

## DINÁMICA Y MANEJO DE LA MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS DE SABANAS BIEN DRENADAS

### ORGANIC MATTER DYNAMIC AND MANAGEMENT IN WELL- DRAINED SAVANNA SOILS

Rosa Mary Hernández-Hernández

Instituto de Estudios Científicos y Tecnológicos IDECYT, Universidad Simón Rodríguez.  
correo-e: [rosa.hernandez@unesr.edu.ve](mailto:rosa.hernandez@unesr.edu.ve) Tel-fax: (58)212-6719138

#### RESUMEN

Las sabanas bien drenadas son ecosistemas tropicales que ocupan una gran extensión en el continente Sur Americano y Africano. Ellas, a pesar de sus limitaciones para tal fin, han servido de escenario para la expansión de la frontera agrícola en las últimas décadas, con importantes consecuencias ecológicas, productivas, sociales y económicas. Son extensísimas las áreas de las sabanas neotropicales donde las gramíneas nativas, *Trachypogon*, *Axonopus*, entre otras, han sido sustituidas por especies de gramíneas de origen Africano como las *Brachiarias* y *Andropogon*. Estas pasturas aseguran una mejor oferta forrajera para el ganado en la época de sequía, situación crítica en las sabanas bien drenadas, pero también pueden inducir cambios en la calidad del suelo y en el funcionamiento de los agroecosistemas. Conociendo la mala calidad de los suelos de sabanas tropicales caracterizados por su acidez y su bajo contenido de materia orgánica (MOS), cualquier manejo directo o indirecto que induzca cambios en la cantidad y calidad de las fracciones dinámicas de la MOS, a través de su transformación biológica, adquiere gran importancia, puesto que la MOS define la conservación de C y de nutrientes como N y P potencialmente mineralizables. Algunas propuestas alternativas de manejos agroecológicos en este tipo de sabanas están sustentadas en el manejo de su MOS, pudiendo definir la sostenibilidad del agroecosistema y tener implicaciones ambientales como el secuestro de C, considerando la gran extensión de las sabanas. Los objetivos de este trabajo son discutir la importancia del manejo de la MOS en ecosistemas de sabanas bien drenadas en los Llanos Venezolanos, mostrar los cambios que se producen en las fracciones dinámicas de la MOS, evaluar si por estos manejos de la MOS se producen cambios en la actividad biológica del suelo y en la eficiencia de transformación del C, y determinar que implicaciones tiene la conversión de las sabanas en el secuestro de C.

#### ABSTRACT

Tropical ecosystems of well-drained savannas comprise a great extension of the South American and African continents. Despite their agricultural constraints they have served as the scenario for the expansion of the agricultural frontier in the last decades, with important ecological, productive, social and economical consequences. Extensive areas of neotropical savannas with native grasses, *Trachypogon*, *Axonopus*, among others, have been substituted by grass species of African origin such as *Brachiarias* and *Andropogon*. These pastures assure better cattle forage during the dry season and during critical situations in well-drained savannas, but they can also induce changes in soil quality and agro ecosystem functioning. Given the low quality of tropical savanna soils, characterised by their acidity and low organic matter content (SOM), any direct or indirect management changes in the quantity and quality of SOM dynamic fractions, throughout their biological transformation, is very important as SOM defines C and nutrient conservation of N and P potentially mineralisable. Alternative proposals of agroecological management in this type of savannas, which occupy a great extension, depend on SOM management that defines agroecosystem sustainability and have environmental implications in C sequestration. The objectives of this study are to discuss SOM management importance in well-drained savanna ecosystems of the Venezuelan plains, to show changes in the SOM dynamic fractions, to evaluate if SOM management produces changes in biological soil activity and metabolic transformation efficiency of C, and to determine the implications of savanna conversion on C sequestration.

**Palabras Clave:** Suelos, Materia orgánica, sabanas, biomasa microbiana, fracción macroorgánica, agroecosistemas  
**Keywords:** Soils, Organic matter, savannas, microbial biomass, macroorganic fraction, agroecosystems.

#### INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de manejo de materia orgánica del suelo (MOS) en ecosistemas de sabanas bien drenadas del neotrópico, la primera interrogante que sale a relucir es sobre la

importancia que pudiera tener su manejo, si se conoce de sus bajos contenidos en los suelos de estos ecosistemas neotropicales. Los rangos reportados para este parámetro van de 1 a 3 % en un gran número de trabajos realizados en la región para los ecosistemas no intervenidos (Fisher et al.,

1997; Hernández-Hernández y López-Hernández, 1998; Campos, 1999; Gómez et al., 2009), y valores más bajos se han determinado cuando los ecosistemas han sido convertidos a agricultura intensiva (Trujillo et al., 1998; Hernández-Hernández y Domínguez, 2002). En los Llanos Venezolanos, el 65% de su territorio corresponde a sabanas bien drenadas, y su funcionamiento e impacto producido por la introducción de la agricultura parece diferir poco a lo reportado para sabanas de este tipo en fronteras más lejanas, al menos en los problemas de degradación de suelos, disminución de la productividad e incremento de la frontera agrícola a través de la deforestación (Hernández-Hernández y Domínguez, 2002). En estos ecosistemas los bajos niveles nutricionales, alta fijación del P, al igual que la marcada estacionalidad en la precipitación, que por lo general corresponde con seis meses de intensas lluvias (con ocasionales veranillos) y seis meses de sequía, hacen que igualmente los contenidos de MOS y de los elementos involucrados a la actividad de producción-descomposición, los llamados elementos biógenos (C, N, S), sean muy variables comparados a suelos de otros biomas (Brossard et al., 1997; Chapuis-Lardy et al., 2001). De la misma manera, la actividad biológica se ve afectada por los bajos niveles nutricionales y de MOS, al igual que por la estacionalidad del ciclo lluvia-sequía (Araujo y López-Hernández, 1999; Nethuzhilin et al., 1999).

