la batata o ñame (*Dioscorea* spp.), el taro (*Colocasia esculenta*) y la mandioca (*Manihot esculenta*) son plantados en corredores abiertos que quedan entre los árboles caídos. Los cultivos ya se encuentran enraizados y creciendo antes de que se lleve a cabo la quema de los residuos.

La quema es manejada cuidadosamente. Los ancianos de la tribu coinciden en el día apropiado cuando los vientos son mínimos y los campos van a quemar por completo pero no demasiado rápido. Los campesinos comienzan quemando las pilas de hojarasca seca una a la vez. Una quema lenta minimiza el calor, de tal manera que los cultivos de raíces pierden la parte aérea pero no la viabilidad. Estos cultivos, luego de la quema tienen ventaja inicial sobre las malezas que se establecerán sobre la ceniza.

La papaya, las bananas, el algodón, el urucú (*Bixa orellana*), y el tabaco, los cuales requieren una alta cantidad de nutrientes, son plantados en las márgenes externas del terreno, donde las cantidades de cenizas son mayores. Unas pocas semanas después de la quema, los campesinos recogen los palos y ramas sin quemar para realizar una segunda quema. Otros cultivos de alto requerimiento de nutrientes son plantados sobre la pila resultante de cenizas.

Los cultivos de los Kayapó perduran por varios años. La batata y el ñame crecen en campos de cuatro o cinco años. Las bananas y el urucú, y variedades domésticas de una planta leguminosa llamada "kupa" comúnmente continúan produciendo hojas y tallos comestibles por 8 a 12 años, y algunos campos de 40 años aun rinden "kupa" comestible.

Muchas plantas útiles para los Kayapó se establecen naturalmente en los campos abandonados. Algunas de estas plantas de colonización espontánea poseen importantes valores medicinales, otras proveen semillas, frutos, y raíces comestibles. Algunas de estas especies de plantas pioneras producen frutas que son excelentes como carnada para peces. Otras atraen animales o pájaros. Los animales atraídos por las plantas de mucho follaje en estos sitios son más fáciles de cazar que aquéllos que habitan el dosel superior del bosque.

Puesto que los Kayapó comprenden este proceso y toman ventaja de las especies que secuencialmente ocupan estos sitios, no necesitan buscar continuamente nuevos rodales para cortar y quemar. Después de muchos años, cuando un sitio abandonado se convierte nuevamente en bosque cerrado, éste puede ser cortado y usado nuevamente, sin seguir el proceso de degradación de largo plazo

del sitio.

Las prácticas de los Kayapó contrastan con las prácticas de cultivos migratorios llevadas a cabo en el Amazonas por colonizadores del sur y el noreste de Brasil. Estos últimos dependen principalmente de cultivos tales como maíz, arroz, y mandioca, los cuales crecen satisfactoriamente sólo por dos a tres años. Cuando los rindes decrecen, los colonizadores abandonan el sitio y aclaran una nueva porción de bosque.

### **Movilización y Pérdidas de Nutrientes en la Agricultura Migratoria**

Los científicos han pensado por mucho tiempo que las disminuciones bruscas de la productividad de cultivos anuales tales como maíz y arroz, luego de dos o tres años de cultivos en parcelas de agricultura migratoria, son debidos a la pérdida de nutrientes del suelo, tales como la percolación de calcio y potasio y la volatilización de N. Sin embargo, los resultados del proyecto de "El Hombre y la Biosfera" en la región amazónica, cerca de San Carlos de Río Negro en Venezuela (Jordan 1989) sugieren que durante los 2-3 primeros años de cultivo luego del aclareo del bosque, sólo una pequeña parte de los nutrientes almacenados es perdida debido a la lixiviación (Figs. 2-5). La disminución de la producción fue debida en cambio a la fijación del fósforo previamente disponible, por el hierro y el aluminio del suelo mineral, inmovilizando el fósforo y haciéndolo inutilizable por las plantas.

En los bosques intactos de la región, aparentemente el P se encuentra en formas disponibles para los árboles (Jordan 1989). Inclusive luego de cortar y quemar el bosque, y durante los primeros 1-2 años de cultivo, la mayor parte del fósforo del suelo fue mantenido en formas móviles, debido a que se encontraba quelado al Fe y el Al por ácidos orgánicos percolados de la materia orgánica en descomposición del mantillo del suelo. Luego de que el sitio fue cortado y quemado, y el humus y la hojarasca gradualmente desaparecieron durante los tres primeros años de cultivo, la liberación de ácidos orgánicos disminuyó, y una mayor proporción de P fue inmovilizado en el suelo. Al final del tercer año, todo el humus y la mayor parte de los troncos de los árboles había desaparecido. El estudio concluye en que la falta de P disponible causó la disminución de la productividad del cultivo, y que la conversión del P de estado disponible a inmóvil fue debido a la desaparición del humus y la materia orgánica de la superficie del suelo.

A pesar de la inmovilización del P en el suelo, la vegetación sucesional secundaria invadió el sitio, y para el quinto año, los niveles de Ca, K, Mg, y N comenzaron a declinar (Figs. 2-5). No hubieron cambios detectables en los niveles totales de nutrientes del ecosistema durante el experimento. Sin embargo, hubo un incremento de P en la biomasa a medida que el bosque sucesional se establecía. Aparentemente, las especies sucesionales fueron capaces de tomar el P inmóvil del suelo. Este P probablemente se encontraba en fracciones de enlaces de Fe y Al no disponibles para los cultivos.

¿Cuál es el mecanismo a través del cual la vegetación leñosa es capaz de absorber el P no disponible para los cultivos? Una posibilidad es la excreción de ácido psídico<sup>1</sup> de las raíces (Ae et al. 1990), o el lavado de ácidos cítricos y málicos de la hojarasca en descomposición de los árboles (Han 1989). Estos ácidos orgánicos pueden reemplazar al P ligado al Fe y al Al de la arcilla, liberando al P y haciéndolo soluble y disponible para su absorción. Es posible que las plantas anuales no posean este mecanismo de reciclaje de P, o puede que las mismas hayan perdido esa capacidad en el proceso de selección genética para favorecer la productividad (Chapin 1980, 1983).

La movilización del P ligado por las plantas leñosas podría explicar, al menos en parte, la sustentabilidad de los sistemas agroforestales tales como los de los Kayapó. Los árboles de cultivo son establecidos inmediatamente después del aclareo y quema, antes de que la materia orgánica de los horizontes de suelo superiores se descomponga completamente. Puesto que los árboles implantados se encuentran produciendo hojarasca antes de que los residuos anteriores desaparezcan completamente, la producción de ácidos orgánicos no es interrumpida, y el P es mantenido en un estado disponible para las plantas. Sin embargo, la mayor disponibilidad del P es sólo un factor que contribuye a la sostenibilidad de estos sistemas. Otros factores tales como relaciones alelopáticas, índices de actividad fotosintética, tasas de reciclaje de otros nutrientes, control de patógenos, en conjunto, influyen sobre la sostenibilidad a largo plazo.

Esto sugiere que sería deseable comenzar con un sistema agroforestal inmediatamente después del aclareo del bosque, ya sea éste secundario o primario. Por ejemplo, en un sitio localizado en la región central del Amazonas brasileño, se establecieron experimentalmente árboles de caucho (*Hevea brasiliensis*) bajo el dosel parcialmente abierto de un

bosque secundario (Mesquita 1995). Al momento de la plantación, el estrato de hojarasca y humus del suelo forestal mejoró el microclima, disminuyó la erosión, y contribuyó a mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo, favoreciendo el establecimiento de las plántulas del caucho.

Desafortunadamente, muchos sistemas agroforestales son establecidos en sitios que han sido cultivados o mantenidos en pasturas por muchos años. En tales sitios, la situación de los nutrientes del suelo ha sido deteriorada. Las Figuras 2-5 muestran que en las parcelas experimentales de San Carlos de Río Negro, la pérdida de nutrientes continuó inclusive después de tres años de abandono del cultivo, y la recuperación de nutrientes no comenzó sino hasta el quinto año. Aparentemente en este sistema de altas precipitaciones anuales (3.600 mm) y con suelos de baja capacidad de intercambio catiónico, tomó un par de años para que la regeneración de la vegetación cubriera el sitio y reestableciera los mecanismos de reciclaje de nutrientes.

### **Dinámica de Nutrientes en Sistemas Agroforestales Modernos: Cultivos en Callejones**

A mediados de los años 1980, un esfuerzo considerable de investigación se concentró en el desarrollo en tecnologías de bajos insumos dirigidas a la producción sustentable de alimentos para pequeños productores. Los resultados de estas investigaciones sugieren que en situaciones donde los "barbechos mejorados" no son factibles debido a la escasez de tierras, técnicas tales como el cultivo en callejones con la aplicación de "mulch" (mantillo o abono verde) pueden constituir alternativas de agricultura viables (Kang y Wilson 1987, Kang et al. 1990). En los cultivos en callejones, los cultivos anuales son plantados entre hileras de árboles, preferiblemente de especies leguminosas fijadoras de nitrógeno, las cuales son periódicamente podadas para prevenir que produzcan sombra sobre los cultivos anuales. Las podas pueden ser usadas como abono verde para mejorar la fertilidad del suelo y producir alimento de alta calidad para ganado. Los cultivos en callejones son considerados como un sistema de agricultura migratoria mejorado, con las siguientes ventajas potenciales: 1) Las fases de cosecha y recuperación del suelo son combinadas; 2) Los períodos de cosecha son más largos, y la tierra es usada de manera más intensiva; 3) La fertilidad del suelo es mantenida de manera efectiva con el uso de especies seleccionadas para ese propósito; y 4) Se reduce la necesidad de insumos externos (Kang and Wilson 1987).