Por ello es discutido el papel de las fracciones dinámicas de la MOS en ecosistemas de sabana, las cuales pueden actuar como fuente o sumidero de nutrientes potencialmente mineralizables. Estas fracciones tienen diferentes tiempos de retorno y la más activa, la biomasa microbiana, involucra una fuente muy a corto plazo de nutrientes a las plantas, que a su vez es la encargada de la transformación biológica de todos los residuos orgánicos que entran al suelo, y además es un factor importante en la formación y estabilización de agregados, especialmente en suelos de texturas gruesas, propios de las sabanas bien drenadas (Singh y Singh, 1995; Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002a). Dada sus características, la biomasa microbiana es muy sensible a los cambios climáticos contrastantes típicos de las sabanas bien drenadas, e igualmente es sensible a los manejos agrícolas que se aplican en dichos ecosistemas.

Fracciones de MOS con dinámicas más lentas en el funcionamiento de las sabanas y de los agroecosistemas establecidos, también pueden cumplir roles parecidos, pero serían reservorios de nutrientes a más largo plazo y su estabilidad dependería de factores físicos y químicos del suelo, así como del clima y del manejo agrícola.

En tal sentido cualquier manejo que lleve a cambiar la cantidad y la calidad de estas fracciones de la MOS pudiera tener injerencia en la disponibilidad a lo largo del tiempo de nutrientes como N y P, elementos limitantes en los suelos de sabanas, y especialmente en momentos claves de los agroecosistemas que se establecen en las sabanas bien drenadas. De este manejo puede depender la sostenibilidad de los mismos, e inclusive como están involucradas fracciones de C que sirven de reservorio, sus cambios pudieran tener implicaciones en el secuestro de este elemento en el suelo.

Con este ensayo se hace una revisión de resultados de sabanas de los Llanos Venezolanos que indican como se pueden afectar las fracciones de la MOS en agroecosistemas establecidos en sabanas bien drenadas, donde se usan la labranza convencional o la siembra directa, coberturas asociadas y alternativas de fertilización fosforada para la producción de cereales, o agroecosistemas conformados por monocultivos de pinares. La discusión de los mismos pueden dar una visión de la importancia del manejo de la MOS en estos ecosistemas, sus implicaciones ecológicas, productivas y por tanto sus consecuencias sociales y económicas en las comunidades que viven de la explotación agrícola de las sabanas.

#### **FRACCIONES DINÁMICAS DE LA MATERIA ORGÁNICA**

Entre los parámetros biológicos más estudiados y aceptados como un buen indicador de calidad del suelo está la materia orgánica del suelo (MOS); una mezcla de compuestos orgánicos de diferentes orígenes que tienen distintas tasas de recambio y que se relaciona en forma distinta con las partículas del suelo (Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002b). La MOS cumple importantes funciones en el suelo relacionadas con su fertilidad, estabilidad estructural y condición

hídrica, aspectos que son definitivos en la sostenibilidad de los sistemas productivos y en el funcionamiento de los ecosistemas naturales. En el caso de los ecosistemas de sabanas bien drenadas de los Llanos Venezolanos sus valores son críticos, extremadamente bajos, donde autores como Gómez et al. (2009) reportan niveles menores de 1% en el caso de los Llanos Orientales y Hernández-Hernández et al. (2004) valores de 1,2 % en los Llanos Centrales.

Existen diversas formas de evaluar la composición de la MOS. Cuando queremos entender el funcionamiento de los ecosistemas y monitorear la sostenibilidad de los agroecosistemas que son establecidos en un determinado ambiente ecológico, una de las aproximaciones más útiles es considerar la MOS en sus fracciones dinámicas. En ese sentido, Theng et al. (1989) han coincidido en establecer fracciones lábiles y estables, cuya diferencia principal está basada en la tasa de descomposición y el tiempo de recambio. Los constituyentes lábiles de la MOS, conformados por fracciones activas y lentas, poseen tasas de descomposición rápidas y tiempos de recambio cortos, mientras que las fracciones más estables pueden permanecer en el suelo por largos períodos de tiempo (Figura 1).

Se considera fracción activa de la MOS a la biomasa microbiana, la cual es transformada completamente en término de días a meses (Figura 1). La biomasa microbiana es considerada el motor del suelo y por consiguiente del funcionamiento de los agroecosistemas y ecosistemas tropicales, pues es la encargada de la transformación de todos los residuos orgánicos que entran al suelo. En el caso de los suelos de sabana, ella puede actuar como fuente o sumidero de nutrientes importantes que están en condiciones limitantes en suelos de sabana. Estudios tienden a mostrarla como sumidero de C y N, especialmente en la época de lluvia, cuando los cultivos de secano como el maíz son establecidos como sistemas productivos.