En áreas de Nigeria y otras regiones de transición de bosque-sabana de Africa, resultados de experimentos de campo y ensayos en tierras de agricultores han mostrado que los cultivos en callejones con maíz, frijoles, arroz y mandioca entre hileras de *Leucaena leucocephala* y *Gliricidia sepium* permitieron un nivel más alto de producción que los monocultivos (Kang and Wilson 1987). El frijol y arroz no siempre mostraron incrementos significativos en la producción en comparación con monocultivos, pero al ser plantados en cultivos de callejones con *Leucaena*, no respondieron a la fertilización con N, indicando que el abastecimiento de N a través del material proveniente de las podas fue adecuado, y la adición de fertilizantes no fue necesaria. En los sistemas de cultivos en callejones la competencia entre árboles y cultivos puede a veces reducir significativamente la producción del cultivo (Haggar 1994). Otras investigaciones en suelos aluviales en Yurimaguas, en el Amazonas peruano, mostraron que las reducciones en la producción del arroz debido a competencia por luz eran evidentes hasta los 1,5 metros de distancia desde las hileras de todas las especies de árboles ensayadas (*Inga* spp., *Leucaena* spp. y *Erythrina* spp.), con la mayor disminución en producción encontrada en las hileras de *Leucaena* (Salazar et al. 1993). El control de malezas tuvo mayor éxito con el "mulch" de descomposición lenta de *Inga*, pero las cosechas de arroz (a una distancia > 1,5 m de las líneas) fueron mayores con *Leucaena* y *Erythrina*.

Las técnicas agroforestales tales como la de cultivos en callejones tienen mayor potencial para incrementar las reservas de nutrientes que los monocultivos. Los siguientes ejemplos ilustran las contribuciones de estos sistemas agroforestales a la dinámica del P y el N. La Fig. 6 muestra el P total disponible en un sistema replicado de cultivo en callejones (*Albizia julibrissin* en las hileras, *Sorghum bicolor* como cultivo) en un Ultisol en el estado de Georgia, U.S.A., en comparación con parcelas de sorgo en monocultivo. Ambos tratamientos, ya sea el cultivo en callejones como el sorgo en monocultivo fueron previamente provistos de abono verde, en el verano con poroto (frijol) (*Mucuna deeringiana*) y en el invierno con trébol (*Trifolium incarnatum*). Hubo un incremento gradual en el fósforo disponible en los dos sistemas, a pesar de que inclusive hasta el tercer año, la producción de sorgo en el sistema agroforestal no fue mayor que en el monocultivo (Matta-Machado and Jordan 1995).

Este estudio se llevó a cabo en un suelo degradado por un siglo de cultivos de algodón y soja.

Mientras que los sistemas agroforestales pueden incrementar las reservas de nutrientes comparados con parcelas de sistemas no agroforestales, este incremento se produce de una manera lenta. Una mejor estrategia, si es económicamente factible, podría ser fertilizar inicialmente el sistema agroforestal para favorecer una producción más rápida. Una estrategia inclusive mejor, si se dispone de un sitio adecuado, sería comenzar el sistema después de un "barbecho", puesto que cuando un sistema agroforestal comienza con niveles altos de nutrientes, el sistema tiene una mayor posibilidad de mantenerse productivo a largo plazo.

Investigaciones llevadas a cabo en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Turrialba, Costa Rica han examinado el rol del N en cultivos anuales en callejones con árboles usados en sistemas agroforestales en zonas tropicales húmedas. Los resultados de experiencias a largo plazo con maíz en cultivos en callejones con *Erythrina poeppigiana* y *Gliricidia sepium* mostraron que después de siete años, la productividad del maíz y la absorción del N fueron más del doble en cultivos en callejones con cualquiera de las dos especies que en monocultivo (Haggar et al. 1993). Mayores porcentajes de mineralización de N del suelo en los sistemas de cultivo en callejones llevaron a un establecimiento más rápido del maíz en comparación con el cultivo sin asociar. Estos mayores porcentajes de mineralización del N del suelo resultaron de la acumulación de compuestos de N orgánico disponibles para mineralización luego de siete años de aplicación de abono verde de los árboles. En el sistema de cultivo en callejones, la acumulación a largo plazo de N mineralizable en el suelo influyó más sobre la producción y absorción de N por el maíz, que la sincronización de la liberación de N del abono verde y la absorción de N por los cultivos. A pesar de la mayor producción, la recuperación total del N del abono verde por el maíz en un año fue sólo de 10 kg/ha, la mayor parte del cual fue absorbido durante los dos primeros meses después de la siembra; sin embargo, este efecto inicial llevó a un establecimiento más rápido del maíz en el cultivo en callejones. Esto de nuevo señala la necesidad de estudios de largo plazo que demuestren los beneficios de cultivos en callejones con el objetivo de una mayor producción. Esto sirve también para recalcar que los resultados tempranos pueden no ser muy evidentes, y que otros insumos externos pueden ser necesarios inicialmente para asegurar el establecimiento exitoso del sistema.

La elección de especies influye de gran manera sobre el éxito y aplicabilidad general de las

técnicas de cultivos en callejones. Por ejemplo, muchas especies contienen sustancias aleloquímicas que suprimen malezas y otras plantas. Las interacciones alelopáticas son útiles cuando las especies suprimidas son consideradas malezas, pero se debe tener cuidado cuando el abono verde es aplicado a los cultivos anuales (Regnier y Janke 1990). Por último, en suelos muy ácidos con alta saturación de aluminio, algunas de las especies arbóreas preferidas para el cultivo en callejones, tales como *Leucaena* spp. y *Gliricidia* spp., no crecen bien, y tienen que ser reemplazadas por otras especies más adaptadas a esas condiciones (e.g., *Calliandra* spp., *Cassia* spp., *Inga* spp., *Flemingea* spp., o *Paraserianthes* spp.).

### **Sistemas Tradicionales Modificados: Árboles para Sombra de Cultivos Perennes**

En CATIE, Costa Rica, numerosas investigaciones han intentado por largo tiempo modificar los sistemas tradicionales de la región—café o cacao con árboles de sombra—para mejorar la productividad y sustentabilidad. Estas investigaciones comenzaron con el examen de las variables del reciclaje de nutrientes en los sistemas existentes en la región y fue continuada con sistemas experimentales donde el reciclaje de nutrientes podía ser examinado en experimentos controlados. Por ejemplo, en una finca cercana al CATIE, Beer (1988) comparó el retorno anual de nutrientes proveniente de la hojarasca y las podas en sistemas de café con *Erythrina poeppigiana* (poró), y café con poró y *Cordia alliodora* (laurel). Ambos árboles son comunes en sistemas agroforestales con cultivos perennes en Latinoamérica. La contribución total anual de la hojarasca más los residuos de las podas fue similar en ambos sistemas. La producción anual de hojarasca del poró fue menos de la mitad cuando éste se encontraba en asociación con laurel, que en el sistema con poró solo, pero la hojarasca del laurel compensó esta reducción. Por otro lado, la inclusión de laurel con el poró y el café, resultó en una distribución más pareja de la contribución anual de nutrientes. Las contribuciones anuales de Ca y Mg en la hojarasca fueron mayores en el sistema que incluía al laurel que en el sistema con poró solamente. No hubieron diferencias en la contribución total de N o de P entre los dos sistemas, y el sistema que incluía laurel tuvo una incorporación anual menor de K. A pesar de estas diferencias entre los dos sistemas, las cantidades de nutrientes reciclados por los árboles en asociación alcanzó los niveles recomendados de fertilización

requerida para la producción de café en ambos casos.

Qué sistema elegir dependerá del nutriente más limitante en cada caso particular. En el ejemplo previo, el sistema con laurel fue preferido por muchos agricultores debido a que, aparte de una incorporación más pareja de nutrientes a lo largo del año, el valor de la madera del laurel agregaba un incentivo económico. Además, como el laurel es una especie de poda natural, mientras que el poró necesita ser podado para incrementar el reciclaje de biomasa, el sistema que incluye laurel es menos costoso que el sistema con poró solo. Los resultados de otros experimentos posteriores en el CATIE confirmaron estos hechos (Fassbender et al. 1991).

Otras investigaciones en sistemas tradicionales similares también demostraron la importancia del reciclaje de nutrientes en sistemas agroforestales con cultivos perennes. En Ocumare de la Costa, Venezuela, Aranguren et al. (1982) concluyeron que los árboles de sombra de las plantaciones de cacao contribuían con aproximadamente la mitad del aporte anual de hojarasca. La cantidad de N transferida al suelo a través de la hojarasca fue de 321 Kg/ha. La salida de N del sistema a través de las cosechas de cacao fue de 45 Kg/ha., con aproximadamente 20 Kg retornados al suelo luego del procesamiento. Los autores concluyeron que la extracción neta de N podía ser compensada por la incorporación de N a través de la hojarasca de árboles de sombra de las especies *Inga* y *Erythrina*.

### **El Rol de los Animales: Sistemas Agrosilvopastoriles**

Los sistemas agrosilvopastoriles—la combinación de árboles para la producción de madera, leña o árboles frutales con animales, con o sin la incorporación de cultivos—son practicados a varias escalas. Ejemplos de sistemas de gran escala incluyen plantaciones de árboles con la incorporación de pastos para controlar malezas y obtener un retorno más inmediato de la venta de productos animales. En la zona subtropical húmeda de Misiones, Argentina la práctica de aclarar un bosque para aprovechar madera de especies valiosas, y mantener un ambiente adecuado para los animales, además de conservar árboles valiosos para su aprovechamiento futuro, se denomina “parqueo”; en algunos casos se realizan rotaciones de potreros y siembra de pasturas bajo los árboles. La cría de ganado puede además complementar la agricultura de subsistencia, con animales integrados en huertos caseros, o en sistemas de producción de

alimento para ganado para su alimentación en establos.

En establecimientos donde se practican cultivos en callejones, el abono proveniente del ganado puede adicionarse al abono verde de los árboles para así aumentar la disponibilidad de nutrientes para los cultivos. El estiércol agregado al suelo puede también servir como una fuente de nutrientes para los microorganismos descomponedores, acelerando así la incorporación de nutrientes al suelo provenientes de la descomposición del abono verde. En algunas regiones, la incorporación de árboles—especialmente árboles de uso múltiple—puede tornar la cría de ganado de un uso ineficiente de la tierra a una actividad económica y ecológicamente factible. La incorporación de árboles puede mejorar el sistema incrementando la productividad de pasturas, o a través de la producción de forraje proveniente de hojas y/o frutas (Gill et al. 1990, Cobbina 1994/1995). En las zonas de altura (1300-2500 msnm) en los alrededores de San José, Costa Rica, son comunes los sistemas de *Alnus acuminata* (jaúl), en asociación con pastos, principalmente *Pennisetum clandestinum* (pasto kikuyo) y *Pennisetum purpureum* (pasto elefante), que sirven de forraje para el ganado de leche. Se estima que este sistema agrosilvopastoril tradicional se practica en aproximadamente 50.000 hectáreas en este país (Russo 1990).

Aunque la presencia de animales en una plantación de árboles puede acelerar el reciclaje de nutrientes, si la carga animal es muy alta, la compactación del suelo puede afectar el crecimiento de los árboles (Montagnini 1992). Generalmente es difícil separar los efectos de la compactación del suelo y el reciclaje de nutrientes generados por los animales, de los impactos de los árboles y pastos o leguminosas. En sistemas experimentales en la región Atlántica de Costa Rica, una especie leguminosa arbórea de rápido crecimiento (*Erythrina berteroana*) fué introducida en pasturas nativas. Por un período de estudio de tres años, el C orgánico del suelo aumentó en los tratamientos sin pastoreo, y la densidad aparente del suelo disminuyó en las áreas de control sin pastoreo y sin árboles (Cooperband and Logan 1993).

Otros experimentos en tierras marginales erosionadas de India subtropical compararon la erosión del suelo en sistemas agrosilvopastoriles con *Leucaena leucocephala* (usada para leña y forraje) y *Pennisetum purpureum* (usado para forraje) con la secuencia tradicional de cultivos de *Sesamum indicum* seguidos por *Brassica napus* (Grewal et al. 1994). Los resultados sugirieron que los sistemas agrosilvopastoriles fueron más efectivos en la

conservación del suelo que los sistemas tradicionales de cultivo. Sin embargo, el pastoreo animal no tuvo influencia sobre las variables del suelo debido a que los animales fueron mantenidos fuera del sistema.

En América Central se destaca el uso de cercas vivas de *Gliricidia sepium*, sobre todo como fuente de forraje para el ganado durante la época seca. Las cercas vivas son establecidas por medio de la plantación de estacas grandes (generalmente de 2,5 m de largo y entre 8 y 20 cm de diámetro), que enraizan fácilmente, y sobre las cuales se atan varios hilos (generalmente tres) de alambre de púas (Budowski 1987). Para el mantenimiento de estos sistemas es necesaria mucha mano de obra permanente. En las cercas vivas se utilizan numerosas especies, de acuerdo con las condiciones climáticas y culturales. Las cuatro especies más comunes en América Central, norte de América del Sur y muchos países del Caribe son *Gliricidia sepium*, *Bursera simaruba*, *Spondias purpurea* y *Erythrina berteroana* (Budowski 1987).

El uso de follaje de árboles y arbustos en la alimentación de rumiantes es una práctica conocida por los productores de América Central desde hace siglos. Los estudios realizados en el CATIE desde 1980 se orientaron a la valoración como fuente de forraje de árboles y arbustos y su incorporación a sistemas de producción (Benavidez 1989). El follaje de la mayoría de las especies leñosas muestra contenidos de proteína cruda del doble o el triple de los pastos tropicales y, en varios casos, superiores a los alimentos concentrados. Se destaca la calidad nutricional de dos especies de euforbiáceas, chicasquil ancho (*Cnidocolus acotinifolius*) y chicasquil fino (*C. chayamansa*), cuyo follaje contiene más de un 30% de proteína cruda. También sobresalen los valores forrajeros de dos moráceas, la morera (*Morus* sp.) y una especie de *Ficus* (amate); de malváceas como la amapola (*Malviscus arboreus*) y el clavelón (*Hibiscus rosa-sinensis*); del sauco negro *Sambucus mexicana* y del sauco amarillo (*S. canadensis*), que pertenecen a la familia caprifoliácea, y de tres especies de la familia compositae, chilca (*Senecio* sp.), tora blanca (*Verbesina turbacensis*), y tora morada (*V. myriocephala*), todas ellas con valores de proteína cruda superiores al 20% (Benavidez 1994).

Con las especies de mayor contenido de nutrimentos, trabajando con rumiantes menores (ganado caprino) se han obtenido valores de producción de leche más elevados, y se ha observado una respuesta muy significativa al incrementar el nivel de follaje en animales recibiendo una dieta a base de pasto. Tal es el caso del follaje de amapola y morera,

con los que se han observado rendimientos de 2.2 y 2.5 kg de leche por animal y por día, respectivamente, valores normalmente posibles sólo con el uso de concentrados. Además con el follaje de morera se han encontrado respuestas crecientes de ganancia de peso al aumentar su proporción en la dieta (Benavidez 1994).

Los sistemas agrosilvopastoriles requieren de un manejo cuidadoso para poder aprovechar el reciclaje de nutrientes y evitar la compactación del suelo. Esto puede lograrse a pequeña escala donde son más factibles el reciclaje manual del estiércol, el manejo y rotación de las pasturas y el transporte de forraje para alimentar los animales en establos o corrales. Sin embargo, estas prácticas requieren una labor intensiva y sólo serán adoptadas cuando los beneficios y retornos económicos sean atractivos para los agricultores.

## LOS EFECTOS DE LOS ARBOLES SOBRE LA FERTILIDAD DEL SUELO

Una clave en el éxito de los sistemas agroforestales es la elección de componentes leñosos de rápido crecimiento con impactos positivos sobre las propiedades del suelo (Sánchez et al. 1985, Nair 1989, Young 1989, Montagnini 1992). Varias publicaciones compilan características, usos, y especies Arbóreas de Uso Múltiple (AUM) para su aplicación en diferentes regiones del mundo (e.g., NAS 1979, NAS 1980, Glover y Adams 1990, Lantican y Taylor 1991). La mayoría de las listas y bases de datos de AUM incluyen información sobre el rol de las especies sobre la fertilidad del suelo o el reciclaje de nutrientes. Estas guías enfatizan la fijación de N y las características de nodulación de especies leguminosas y plantas actinorrízicas, generalmente ofreciendo pocos detalles sobre su efecto potencial sobre otros nutrientes del ecosistema. Numerosas especies arbóreas nativas y exóticas presentan potencial como mejoradoras de las características químicas, físicas y biológicas del suelo y pueden ser muy útiles en combinaciones agroforestales. Por ejemplo, de 30 especies arbóreas de valor económico probadas en condiciones experimentales en regiones de las planicies húmedas de Costa Rica, Brasil y Argentina, aproximadamente la mitad tuvieron un efecto positivo sobre el N total del suelo, materia orgánica y/o cationes intercambiables y P, en comparación con una pastura aledaña (Tabla 1). En varios casos los valores de los parámetros probados fueron muy similares a aquéllos encontrados en bosques secundarios adyacentes. La mayoría de las otras especies probadas no parecieron

cambiar sustancialmente las condiciones del suelo, y podrían ser utilizadas en suelos no degradados (Tabla 1).

Ciertas limitaciones disminuyen el amplio uso de los resultados tales como los mostrados en la Tabla 1, como un único criterio para la selección de especies para agroforestación. Primeramente, los resultados de pruebas estándar de fertilidad del suelo usadas en agricultura puede que no siempre revelen el potencial productivo del suelo, porque generalmente no incluyen todas las formas químicas de los nutrientes disponibles para su absorción por las plantas. Por ejemplo, aunque el N mineral ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ) constituye menos del 10% de la cantidad total de N del suelo, ésta es la forma de N disponible para las plantas. Datos en porcentajes de mineralización de N bajo especies arbóreas frecuentemente no se hallan disponibles porque su estimación requiere procedimientos cuidadosos de laboratorio o de muestreo a campo. La evaluación de los efectos de los árboles sobre la disponibilidad de P en el suelo es inclusive más difícil, aunque la liberación de P de la hojarasca y su absorción por cultivos en experimentos de invernadero pueden dar una indicación indirecta de los impactos sobre la disponibilidad de P en el suelo.

Los impactos de los árboles sobre el suelo dependen de las características de reciclaje de nutrientes tales como la cantidad de hojarasca producida, su composición química y su tasa de descomposición. La hojarasca de los árboles puede ser usada como abono verde con diferentes resultados: la rápida descomposición del abono verde puede acelerar el crecimiento de cultivos asociados en suelos pobres, mientras que en otros casos una hojarasca más persistente puede constituir una fuente más constante de nutrientes y una mejor cobertura del suelo a lo largo del año. En el ejemplo de la Tabla 1, los altos porcentajes de caída de hojarasca y de descomposición más lenta resultaron en una elevada acumulación de hojarasca y alto contenido de materia orgánica en el suelo bajo *V. ferruginea*, haciendo a esta especie apropiada para la protección contra la erosión del suelo. En contraste, la hojarasca de *V. guatemalensis* puede ser especialmente importante para el reciclaje de Ca y Mg (Montagnini et al. 1993). Por otro lado, la hojarasca de *H. alchorneoides* fue menos abundante que las otras tres especies, pero su contenido de nutrientes fué mayor. Estas características promovieron el reciclaje, especialmente de N, Ca, Mg, K y

Factores adicionales que influyen en la liberación de nutrientes de la hojarasca son

s contenidos de polifenoles y lignina, ya que ambos compuestos disminuyen la calidad de los materiales vegetales. La proporción polifenol/N por ejemplo, puede servir como un índice para tendencias de inmovilización a corto plazo observado en leguminosas con un alto contenido de polifenol, y la proporción lignina+polifenol/N puede servir como índice para patrones de largo plazo (Palm 1995). También es importante que los nutrientes sean provistos en sincronía con la necesidad de los cultivos (Palm 1995).

Se ha discutido que la habilidad de los sistemas agroforestales de facilitar la disponibilidad de nutrientes es muy limitada en suelos infértiles comparada con suelos fértiles, aunque pueden sin duda jugar un rol importante en la reducción de la pérdida de nutrientes en ambas situaciones (Szott et al. 1991). La producción de hojarasca y la cantidad de nutrientes reciclados en la hojarasca son mayores en suelos fértiles que en suelos infértiles; sin embargo, el uso de podas para acelerar el flujo de nutrientes puede incrementar la productividad de las plantas en suelos infértiles (Szott et al. 1991).

La incorporación de componentes leñosos en un sistema de producción puede proveer de beneficios provenientes de los productos arbóreos en sí (madera, leña, abono verde, y otros) y de sus potenciales ventajas ecológicas, especialmente sus habilidades en el reciclaje de nutrientes. La elección de una especie depende de que ambas ventajas productivas y ecológicas puedan lograrse en el mismo sistema, y en algunos casos una determinada función puede ser preferida.