La fracción lenta corresponde a la materia macroorgánica, en la cual se incluye la fracción ligera, con un tiempo de recambio que puede variar de meses a años (1 2 años) (Figura 1). La materia macroorgánica puede ser definida como la

fracción del tamaño de las arenas (53 2000  $\mu\text{m}$ ) que consiste principalmente de residuos de plantas y animales identificables en diferentes estados de descomposición y que pueden ser retenidos sobre un tamiz de 250  $\mu\text{m}$ . Dentro de ésta fracción se encuentra contenida la fracción ligera, la cual es obtenida por flotación en agua o en medios líquidos de densidad conocida ( $1.2 \text{ g/cm}^3$ ). Adicionalmente, las sustancias no húmicas que no estén unidas a los minerales del suelo también pueden formar parte del compartimiento lábil de la MOS.

La fracción estable o pasiva está constituida por el humus, que incluye principalmente las sustancias húmicas, las cuales tienen una tasa de descomposición tan lenta que puede tardar de años a siglos (Figura 1) (Cambardella y Elliot, 1994; Hassink, 1995; Bolinder et al., 1999; Bending et al., 2000; Whalen et al., 2000; Accoe et al., 2004; Espinoza, 2004). También se incluyen aquellas macromoléculas orgánicas que son resistentes en forma intrínseca al ataque microbiano o que se encuentran físicamente protegidas, bien sea, por adsorción sobre la superficie mineral o atrapadas dentro de los agregados. En este sentido, la dinámica de la MOS depende en gran medida no solo del tipo de estructuras químicas que la conforman si no de sus asociaciones en la matriz del suelo.

Debido a sus tiempos de recambio y a su sensibilidad, las fracciones activas o lábiles (biomasa microbiana) y lentas (fracción ligera) han sido considerados como buenos indicadores del impacto que tienen algunas prácticas de manejo sobre la calidad del suelo, en comparación al contenido de materia orgánica total, cuyos cambios se manifiestan más lentamente (Hassink, 1995; Barrios et al., 1996; Bending et al., 2004). Este aspecto es relevante en suelos de sabanas bien drenadas debido a su bajo contenido de MOS, por lo cual se necesitan indicadores sensibles y tempranos del cambio que pudiera ocasionarse en la calidad de sus suelos, al establecerse cualquier tipo de agroecosistema, ya que por su precaria condición de fertilidad pudieran ser más rápidamente susceptibles al impacto ocasionado por el cambio de uso del ecosistema.

## MANEJOS DE SUELOS DE SABANAS BIEN DRENADAS EN LOS LLANOS VENEZOLANOS

### *Factores que afectan las sabanas. Características ecológicas, edáficas, climáticas:*

Las sabanas bien drenadas de los Llanos Venezolanos (Figura 2) presentan varias condiciones ecológicas que hacen que su productividad primaria sea baja (Sarmiento, 1983). Por un lado, experimentan anualmente estrés severo de sequía por cuatro a seis meses y sufren seis meses de intensas lluvias (con ocasionales veranillos). Estas lluvias tienen alto poder erosivo y a pesar que las sabanas pueden tener poca pendiente, son elevados los niveles de arrastre de sedimentos (Lozano et al., 2000). Por otra parte, la vegetación está dominada por pastizales que presentan un sistema fotosintético de tipo C4, tales como *Trachypogon*, *Andropogon*, *Leptocoryphium*, *Axonopus*, *Paspalum*, *Panicum*, *Aristida*, *Echinolaena* y *Tristachia*, gramíneas con bajos niveles nutricionales en sus tejidos. Íntimamente ligado a estos factores, los suelos son de texturas gruesas, con rápido movimiento interno de agua, son ácidos, con altos contenidos de sesquióxidos de hierro y aluminio, baja CIC y bajo contenido de nutrientes, especialmente el P y N. Estas condiciones determinan la dinámica de los contenidos de MOS y de sus fracciones, además que los elementos involucrados a la actividad de producción-descomposición como el C, N y el S, sean muy variables comparados a suelos de otros biomas. De la misma manera, la actividad biológica de la meso y microfauna y la de los microorganismos, se ve afectada por los bajos niveles nutricionales y de MOS, al igual que por la estacionalidad del ciclo lluvia-sequía (Araujo y López-Hernández, 1999; Nethuzhilin et al., 1999).

Resultados no publicados por Hernández-Hernández y colaboradores, haciendo una evaluación de la potencialidad biológica de los suelos de sabanas, especialmente la relacionada con la fracción activa de la MOS, la biomasa microbiana, muestran como *Bowdichia virgilioides*, que es una leguminosa, produce una MOS más fácilmente metabolizable, con una mayor biomasa microbiana, que resulta más eficiente en el uso del C, generando una mayor

disponibilidad de nutrientes a largo plazo por presencia de proteínas y compuestos amino-orgánicos, que la producida por los otras dos especies de árboles típicos de estas sabanas *Curatella americana* y *Birsonima crassifolia*, y de la gramínea dominante *Trachypogon plumosus*, las cuales, producen valores menores de MOS (40% con los árboles y 20% menos con la gramínea) y de biomasa microbiana (60% con los árboles y 20% menos con la gramínea), los microorganismos son menos eficientes por disponer de un material más difícilmente de metabolizar (coeficiente de mineralización de C alrededor de un 20% más bajo).

### *Manejos productivos y alternativos:*

Dadas las características ecológicas mencionadas, la principal forma de manejo de estos ecosistemas ha sido la ganadería extensiva, aproximadamente 1 animal por cada 10 ha (Birbe et al., 2002), donde la quema se ha constituido en una práctica frecuente para la producción de rebrotes que permiten una leve mejoría en la oferta de nutrientes y tejido palatable para el ganado. Sin embargo, este sistema de producción ha sido intensificado en las décadas recientes a través de la introducción de gramíneas exóticas tales como *Brachiaria decumbens*, *B. brizantha*, *B. humidicola*, *B. dictyoneura*, *Panicum maximum*, *Digitaria swazilandensis* y *D. decumbens*, entre otras. También han sido introducidos nuevos cruces de ganado, así como especies de cultivo tales como sorgo (*Sorghum bicolor*), maíz (*Zea mays*), frijoles (*Phaseolus vulgaris*) y algunas frutas como patilla (*Citrullus lanatus*), y a nivel de especies forestales, grandes extensiones de sabanas bien drenadas han sido sustituidas por bosques de pino (*Pinus caribbea*), eucalipto (*Eucalyptus spp.*) y teca (*Tectona grandis*). Muchas de estas prácticas han estado basadas en una intensa mecanización, con altas dosis de fertilizantes y agroquímicos estimuladas por políticas de subsidio gubernamentales (López-Hernández y Ojeda, 1996; Lopes et al., 1999).

La utilización de manejos altamente tecnificados se ha reflejado en una mejora significativa en los niveles de producción tanto de

cultivos como en los pastos introducidos; sin embargo, con el devenir de los años se ha evidenciado un rápido e intenso deterioro de los suelos de estas sabanas, que se refleja principalmente en sus propiedades físicas (compactación, erosión), en sus propiedades químicas, especialmente por el impacto en la disminución de la MOS, señalada en más de un 20%, ocasionando desarreglos nutricionales y toxicidades (Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002b), y en las no menos importantes propiedades biológicas del suelo, relacionadas con el desarrollo de la biomasa de organismos y de sus actividades (Campos, 1999). En términos ecológicos los mayores impactos se han enfocado hacia una pérdida de la biodiversidad y a fuertes emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Rondón et al., 2006), y en términos productivos; a la degradación o pérdida de producción de los pastos introducidos e invasión de malezas (Boddey et al., 1996), afectando la oferta de calidad de forraje al ganado, así como a la disminución de la productividad de los cultivos.

Más recientemente y por diversos motivos de origen económico, político y ambiental se han venido desarrollando investigaciones y desarrollos productivos alternativos que colindan con los principios de la agroecología, con el interés de desarrollar sistemas productivos sostenibles bajo las condiciones agroecológicas de las sabanas bien drenadas, y cumplir con los propósitos de soberanía y seguridad alimentaria. Entre estas alternativas tenemos: Pastos mejorados, siembra directa con coberturas vivas, asociación de cultivos y coberturas perennes (gramíneas y leguminosas), fertilización biológica y otras más amigables con el ambiente, rotación leguminosa cereal, sistemas agrosilvopastoriles, rotación de potreros, banco de leguminosas nativas, uso de estiércoles y otros abonos orgánicos. Con este tipo de manejos se busca incrementar la conservación de la MOS y de nutrientes, conservar los ecosistemas, incrementar la biodiversidad y hacer los procesos ecológicos y biológicos del agroecosistema más parecidos a los del ecosistema natural. Las propuestas bajo esta visión, necesariamente están basadas en el abordaje interdisciplinario y transdisciplinario del problema, y para que realmente la implementación

de estos agroecosistemas sea efectiva, deben estar implicadas activamente las asociaciones de productores y las comunidades agrícolas de la región.

### **CAMBIANDO LOS MICROAMBIENTES EN LA MATRIZ DEL SUELO DE SABANAS BIEN DRENADAS Y LAS FRACCIONES DE MATERIA ORGÁNICA**

El suelo puede ser considerado como un sistema que contiene en su matriz una fase sólida, conformada por las partículas y agregados del suelo, una fase líquida, que comprende los microporos que implican el movimiento de agua y una fase gaseosa, comprendida por los macroporos que permiten el movimiento de aire, con importantes gases como el oxígeno y otros gases atmosféricos (Figura 3). En este microambiente, viven e interactúan los microorganismos y sus depredadores, la fauna del suelo. Se establecen relaciones de competencia intra e interespecífica, es decir se establecen todo tipo de relaciones entre los organismos vivos y entre ellos y su medio ambiente, fluyendo los nutrientes y la energía a partir de la disponibilidad de recursos, especialmente orgánicos, dados por el aporte de entradas orgánicas de origen vegetal y animal, que finalmente viene a conformar la MOS. Bajo esta óptica podemos entender los cambios que se suceden en un suelo arenoso bien drenado con escaso contenido de MOS, como sucede en los suelos de sabanas, cuando estos son sometidos algún tipo de mecanización o manejo que implique el cambio de los microambientes donde se desarrollan las poblaciones microbianas.