## EFICIENCIA EN EL USO DE NUTRIENTES Y ELECCION DE ESPECIES

El concepto de eficiencia en el uso de nutrientes (EUN) ha sido empleado para describir la habilidad diferencial de especies arbóreas para acumular materia orgánica en relación a los nutrientes tomados del suelo. La EUN ha sido definida a diferentes escalas de espacio y tiempo. En los niveles de poblaciones y comunidades vegetales, la EUN es definida generalmente como la cantidad de biomasa producida por unidad de nutriente absorbido (Grubb 1989, Binkley et al. 1992, Medina 1995). Puesto que usualmente no se efectúan mediciones de absorción de nutrientes en rodales de árboles maduros, se utiliza la caída de hojarasca como un estimador de la absorción anual de nutrientes (Vitousek 1984, Grubb 1989, Binkley et al. 1992). Idealmente, deberían hacerse esfuerzos para medir la producción total por

tallos y raíces y considerar la absorción de nutrientes más las pérdidas debido a plagas y lixiviación de nutrientes (Grubb 1989). Las diferencias en el reciclaje y eficiencia de uso pueden ser el resultado de varios mecanismos de conservación de nutrientes, mediados por interacciones fisiológicas o mutualísticas (Chapin 1980, 1983).

También es importante considerar la relación entre la habilidad de reciclaje de las especies y sus potenciales impactos a corto y largo plazo en la mejora de nutrientes del suelo. Un "índice de reciclaje de nutrientes" (IRN), tomado como la inversa de EUN, es decir, la cantidad de nutrientes en la producción anual de hojarasca/producción anual de biomasa, ha sido usado para evaluar la adaptabilidad de especies arbóreas para combinaciones en sistemas agroforestales. Por ejemplo, Fassbender et al. (1991) encontraron que el índice de reciclaje de P era aproximadamente 6 veces mayor en combinaciones de cacao con *Erythrina poeppigiana* que con *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales en Turrialba, Costa Rica. *Cordia*, una especie maderera, acumuló mucho P en la biomasa del tronco, mientras que *Erythrina*, un árbol de sombra con buenas propiedades de reciclaje de nutrientes, produjo grandes cantidades de hojas y ramas resultando en un mayor reciclaje de P.

Cuando se pone en contexto con las características de reciclaje de nutrientes de una especie, la EUN puede indicar el diseño y manejo apropiados de un sistema tendientes a mantener la productividad y recuperar o conservar nutrientes a largo plazo. La habilidad de una especie para producir grandes cantidades de biomasa con menos nutrientes puede ser una consideración importante en la selección de especies para sitios degradados y pobres en nutrientes.

#### Aplicabilidad del Concepto de EUN en el Diseño y Manejo de Sistemas Agroforestales

De las 24 especies mostradas en la Tabla 1, datos sobre productividad de árboles, caída de hojarasca, y química de la hojarasca de ocho especies de Bahía, Brasil y cuatro especies de La Selva, Costa Rica fueron usados para calcular valores de EUN (Tabla 2). Debido a que las especies fueron parte de proyectos de ensayos de especies arbóreas forestales, los valores de EUN fueron calculados como el incremento anual de biomasa del tronco/nutrientes en la caída anual de hojarasca (Montagnini 1995). No hubieron datos suficientes sobre caída de hojarasca o productividad de las otras especies mostradas en la Tabla 1. En ambos sitios, Bahía y La Selva, las

mayores eficiencias fueron para el K y el P, y las menores para el N, Ca y Mg (Tabla 2).

Los resultados de Bahía sugieren que *Bombax macrophyllum* y *Plathymenia foliolosa*, con altos valores de EUN, crecerían bien en suelos relativamente pobres en nutrientes, y por lo tanto podrían ser buenas alternativas para la reforestación de sitios degradados luego del abandono después de actividades agrícolas o ganaderas, situaciones frecuentes en la región. *B. macrophyllum* tendió a acumular altas cantidades de hojarasca bajo su copa mientras que rodales de *P. foliolosa* tuvieron relativamente altas cantidades de materia orgánica y N total en el horizonte superior del suelo, en comparación con áreas adyacentes a bosques secundarios (Montagnini et al. 1994). Estas características indican que estas especies pueden ser adecuadas para proyectos de rehabilitación de suelos, incluyendo el incremento del contenido de materia orgánica y la protección contra la erosión. En Bahía, otras especies tales como *Buchenavia grandis* y *Hymenaea aurea*, con valores bajos de EUN, serían más apropiadas para sistemas agroforestales donde los cultivos se beneficiarían con el reciclaje de nutrientes de la hojarasca.

En La Selva, *Vochysia ferruginea* mostró comparativamente bajos valores de eficiencia para todos los nutrientes considerados, confirmando el rol beneficioso de esta especie en el reciclaje de materia orgánica y su impacto positivo sobre la fertilidad del suelo como se muestra en la Tabla 1. La relativamente baja eficiencia (alto reciclaje) de N y P encontrado para *Stryphnodendron microstachyum* y *Hyeronima alchorneoides* coinciden con resultados de experimentos donde plántulas de maíz cultivadas con abono verde de estas especies crecieron mejor y absorbieron más N y P que con abono verde de otras especies (Montagnini et al. 1993).

En proyectos que apuntan a la recuperación de los nutrientes en suelos degradados, las especies con alta eficiencia en el uso de nutrientes deberían ser combinadas en tiempo o espacio con especies con baja eficiencia de uso de nutrientes. Sin embargo, los valores de EUN por sí solos puede que no sean suficientes para determinar el rol de una especie arbórea sobre los nutrientes del ecosistema. Por ejemplo, a pesar de los altos valores de EUN, una especie arbórea puede presentar alta demanda de nutrientes del suelo a largo plazo. En las regiones tropicales húmedas se considera que los nutrientes son un factor crítico para la productividad de los árboles, mientras que en regiones con una marcada estación

seca la eficiencia de uso del agua sería un factor más importante que la EUN, influyendo sobre la elección de especies y el diseño de sistemas. Finalmente, otras adaptaciones ecológicas de las especies (p.e., eficiencia del uso de luz, arquitectura radicular, resistencia a plagas y enfermedades) pueden ser más importantes en la selección de especies para combinaciones agroforestales.

## FACTIBILIDAD DE SISTEMAS AGROFORESTALES

La introducción de árboles en sistemas de producción es ventajosa sólo si la competencia entre árboles y cultivos por recursos es minimizada mientras que son favorecidos los efectos positivos sobre la fertilidad del suelo: ejemplos de tales sistemas incluyen la introducción de especies fijadoras de N tales como *Faidherbia albida* en el Sahel, y algunos sistemas secuenciales de barbechos mejorados (Sánchez 1995). Aparte de sus efectos benéficos sobre el suelo, muchas especies arbóreas con rápido cierre del dosel disminuyen el crecimiento de malezas, por lo tanto las características de copa de los árboles afectarán su elección y dictarán las prácticas de manejo requeridas en sus usos en sistemas agroforestales. Por último, las decisiones para cambiar cualquier sistema deben tomar en cuenta los objetivos que el cambio pretende lograr, por lo tanto la selección de especies para sistemas agroforestales debe estar basada en varios factores además de sus influencias positivas sobre suelos y la producción de los cultivos (Wood 1990). La elección de especies para forestación y para sistemas agroforestales es regida en última instancia por la preferencia de los pobladores locales, lo cual a su vez depende de la disponibilidad de plantines, incentivos oficiales y de los mercados.

La elección de especies de cultivo anuales adecuadas es importante para el éxito de sistemas de cultivos en callejones. El maíz y el arroz por ejemplo, demandan más luz que los frijoles o la mandioca y son por lo tanto más afectados por la sombra de los árboles. La altura de poda y el ancho de los callejones pueden ser ajustados para evitar una competencia excesiva entre árboles y cultivos. En experimentos del CATIE por ejemplo, Kass (1989) encontró que la producción de plantas de maíz era mayor cuando se encontraban a mayor distancia de las hileras de *Gliricidia* dentro de los callejones. Los resultados de los análisis económicos para los mismos sistemas indicaron que el cultivo en callejones no era conveniente para N, con un costo de mercado bajo de fertilizantes.

La adopción de sistemas de cultivos en callejones es de amplia difusión en áreas de bajos ingresos en el este de Indonesia, el sur de las Filipinas, y en Sri Lanka (Kang y Wilson 1987). En Nigeria, investigadores del Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA) encontraron que aunque la mano de obra para la poda de las hileras es una gran limitante, cultivos en callejones con *Calliandra* spp. han dado buenos resultados (Plucknett 1990). Sin embargo la aplicación de la técnica de cultivos en callejones tiene sus limitaciones: a veces los monocultivos son preferidos por razones prácticas, y a veces el valor de los productos de las podas de las hileras de árboles es mayor que el valor de los cultivos. La plantación de los árboles en las hileras favorece la producción de biomasa por los árboles, pero puede resultar en una menor producción de los cultivos debido a la competencia con los árboles por luz y nutrientes. En suelos altamente lavados, un cultivo en callejones exitoso puede requerir el uso de insumos externos (p.e., agregado de cal para incrementar el pH) para mantener niveles de fertilidad del suelo adecuados para las producciones deseadas de cultivos (Evensen et al. 1995).

Cuando la existencia de nutrientes es baja, puede tomar varios años para que un sistema agroforestal acumule nutrientes y materia orgánica en el suelo hasta un punto en el cual el sistema se torne conveniente en comparación con monocultivos. Por ejemplo, tres años después del establecimiento del sistema de cultivo en callejones de *Albizia*-sorgo discutido previamente, la producción del cultivo de grano en el sistema era menor que en el control, a pesar del lento pero continuo aumento en P del suelo disponible en el sistema agroforestal. Debido a la baja productividad inicial de los sistemas agroforestales establecidos en suelos degradados, algunas veces éstos no son económicamente factibles para los agricultores.

Como la adopción de sistemas agroforestales involucra la plantación de árboles seleccionados, se necesitará capital inicial para cubrir los costos de establecimiento de los 2-3 primeros años. Este requerimiento puede constituirse en un problema si los agricultores no tienen acceso a capital. En las tierras bajas del Atlántico de Costa Rica, los sistemas de barbechos enriquecidos pueden ser más convenientes que la agricultura o ganadería convencional; sin embargo, se requiere de asistencia para ayudar a los agricultores a cubrir los gastos iniciales que se necesitan para plantar los árboles (Montagnini y Mendelsohn 1996). Los agricultores de subsistencia generalmente no tiene acceso a

préstamos y no pueden solventar los gastos aún cuando lo consideran una inversión conveniente. Los programas de préstamos de bajos intereses para la reforestación pueden hacer realidad el desarrollo sostenido permitiendo a pequeños productores hacer una sólida inversión a largo plazo en sus tierras.