En los suelos arenosos, los factores biológicos son determinantes en su funcionamiento, especialmente en los procesos de estructuración y estabilización. Son más sensibles a los manejos porque responden rápidamente a una mayor actividad biológica, a la disminución de la aireación por compactación, o a la adición de materia orgánica. Así mismo dada su facilidad para el movimiento de agua, son más propensos a los efectos de estrés hídrico por la estacionalidad climática. En este sentido cualquier manejo que lleve a los cambios de estos microambientes y de los microorganismos, llevará a efectos positivos o

negativos en la calidad de los suelos de las sabanas y a la sostenibilidad de los agroecosistemas establecidos en estas condiciones.

***La siembra directa vs. la labranza convencional:***

Uno de los manejos que puede incidir fuertemente en lo señalado es la labranza, puesto que dependiendo de su intensidad y el tipo de suelo se logra un mejor contacto residuo-suelo, se fracturan o no los terrones de suelo, se airea o se compacta el suelo, se estratifican o no los residuos y la actividad biológica en el perfil de suelo, en fin, la labranza puede servir de eje transformador del funcionamiento del agroecosistema (Oades, 1993; Six *et al.*, 2000; Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002b). Por estas razones los cambios en las propiedades físicas del suelo por el tipo de labranza no pueden desligarse de los cambios producidos en el contenido de la materia orgánica (Elliott, 1986) y de sus fracciones (Hendrix *et al.*, 1986; Follet y Schimel, 1989; Bremer *et al.*, 1995; Hassink, 1995; Six *et al.*, 2000; Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002a).

En las sabanas es importante dilucidar los mecanismos de funcionamiento del suelo en relación a las fracciones de la materia orgánica y de la estructura del mismo, especialmente en suelos de sabanas bien drenadas, cuyas características estructurales son escasas y dependen de factores biológicos para su formación y estabilización. Estudios en sabanas bien drenadas de los Llanos Centrales Venezolanos (Hernández-Hernández y López-Hernández 2002b, Hernández-Hernández *et al.* 2004) evidenciaron como la labranza disminuyó en más de un 20% la MOS (Cuadro 1), sin embargo este proceso pudo revertirse cuando se introdujo la siembra directa como manejo para la siembra del maíz-sistema donde una máquina especial fertiliza y siembra directamente la semilla sin arar el suelo, lográndose un aumento del 8% respecto al suelo de sabana, lo cual fue significativo si se considera que este suelo había sido previamente manejado con labranza convencional por más de una década. Gran parte de estos cambios ocurrieron en las fracciones dinámicas de la MOS, especialmente en la materia macroorgánica y la físicamente protegida, fracción

que en este suelo es muy importante mantener, dado que sus macroagregados son muy estables al agua. El uso de la siembra directa incrementó en más de un 30% esta fracción de agregados y por tanto aumentó la MOS protegida físicamente en los agregados, a su vez este sistema de labranza promovió una mayor estabilidad de los agregados a los drásticos cambios de humedad-sequía en el suelo propio de los ecosistemas de sabanas estacionales bien drenadas (Hernández-Hernández *et al.*, 2000) (Figura 4). Otros estudios sobre el efecto de la labranza muestran resultados parecidos en otros tipos de ecosistemas (Elliot, 1986).

***Mejorando el sistema de siembra directa con coberturas vivas:***

En el camino de la conversión de las sabanas bien drenadas a sistemas productivos que aborden los principios de la agroecología, donde uno de los más importantes es el incremento de la biodiversidad, se han hecho propuestas para mejorar el sistema de siembra directa para el cultivo del maíz, usando coberturas perennes de diferente calidad, leguminosas y gramíneas, asociadas al maíz (Hernández-Hernández *et al.*, 2004). El objetivo de este manejo consiste en la combinación de la siembra directa y el establecimiento de coberturas vivas (gramíneas y leguminosas) que mejoran las condiciones físicas del suelo, al reducir las pérdidas de mismo debido a la erosión y a su vez optimizar sus condiciones químicas y biológicas, al servir los residuos de estas coberturas como entradas orgánicas y fuente de nutrientes para el crecimiento del maíz. Finalmente la combinación de residuos de maíz y de coberturas puede ofrecer una mejor oferta forrajera para el ganado en la estación de sequía, época crítica para la producción animal.

La aplicación de este tipo de manejos durante cuatro años, trajo notables cambios en suelos arenosos de sabanas, los cuales estuvieron determinados por el tipo de cobertura perenne utilizada, la leguminosa, *Centrosema macrocarpum*, y la gramínea *Brachiaria dyctioneura*, quienes tenían diferencias en su estructura fisionómica, en la rizodeposición y en la calidad de residuos superficiales aportados. Según Padrino y Hernández-Hernández (2004) la