## CONCLUSIONES

El objetivo del diseño y manejo de los sistemas agroforestales es modificar el ciclaje de nutrientes de manera de hacer un uso más eficiente de los mismos, sea que éstos provengan de fuentes naturales o fertilizantes. Experiencias descritas en este trabajo con barbechos mejorados son de relevancia especial en Centro América y otras regiones donde la tierra es escasa y los períodos de barbecho no son lo suficientemente prolongados como para restaurar la capacidad productiva de los suelos. Se destacan ejemplos de prácticas agrícolas llevadas a cabo por pueblos indígenas, tales como el de los Kayapó en Brasil, que utilizan árboles para mantener o restaurar la fertilidad del suelo sin utilizar ningún fertilizante químico. En situaciones donde los "barbechos mejorados" no son factibles debido a la escasez de tierras, técnicas tales como el cultivo en callejones con la aplicación de "mulch" (mantillo o abono verde) pueden constituir alternativas de agricultura viables.

En estudios realizados por CATIE en Costa Rica, se ha comprobado que las cantidades de nutrientes reciclados por los árboles en asociación con cultivos permanentes como el café, alcanzaron los niveles recomendados de fertilización requerida para la producción. En sistemas agrosilvopastoriles, el uso de follaje de árboles y arbustos en la alimentación de rumiantes es una práctica conocida. El follaje de la mayoría de las especies leñosas muestra contenidos de proteína cruda del doble o el triple del de los pastos tropicales y su utilización redundó en ahorros considerables y aumentos significativos en la producción de carne y leche.

Una clave en el éxito de los sistemas agroforestales es la elección de componentes leñosos de rápido crecimiento con impactos positivos sobre las propiedades del suelo. Numerosas especies arbóreas nativas y exóticas presentan potencial como mejoradoras de las características químicas, físicas y biológicas del suelo y pueden ser muy útiles en combinaciones agroforestales.

Cuando se pone en contexto con las características de reciclaje de nutrientes de una especie, el concepto de eficiencia en el uso de nutrientes (EUN) puede indicar el diseño y manejo apropiados de un sistema tendientes

a mantener la productividad y recuperar o conservar nutrientes a largo plazo. La habilidad de una especie para producir grandes cantidades de biomasa con menos nutrientes puede ser una consideración importante en la selección de especies para sitios degradados y pobres en nutrientes.

## BIBLIOGRAFIA

- AE, N., J. ARIHARA, K. Okada, T. Yoshihara, and C. Johansen. 1990. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent. *Science* **248**: 477-480.
- ANDERSON, A.B. 1990. Extraction and forest management by rural inhabitants in the Amazon estuary. pp. 65-85 In: Anderson, A.B. (Ed.). *Alternatives to Deforestation: Steps Toward Sustainable Use of the Amazon Rain Forest*. Columbia Univ. Press, N.Y.
- ANDREIÉSSE, J.P. and Schelhaas, R.M. 1987. A monitoring study of nutrient cycles in soils used for shifting cultivation under various climatic conditions in tropical Asia. III. The effects of land clearing through burning on the fertility level. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **19**: 311-332.
- ARANGUREN, J., Escalante, G. and Herrera, H. 1982. Nitrogen cycle of tropical perennial crops under shade trees II. Cacao. *Plant and Soil* **67**: 259-269.
- BALÉE, W. 1992. People of the fallow: a historical ecology of foraging in lowland South America. pp. 35-57 In: Redford, K. H. and Padoch, C. (Eds.). *Conservation of Neotropical Forests*. Columbia Univ. Press, N.Y.
- BANDY, D. E., Garrity, D. P. and Sánchez, P. A. 1993. The worldwide problem of slash and burn agriculture. *Agroforestry Today* **5**: 2-9.
- BEER, J. 1988. Litter production and nutrient cycling in coffee (*Coffea arabica*) or cacao (*Theobroma cacao*) plantations with shade trees. *Agroforestry Systems* **7**: 33-45.
- BENAVIDEZ, J. E. 1989. La producción caprina como un componente en sistemas agroforestales. Turrialba, Costa Rica, CATIE, Programa Agroforestal. 90 pp.
- BENAVIDEZ, J. E. 1994. Árboles y arbustos forrajeros en América Central. Volumen 1. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico No. 236. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

- BINKLEY, D., Dunkin, K. A., DeBell, D. and Ryan, M. G. 1992. Production and nutrient cycling in mixed plantations of *Eucalyptus* and *Albizia* in Hawaii. *Forest Science* **38**: 393-408.
- BUDOWSKI, G. 1987. Living fences -a widespread agroforestry practice in Central America. pp. 169-178 In: H. L. Gholz (ed). *Agroforestry: Realities, possibilities and potentials*. Martinus Nijhoff/ICRAF. Dordrecht.
- CHAPIN, F.S. 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* **11**: 233-260.
- CHAPIN, F.S. 1983. Patterns of nutrient absorption and use by plants from natural and man-modified environments. pp. 175-187 In: Mooney, H. A. and Godron, M.(Eds.). *Disturbance and Ecosystems*. Ecological Studies Vol. 44. Springer Verlag, Berlin.
- COBBINA, J. 1994/1995. Growth and herbage productivity of gliricidia in *Panicum maximum* pasture as influenced by seed preparation, planting and weed control techniques. *Agroforestry Systems* **28**: 193-201.
- COOPERBAND, L. R. and Logan, T. J. 1993. Baseline soil characteristics of a humid tropical silvopastoral system and changes in selected soil properties. *Turrialba* **43**: 22-36.
- EVENSEN, C. I., Dierolf, T. S. and Yost, R. S. 1995. Decreasing rice and cowpea yields in alley cropping on a highly weathered Oxisol in West Sumatra, Indonesia. *Agroforestry Systems* **31**: 1-19.
- FASSBENDER, H. W., Beer, J., Heuvelop J., Imbach, A., Enriquez, G. and Bonnemann, A. 1991. Ten year balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica. *Forest Ecology and Management* **45**: 173-183.
- FERNÁNDEZ, R., Montagnini, F., and Hamilton, H. 1997. The influence of native tree species on soil chemistry in a subtropical humid forest region of Argentina. *Journal of Tropical Forest Science* **10** (2): 188-196.
- GILL, A. S., Gangwar, K. S. and Sinsinwar, B. S. 1990. Productivity of perennial grasses in association with *Acacia albida* under different cutting schedules in dryland conditions. *Indian Journal of Dryland Agricultural Research and Development* **5**: 68-71.
- GLOVER, N. AND ADAMS, N. (Eds.). 1990. *Tree Improvement of Multipurpose Species*. Multipurpose Tree Species Network Technical Series, vol. 2. Winrock International Institute for Agricultural Development. Arlington, VA.
- GÓMEZ-POMPA, A., and Kaus, A. 1990. Traditional management of tropical forests in Mexico. pp. 45-64 In: Anderson, A.B. (Ed.). *Alternatives to Deforestation: Steps Toward Sustainable Use of the Amazon Rain Forest*. Columbia Univ. Press, N.Y.
- GREWAL, S., Juneja, J. M., Singh, K. and Singh, S. 1994. A comparison of two agroforestry systems for soil, water and nutrient conservation on degraded land. *Soil Technology* **7**: 145-153.
- GRUBB, P. J. 1989. The role of mineral nutrients in the tropics: a plant ecologist view. pp. 417-440 In: Proctor, J. (Ed.). *Mineral Nutrients in Tropical Forest and Savanna Ecosystems*. Blackwell Scientific Publications, Boston.
- HAGGAR, J. P. 1994. Trees in alley cropping: competitors or soil improvers? *Outlook on Agriculture* **23**: 27-32.
- HAGGAR, J. P., Tanner, E. V. J., Beer, J. W. and Kass, D. C. L. 1993. Nitrogen dynamics of tropical agroforestry and annual cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry* **25**: 1363-1378.
- HAN, X. 1989. The mobilization of aluminum- and iron- bound phosphorus by organic matter decomposition in highly weathered soils. Ph.D. Dissertation. Univ. of Georgia, Athens, GA.
- JORDAN, C.F. 1989. *An Amazonian Rain Forest*. UNESCO and The Parthenon Group. Carnforth, U.K.
- JORDAN, C.F. 1995. *Conservation: Replacing Quality with Quantity as a Goal for Global Management*. Wiley, N.Y.
- KANG, B. T. and Wilson, G. F. 1987. The development of alley cropping as a promising agroforestry technology. pp. 227-244 In: Stepler, H. A. and Nair, P. K. R. (Eds.). *Agroforestry. A Decade of Development*. ICRAF, Nairobi.
- KANG, B. T., Reynolds, L. and Atta-Krah, A. N. 1990. Alley farming. *Advances in Agronomy* **43**: 315-359.
- KASS, D. L. 1989. Resultados de seis años de investigación de cultivos en callejones (alley cropping) en "La Montaña", Turrialba, Costa Rica. *El Chasqui (Costa Rica)* **19**: 5-24.
- KASS, D. C. L., Foletti, C., Szott, L. T., Landaverde, R. and Nolasco, R. 1993. *Traditional fallow*