leguminosa con una raíz pivotante, tenía más compuestos de más difícil descomposición microbiana como lignina y polifenoles, especialmente en sus raíces, ratificado por una tasa de descomposición más lenta de su necromasa, por la cual se liberaba más lentamente la mayor cantidad de N que tenía en sus tejidos. La MOS originada por esta cobertura resultó más recalcitrante, al tener más proporción de ácidos húmicos con respecto a los fúlvicos (Lozano et al., 2002) (Cuadro 3). Todo ello generó que después de cuatro años, contrario a lo que se esperaba, la leguminosa incrementó junto con la siembra directa, la MOS en un 40% con respecto al suelo de sabana, un 20% más de lo que lo hizo la gramínea con una mayor proporción de compuestos más fácilmente metabolizables y una mayor biomasa de raíces fibrosas (Cuadro 3). Según Hernández-Hernández y Ruiz (2007), una MOS más recalcitrante producida con la leguminosa favoreció a la microagregación y a la protección física de la MOS, lo cual significó una permanencia más duradera de nutrientes especialmente de N y P en sus formas orgánicas, por el contrario, la gramínea favoreció la acción de agentes temporales para la macroagregación (Cuadro 4), como las raíces y una biomasa microbiana menos eficiente en el uso del C, además produjo más materia macroorgánica libre (Fracción lenta de MOS) que puede perderse con los procesos de erosión y el agua de escorrentía, especialmente en la época de lluvia. Desde el punto de vista funcional y productivo la leguminosa resultó ser una mejor asociación para el maíz, porque produjo cambios positivos desde el punto de vista bioquímico y físico que favoreció al cultivo del maíz en estos suelos pobres arenosos, con escasa estructura y muy baja fertilidad.

Datos no publicados de Hernández-Hernández y colaboradores muestran que el efecto de la leguminosa en mejorar la protección física de la MOS, se ve favorecida por el uso de fertilizantes de liberación más lenta del P como la roca fosfórica; alrededor de un 10% más respecto al uso de esta leguminosa con fertilizantes más rápidamente soluble como el fosfato diamónico. En cambio el efecto de la misma roca fosfórica usada con la gramínea se manifiesta en incrementar la producción de MOS particulada libre, la cual

está sometida a un alto riesgo de pérdida por erosión. No obstante en los suelos arenosos de sabana, sigue siendo la protección química de la MOS en los minerales de arcilla, el principal mecanismo de protección alcanzando aproximadamente un 50% de importancia relativa con respecto al mecanismo de protección física y al material no protegido.

### **¿SE PRODUCE UN CAMBIO DE ESTRATEGIA DE LA ACTIVIDAD DE LA BIOMASA MICROBIANA EN AGROECOSISTEMAS DE SABANAS BIEN DRENADAS?**

La biomasa microbiana cumple un rol fundamental en la transformación de los residuos orgánicos que entran al suelo, ya sean los provenientes de la biomasa aérea como de la rizo deposición, pudiendo actuar como fuente o sumidero de nutrientes potenciales a ser usados por las plantas (Figura 5). Esta fracción activa de la MOS es muy sensible a cualquier cambio que ocurra en la matriz del suelo, ya sea por cambio en la relación de los espacios de aire y agua, por acceso al material orgánico que puede ser metabolizado y biosintetizado en nueva masa microbiana, por la calidad de este material orgánico y por la acción de organismos depredadores que controle el tamaño de sus poblaciones. En consecuencia, la biomasa microbiana ha sido señalada como un indicador de suelo muy sensible a los cambios por manejo, pero que también es muy sensible a las variaciones de humedad del suelo ocasionadas por los cambios estacionales del clima. Ambos factores, los naturales y los ocasionados por el hombre, alteran las poblaciones de microorganismos del suelo, su estructura comunitaria, sus actividades y la eficiencia como son metabolizados los compuestos de C, lo cual pudiera llevar a que la biomasa microbiana actúe como fuente de nutrientes en determinadas situaciones, como sumidero de nutrientes en otras.

Dentro de esta óptica, se ha discutido el rol de la biomasa en los ecosistemas de sabanas. Autores como Gómez et al. (2008), han mostrado como en la época de lluvia se produce un incremento de la biomasa microbiana, por lo cual actúa como un reservorio temporal de nutrientes para la planta, que si bien por cortos lapsos de tiempo los

nutrientes no estarían del todo disponibles para la plantas, es posible conservarlos en el suelo del riesgo de pérdida que significa el lavado por las fuertes lluvias y las potenciales pérdidas de N por lixiviación en suelos de texturas gruesas. Sin embargo otros autores Singh y Singh (1995), han encontrado lo contrario; que la biomasa microbiana es mayor en la época seca y menor en la de lluvia, actuando en la época de mayor desarrollo de biomasa en las plantas de la sabana como una fuente de nutrientes potencialmente mineralizables. Al parecer estos cambios dependen del tipo de vegetación predominante, de las condiciones del suelo y del clima. En todo caso, lo que se ha visto en sabanas naturales bien drenadas de los Llanos Venezolanos es que la biomasa microbiana, que está actuando como sumidero de nutrientes, al tener mayor desarrollo de sus poblaciones, cambia su rol cuando se introducen cultivos como el maíz o pastos y las especies de *Trachypogon*, poco demandantes de nutrientes del suelo, desaparecen. En este nuevo escenario la biomasa microbiana tiene un papel de fuente de nutrientes en la época de lluvia, alcanzando menores valores que en la sabana natural, aún cuando estos suelos pudieran estar enriquecidos con algún tipo de fertilizantes. Al parecer factores de competencia con plantas muy demandantes de nutrientes, en estos suelos tan pobres, afectan negativamente al desarrollo de los microorganismos (Figura 6).