- systems of the Americas. *Agroforestry Systems* 23: 207-218.
- LANTICAN, C. B. and Taylor, D. A. (Eds.). 1991. *Compendium of National Research on Multipurpose Tree Species 1976-1990*. Winrock International Institute for Agricultural Development, Arlington, VA.
- LESCURE, J., Empeaire, L., Pinton, F. and Renault-Lescure, O. 1992. Non-timber forest products and extractive activities in the middle Rio Negro Region, Brazil. pp. 151-172 In: Plotkin, M. and Famolare, L. (Eds.). *Sustainable Harvest and Marketing of Rain Forest Products*. Island Press, Washington, D.C.
- MATTA-MACHADO, R. and Jordan, C. F. 1995. Nutrient dynamics during the first three years of an alley cropping agroecosystem in southeastern USA. *Agroforestry Systems* 30: 351-362.
- MEDINA, E. 1995. *Physiological ecology of trees and application to forest management*. pp. 289-307 In: Lugo, A.E. and Lowe, C. (Eds.). *Tropical Forests: Management and Ecology*. Ecological Studies 112. Springer-Verlag, New York.
- MESQUITA, R. 1995. *The effect of different proportions of canopy opening on the carbon cycle of Central Amazonian secondary forest*. Ph.D. Dissertation, Univ. of Georgia, Athens, GA.
- MONTAGNINI, F. 1992. *Sistemas Agroforestales. Principios y Aplicaciones en los Trópicos*. 2da. ed. OTS/CATIE, San José, Costa Rica. 622 pp.
- MONTAGNINI, F., Ramstad, K. and Sancho, F. 1993. Litterfall, litter decomposition and the use of mulch of four indigenous tree species in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Agroforestry Systems* 23: 39-61.
- MONTAGNINI, F., Fanzeres, A. and da Vinha, S. G. 1994. Studies on restoration ecology in the Atlantic forest region of Bahia, Brazil. *Interciencia* 19: 323-330.
- MONTAGNINI, F. 1995. *Recuperación de Áreas Degradadas con la Utilización de Árboles Nativos: Experiencias en Tres Regiones de Latinoamérica*. III Congreso Latinoamericano de Ecología, Mérida, Venezuela. October 19-21, 1995.
- MONTAGNINI, F. and Mendelsohn, R. 1996. Managing forest fallows: improving the economics of swidden agriculture. *Ambio* 26(2): 118-123.
- NAIR, P. K. R. 1989. The role of trees in soil productivity and protection. pp. 567-589 In: Nair, P. K. R. (Ed.). *Agroforestry Systems in the Tropics*. Kluwer Academic Publishers/International Council for Research in Agroforestry, Dordrecht, The Netherlands.
- NAIR, P. K. R. 1990. *The Prospects and Promise of Agroforestry in the Tropics, a Review of Technical and Socioeconomic Information with Special Emphasis to Africa*. Report to the World Bank, Washington, DC. 121 pp.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1979. *Tropical Legumes: Resources for the Future*. Board of Science and Technology for International Development. National Research Council, Washington, DC.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1980. *Firewood Crops. Shrubs and Tree Species for Energy Production*. Board of Science and Technology for International Development. National Research Council, Washington, DC.
- NATIONS, J. D. 1992. Xateros, chicleros, and pimenteros: Harvesting renewable tropical forest resources in the Guatemalan Petén. pp. 208-219 In: Redford K.H. and Padoch, C. (Eds.). *Conservation of Neotropical Forests*. Columbia Univ. Press, N.Y.
- PALM, C. A. 1995. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. *Agroforestry Systems* 30: 105-124.
- PLUCKNETT, D. L. 1990. International goals and the role of the international research centers. pp. 32-49 In: Edwards, C.A., Lal, R., Madden, P. Miller, G. and House, G. (Eds.). *Sustainable Agricultural Systems*. St. Lucie Press, Delray Beach, Florida.
- POSEY, D.A. 1982. The keepers of the forest. *Garden* 6: 18-24.
- REGNIER, E. and Janke, R. 1990. Evolving strategies for managing weeds. pp. 174-202 In: Edwards, C.A., Lal, R., Madden, P. Miller, G. and House, G. (Eds.). *Sustainable Agricultural Systems*. St. Lucie Press, Delray Beach, Florida.
- RUSSO, R. O. 1990. Evaluating *Alnus acuminata* as a component in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 10: 241-252.
- SALAZAR, A., Szott, L. T. and Palm, C. A. 1993. Crop-tree interactions in alley cropping systems on alluvial soils in the Upper Amazon basin. *Agroforestry Systems* 22: 67-82.
- SÁNCHEZ, P.A., Palm, C.A., Davey, C.B., Szott, L.T. and Russell, E.C. 1985. Tree crops as soil improvers in the humid tropics? pp. 327-350 In:

- Cannell, M.G.R. and Jackson, J.E. (Eds.). Attributes of Trees as Crop Plants. Inst. of Terr. Ecol., Nat. Environ. Res. Council, Abbots Ripton, Huntingdon, England.
- SÁNCHEZ, P. A. 1995. Science in agroforestry. *Agroforestry Systems* 30: 5-55.
- SIPS, P. 1993. Management of Tropical Secondary Rain Forests in Latin America. Today's Challenge, Tomorrow's Accomplished Fact!? National Reference Center for Nature, Forests and Landscape, Ministry of Agriculture, Nature Management and Fisheries, Wageningen, The Netherlands. 72 pp.
- SUBLER, S. and Uhl, C. 1990. Japanese agroforestry in Amazonia: a case study in Tomé-Açu, Brazil. pp. 152-166 In: Anderson, A.B. (Ed.). Alternatives to Deforestation: Steps Toward Sustainable Use of the Amazon Rain Forest. Columbia Univ. Press, N.Y.
- SZOTT, L. T., Palm, C. A. and Sánchez, P. A. 1991. Agroforestry in acid soils of the humid tropics. *Advances in Agronomy* 45: 275-300.
- VAN WAMBEKE, A. 1992. Soils of the Tropics. Properties and Appraisal. McGraw-Hill, New York.
- VITOUSEK, P. M. 1984. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology* 65: 285-298.
- WATTERS, R. F. 1971. Shifting Cultivation in Latin America. FAO Forestry Development Paper No. 17. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 305 pp.
- WOOD, P. J. 1990. Principles of species selection for agroforestry. pp. 290-309 In: MacDicken, K. G. and Vergara, N. T. (Eds.). *Agroforestry: Classification and Management*. Wiley, New York.
- YOUNG, A., 1989. *Agroforestry for Soil Conservation*. C.A.B. International and International Council for Research in Agroforestry, Wallingford, UK, 276 pp.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a V. Derr y a N. Muniz-Miret por su revisión del manuscrito. A W. Salazar por la traducción al español.

**Tabla 2: Eficiencia del uso de nutrientes (EUN) (Megagramos de incremento anual de biomasa del tallo)**

Porto Seguro, Bahía, Brasil:	N	Ca	Mg	K	P
<b>Especies leguminosas fijadoras de N:</b>					
<i>Centrolobium robustum</i>	0.05	0.05	0.37	0.87	1.74
<i>Platymenia foliolosa</i>	0.08	0.34	7.00	3.51	4.66
<b>Especies leguminosas no fijadoras de N:</b>					
<i>Caesalpinia echinata</i>	0.04	0.03	0.54	0.78	1.81
<i>Hymenaea aurea</i>	0.06	0.09	0.45	0.64	1.91
<b>Especies de otras familias:</b>					
<i>Bombax macrophyllum</i>	0.36	0.20	0.88	20.70	20.70
<i>Buchenavia grandis</i>	0.05	0.04	0.38	0.68	1.70
<i>Eschweilera ovata</i>	0.12	0.10	0.44	0.96	5.73
<i>Lecythis pisonis</i>	0.12	0.11	0.89	1.58	3.56
<b>La Selva, Costa Rica:</b>					
<i>Stryphnodendron mycrostachyum</i>	0.08	0.06	0.35	0.63	0.53
<i>Vochysia ferruginea</i>	0.08	0.03	0.26	0.38	0.56
<i>Vochysia guatemalensis</i>	0.16	0.05	0.29	0.84	1.07
<i>Hyeronima alchorneoides</i>	0.09	0.03	0.15	0.22	0.45

**Tabla 1: Características químicas del horizonte superior del suelo en rodales puros de 24 especies arbóreas nativas en La Selva, Costa Rica; Porto Seguro, Bahia, Brasil; y Misiones, Argentina.**

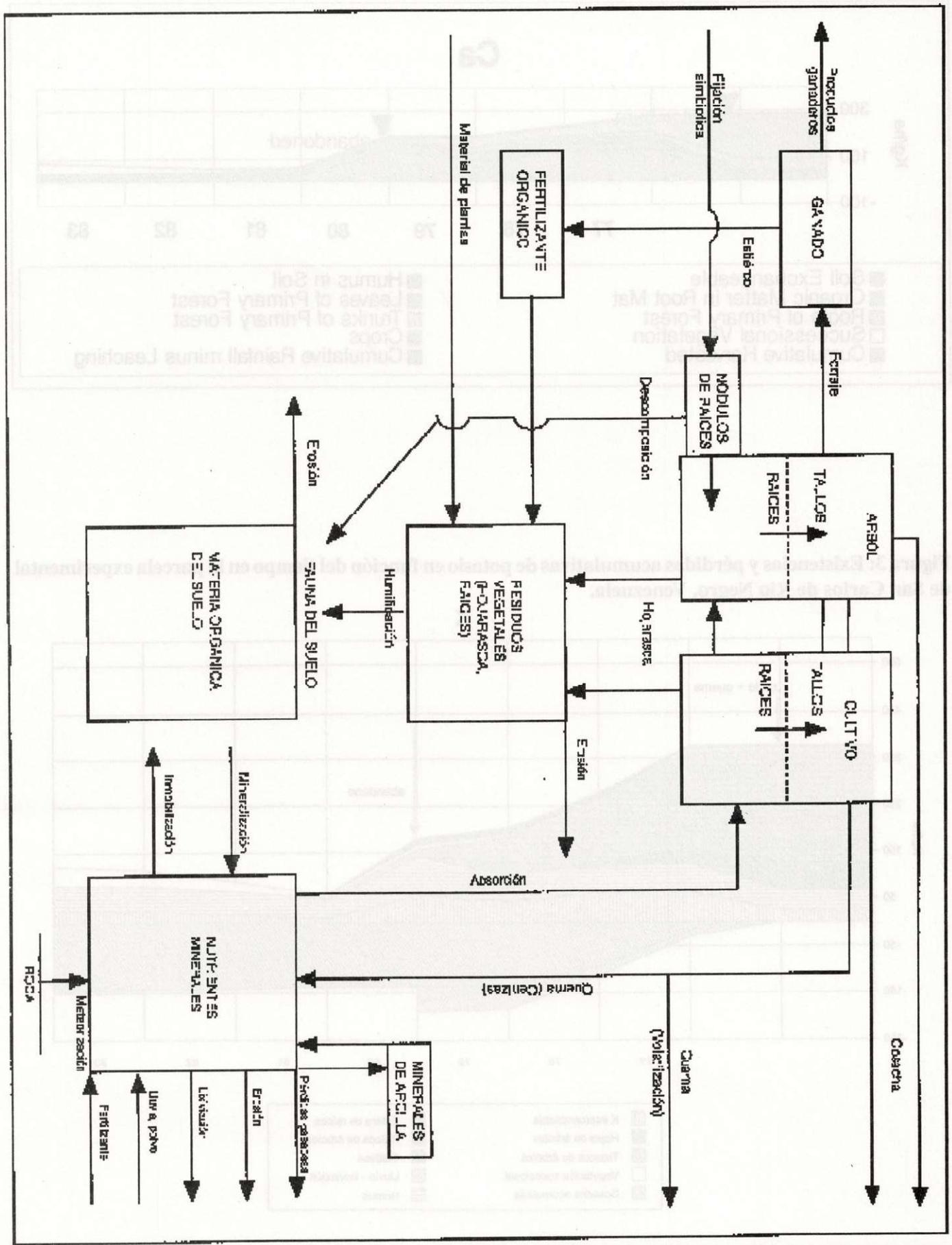
Sitio/Especie arborea	pH	C	N (%)	P (%)	K (cmol.kg <sup>-1</sup> )	Ca	Mg
<b>a- La Selva, Costa Rica<sup>1</sup></b>							
<i>Stryphnodendron microstachyum</i>	5.4ab	3.42ab	0.29b	5.6a	0.27a	0.45a	0.63ab
<i>Vochysia ferruginea</i>	5.4ab	3.76a	0.32a	7.1a	0.22a	0.73a	0.61ab
<i>Vochysia guatemalensis</i>	5.3ab	3.13ab	0.29b	5.2a	0.11a	0.25a	0.37ab
<i>Hyeronima alchorneoides</i>	5.1b	2.96c	0.22b	1.5b	0.09a	0.31b	0.21b
<b>Pastura Abandonada</b>	5.3ab	2.73c	0.22b	4.9a	0.19a	0.32b	0.27b
<b>Bosque secundario</b>	5.3ab	4.33a	0.33a	3.6b	0.17a	0.68a	0.55ab
<b>b- Porto Seguro, Bahia, Brasil<sup>2</sup></b>							
<b>Especies leguminosas fijadoras de N:</b>							
<i>Bowdichia virgilioides</i>	4.9	1.98def	0.16def	1.32def	0.06bcd	1.35bc	0.39de
<i>Centrolobium minus</i>	4.6	1.87efg	0.16def	1.19efg	0.05fgh	0.53hi	0.21i
<i>Centrolobium robustum</i>	4.5	1.65ij	0.13f	1.07fgh	0.05fgh	0.40i	0.16i
<i>Inga affinis</i>	4.9	2.10cde	0.18cd	3.64a	0.07bcd	0.76gh	0.49bc
<i>Parapiptadenia pterosperma</i>	4.9	2.38ab	0.20bc	0.78ij	0.08b	1.40bc	0.60a
<i>Pithecellobium elegans</i>	4.8	1.67hij	0.15ef	0.59kl	0.05efg	0.79gh	0.40de
<i>Platymenia foliolosa</i>	4.7	2.08cde	0.18bcd	0.13m	0.05efg	1.05cde	0.42cd
<b>Especies leguminosas no fijadoras de N:</b>							
<i>Arapatiella psilophylla</i>	4.7	1.94def	0.18bcd	1.45de	0.06bcd	0.38i	0.37de
<i>Caesalpinia echinata</i>	5.1	2.41a	0.17cde	1.54de	0.07bcd	1.17bcd	0.39de
<i>Cassia spp.</i>	4.7	1.94def	0.16def	1.40def	0.07bcd	0.56hi	0.34de
<i>Copaifera luscens</i>	5.0	2.02cde	0.17cde	0.63jk	0.06cde	1.15bcd	0.34de
<i>Dimorphandra jorgei</i>	4.9	1.97def	0.19bc	0.97ghi	0.03j	0.98def	0.32efg
<i>Hymenaea aurea</i>	4.4	2.00def	0.16def	2.03c	0.06bcd	0.26i	0.24hi
<i>Macrobium latifolium</i>	4.7	1.90efg	0.16def	0.67jk	0.04hij	0.36i	0.25fg
<b>De otras familias:</b>							
<i>Bombax macrophyllum</i>	4.8	1.78ghi	0.13f	1.42de	0.06bcd	0.84efg	0.33ef
<i>Buchenavia grandis</i>	4.6	2.06cde	0.14f	2.09c	0.06bcd	0.80fg	0.33ef
<i>Eschweilera ovata</i>	5.3	1.82fgh	0.31a	0.58kl	0.11a	1.38bc	0.53ab
<i>Lecythis pisonis</i>	5.3	1.99def	0.18bcd	0.23lm	0.04ghi	1.46b	0.32ef
<i>Licania hypoleuca</i>	5.0	1.63j	0.14f	1.61d	0.07bcd	1.31bcd	0.35de
<i>Pradosia lactescens</i>	4.9	2.15bcd	0.18bcd	0.81ij	0.05fgh	0.84efg	0.24gh
<b>Bosque primario</b>	4.9	1.99def	0.15ef	0.96hi	0.08bc	1.23bcd	0.36de
<b>Bosque secundario</b>	5.1	2.15abc	0.22b	2.46b	0.07bcd	2.20a	0.62a
<b>c- Misiones, Argentina<sup>3</sup></b>							
<i>Balfourodendron riedelianum</i>	5.8	2.6b	0.34ab	n.d.	0.55bc	7.1bc	1.7c
<i>Bastardiopsis densiflora</i>	7.1	6.3a	0.65a	n.d.	1.28a	20.4a	3.4ab
<i>Cordia trichotoma</i>	6.4	4.0ab	0.46ab	n.d.	0.79b	13.6ab	2.6abc
<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	6.1	3.4ab	0.39ab	n.d.	0.67b	8.7bc	3.5a
<i>Ocotea puberula</i>	6.1	4.4ab	0.59a	6.09a	1.11a	17.3a	4.7a
<b>Control con pastos</b>	5.8	2.2b	0.027b	n.d.	0.26c	6.3c	2.4bc

Fuentes: <sup>1</sup> Montagnini y Mendelsohn (1996), <sup>2</sup> Montagnini et al. (1994), <sup>3</sup> Fernández et al. (1995).

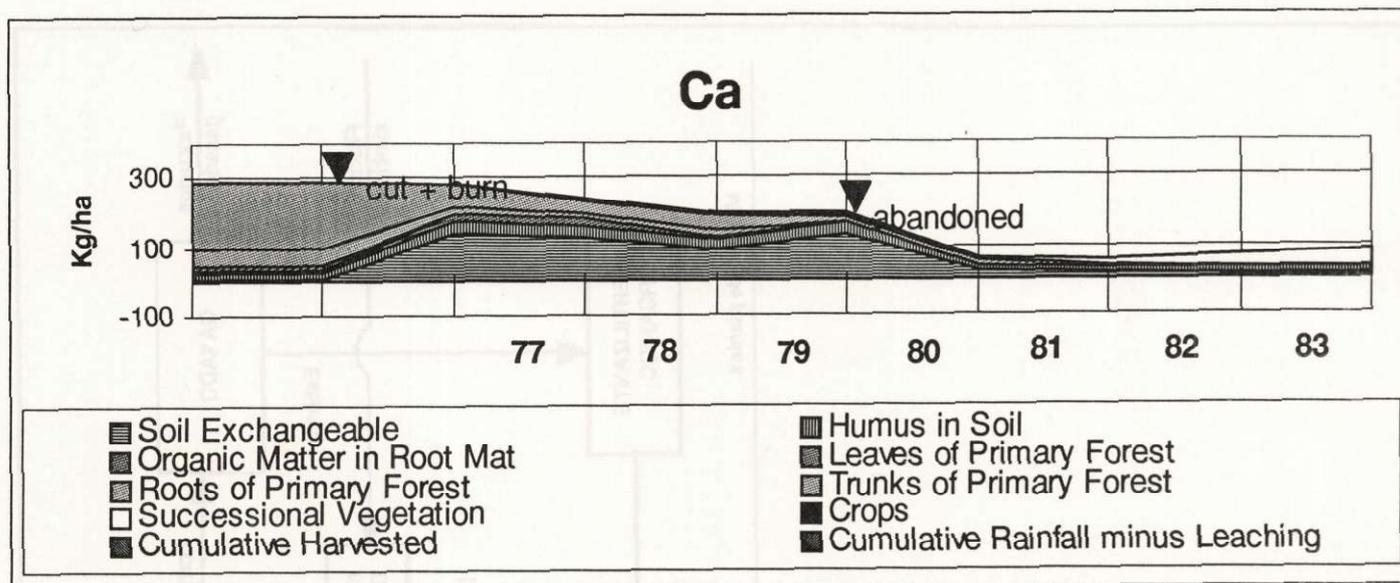
Nota: Para cada sitio, las diferencias entre medias son estadísticamente diferentes cuando se encuentran seguidas de diferentes letras (p<0.05).