### ***Reservas potenciales de materia orgánica lábil y eficiencia de metabolización de C:***

La biomasa microbiana y la eficiencia de sus actividades en la transformación de los residuos orgánicos que entran al suelo, pueden variar sensiblemente según el manejo. Varios estudios realizados en sabanas bien drenadas de los Llanos Venezolanos destacan cómo algunos tienden a favorecer más que otros, las fracciones lábiles de la MOS (Güerere, 1992; Campos, 1999; Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002b; Hernández-Hernández et al., 2004). En el cuadro 4 se muestran resultados de diferentes índices metabólicos de la eficiencia de uso del C por los microorganismos para su biosíntesis, y de las fracciones lábiles como la biomasa microbiana y la fracción macroorgánica de los principales manejos

que se han venido desarrollando en las sabanas bien drenadas de los Llanos Venezolanos. Entre los manejos surge como promisorio para estos ecosistemas la siembra directa como sistema de labranza, puesto que incrementa las fracciones lábiles de MOS. Con este manejo se alcanzan los mayores valores de biomasa microbiana, y con la materia macroorgánica, los tenores son muy similares a los del monocultivo de Pinos, plantación muy extendida hacia los Llanos Orientales Venezolanos, donde por el contrario, la biomasa microbiana de sus suelos es comparativamente muy baja y la materia macroorgánica comprende un 50.95% del Ct. Considerando los índices metabólicos, los pinares generan un tipo de material orgánico que no favorece la actividad microbiana, evidenciado por los bajos valores de respiración y coeficiente de mineralización. Por otro lado, un manejo muy aceptado y utilizado en estos ecosistemas son los pastos mejorados, cuya MOS tiende a ser más fácilmente metabolizable (altos coeficientes de mineralización e inmovilización de C), lo cual se traduce en una mayor biomasa microbiana ( $0.11 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). El uso de leguminosas genera en estos suelos una biomasa microbiana poco eficiente en el uso del C (comparativamente mayores coeficientes metabólicos), lo cual indica que más C es mineralizado por unidad de biomasa microbiana sintetizada, y hay entonces mayor tendencia a la mineralización de la MOS.

De esta evaluación comparativa pareciera que lo más indicado para el manejo agroecológico de los ecosistemas de sabanas bien drenadas, es ir hacia el uso de la siembra directa, la biodiversificación de los cultivos, rotando o asociando leguminosas y gramíneas, e incluir especies arbustivas o arbóreas pero distintas a los pinares. Con esta biodiversificación se pretende una transformación más eficiente de la MOS y del ciclado biológico de nutrientes, especialmente los más limitantes en estos suelos, que permitan una mayor conservación temporal de formas minerales de nutrientes en momentos claves de riesgos de pérdida por erosión o lixiviación, como en la estación lluviosa, y una mayor disponibilidad a las plantas en momentos claves del desarrollo de los cultivos.



## **LAS CONVERSIONES DE LAS SABANAS BIEN DRENADAS Y EL SECUESTRO DE CARBONO**

Dentro del tema que nos arropa actualmente, referente al cambio climático y la generación de tecnologías que permitan la disminución de la emisión de gases invernaderos, así como de la importancia del suelo en los diferentes biomas del mundo como sumidero de C, se discute el papel de los ecosistemas de sabanas y especialmente de los manejos que pudieran darse en los mismos que contribuyan al secuestro de C en sus suelos. De la revisión de Rondón et al. (2006) sobre diferentes estudios realizados en estos ecosistemas se evidencia que puede haber escenarios interesantes, que podrían suscitarse de las conversiones agroecológicas que se están dando en la actualidad o en un futuro cercano.

Según estos autores, conociendo las bondades de la siembra directa para el aumento de C en el suelo, si todos los cultivos actuales en los Llanos pueden ser transformados en sistemas de siembra directa, esto podría resultar en un incremento adicional al actual de 5 Tg C en las reservas de C en el suelo. La intensificación esperada, que ocurra en la región, en las próximas dos décadas nos lleva a un adicional de 2 Mha convertidas a agricultura. Asumiendo que la siembra directa puede ser capaz de incrementar el C del suelo por 4 Mg C ha<sup>-1</sup> en relación a las sabanas (Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002b), y que las nuevas tierras son manejadas usando las prácticas conservacionistas, esto puede resultar en un adicional de 8 Tg C que es secuestrado en los suelos. Proyecciones de incrementos en la reserva de C asociada con cultivos, parece, de esta manera, ser modestas en los Llanos.

Se espera que el área bajo plantaciones forestales crecerá establemente a una tasa promedio de 0.05 Mha por año. Con los datos disponibles actualmente, no hay indicios que ocurran cambios netos en las reservas de C en el suelo producto de la expansión de plantaciones de árboles. Sin embargo, las plantaciones de árboles tienen la ventaja que cantidades significativas de C pueden ser acumuladas en la biomasa de árboles, cuando son comparadas con otros sistemas de usos de la tierra.