n.d.: no detectado

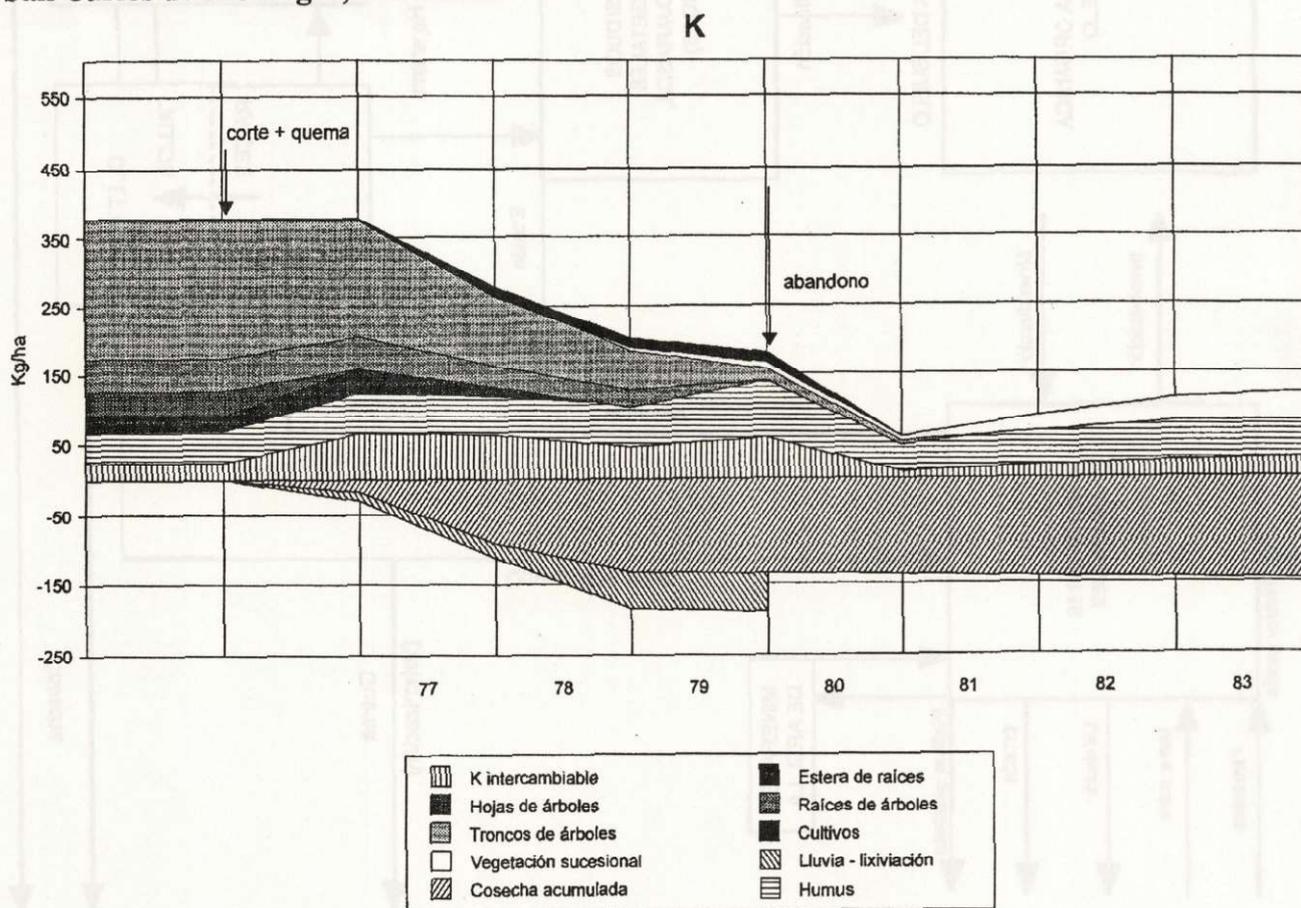
Figura 1: Diagrama del ciclaje de nutrientes en sistemas agroforestales (adaptado de Young 1989)



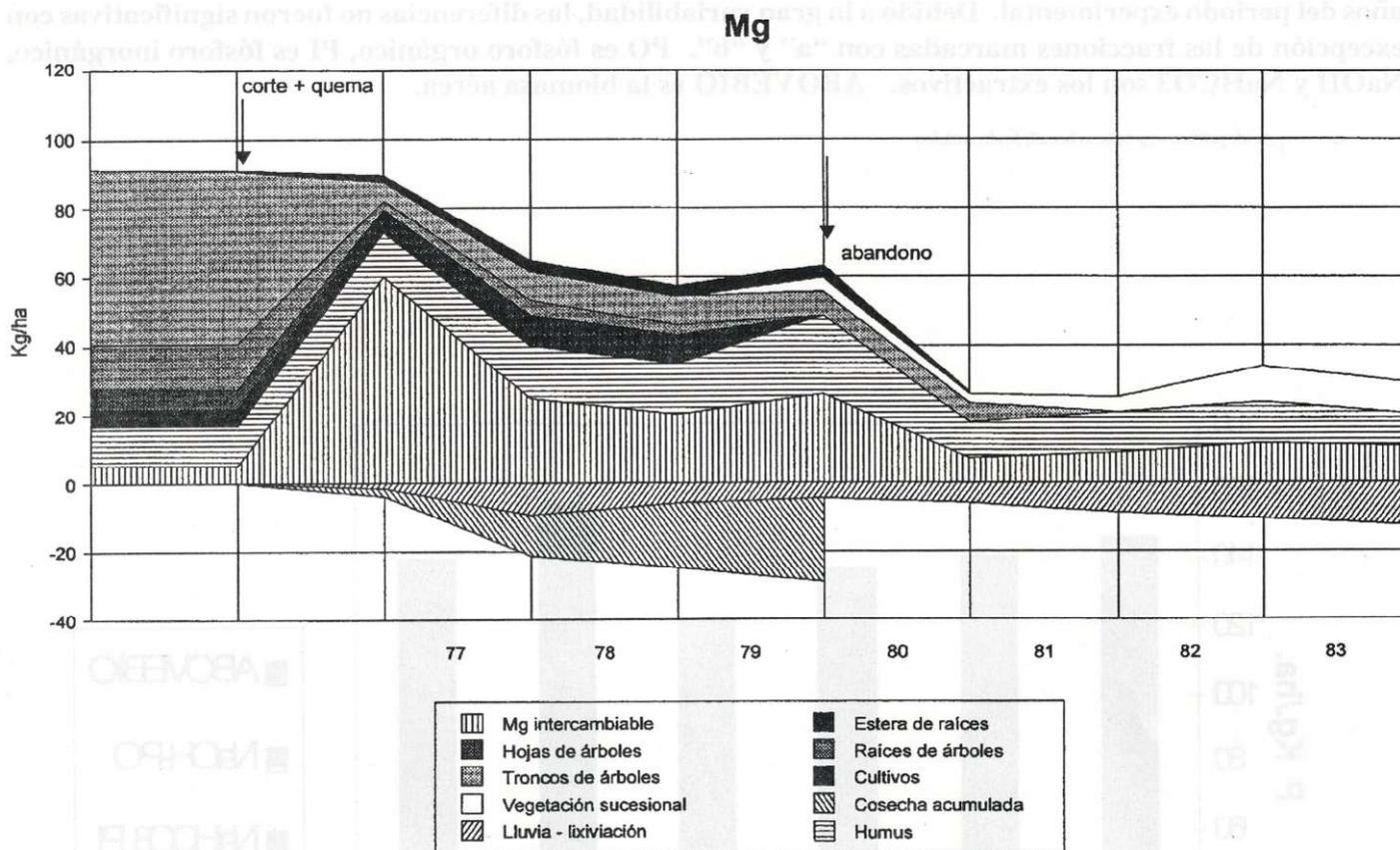
**Figura 2: Existencias y pérdidas acumulativas de calcio en función del tiempo en la parcela experimental de San Carlos de Rio Negro, Venezuela.**



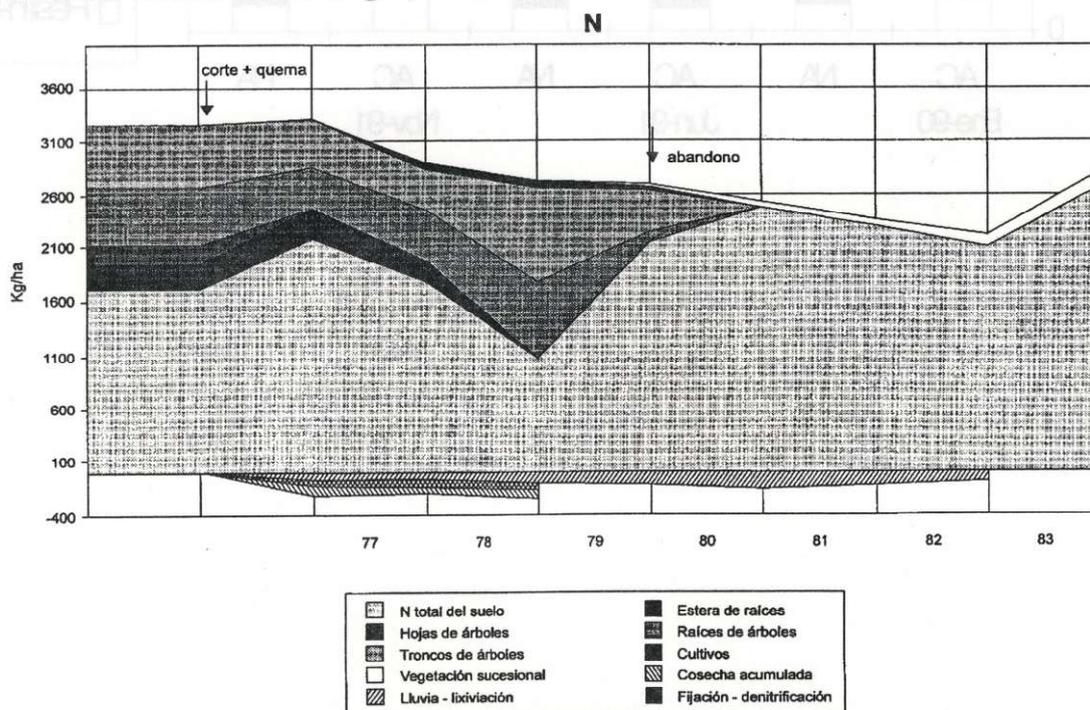
**Figura 3: Existencias y pérdidas acumulativas de potasio en función del tiempo en la parcela experimental de San Carlos de Rio Negro, Venezuela.**



**Figura 4: Existencias y pérdidas acumulativas de magnesio en función del tiempo en la parcela experimental de San Carlos de Rio Negro, Venezuela.**



**Figura 5: Existencias y pérdidas acumulativas de nitrógeno en función del tiempo en la parcela experimental de San Carlos de Rio Negro, Venezuela.**



**Figura 6: Existencias de fósforo lábil en fracciones de suelo de los 75 cm superiores y en la biomasa aérea en un sistema experimental de cultivo en callejones (AC), y en un control de monocultivo de sorgo (NA). Hay una tendencia de incrementos de diferencias graduales entre los dos sistemas a lo largo de los tres años del período experimental. Debido a la gran variabilidad, las diferencias no fueron significativas con excepción de las fracciones marcadas con "a" y "b". PO es fósforo orgánico, PI es fósforo inorgánico, NaOH y NaHCO<sub>3</sub> son los extractivos. ABOVEBIO es la biomasa aérea.**

1 Acido psídico = (p-hidroxi benzil) ácido tartárico