Una oportunidad importante para el secuestro de C en la región, descansa en la restauración de pasturas degradadas, en el área de establecimiento de nuevas asociaciones de gramíneas-leguminosas y en pasturas para incrementar la ganadería intensiva. Con la expansión actual está visto que parte de las 3 Mha de nuevas tierras serán convertidas en pasturas en las próximas 2 décadas. Esto resultaría en aproximadamente 148 Tg C secuestrado en el suelo. Si la intensificación de la ganadería ocurre de la conversión de parte de las sabanas a pasturas, otras áreas de las sabanas podrían ser protegidas del fuego a través de políticas e incentivos apropiados. Esto podría acelerar la recolonización de vegetación leñosa con ganancias potencialmente altas de C en la biomasa; en el rango desde 1 Mg C ha<sup>-1</sup> por año (San José et al., 2003) a 8 Mg C ha<sup>-1</sup> por año (Güerere, 1992), dependiendo de la cobertura de vegetación original. Esta posibilidad es, sin embargo, más remota, puesto que se requerirían ulteriores estrategias de manejo para proteger la vegetación del fuego, al menos durante el año inicial. Los análisis actuales están basados en la suposición que el área bajo bosques de galerías continuará inafectada. Esto es deseable por varias razones; desde la preservación de la biodiversidad endémica que se encuentra en tales áreas, hasta el mantenimiento de altos niveles de MOS. Es improbable que cualquier alternativa del uso de la tierra pueda incrementar los niveles de C en el suelo hasta los niveles de los bosques de galerías, los cuales son muy importantes para moderar los ciclos hidrológicos en los Llanos; de esta manera el gobierno debe orientarse a su preservación.

El establecimiento de sistemas agroforestales ha sido muy lento en los Llanos y se requieren grandes labores para estas actividades, que podrían limitar, probablemente, las áreas que pueden ser convertidas en un futuro cercano. Las plantaciones de palma aceitera son alternativas promisorias para la expansión de los sistemas agroforestales. Sin embargo, se espera que los árboles jueguen un papel central en el futuro desarrollo de los Llanos. La introducción de sistemas silvopastoriles ofrece probablemente las opciones más beneficiosas para mejorar el C en el sistema, por una combinación de la acumulación de C tanto en el suelo como en la biomasa.

El potencial máximo de los Llanos para el secuestro de C en los suelos, resultaría de una conversión total de la tierra disponible en pasturas mejoradas. Esto pudiera generar teóricamente un incremento total de las reservas de C en el suelo de cerca de 1.02 Pg C. Se esperaría, según las tendencias actuales, en el desarrollo de los Llanos, que puedan ser añadidos, aproximadamente, unos 160 Tg C a las reservas de C en el suelo en los próximos 20 años, sin embargo el costo ecológico en términos de biodiversidad es indeseable.

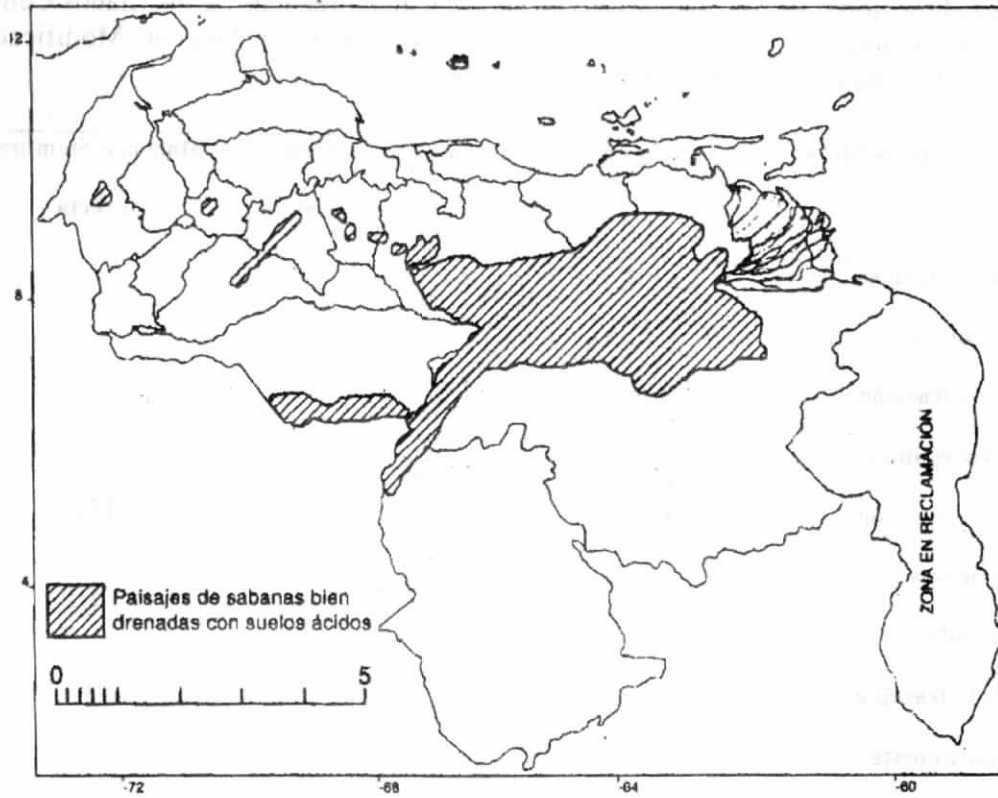
## CONCLUSIONES

Las sabanas neotropicales bien drenadas son ecosistemas que están siendo utilizados intensivamente para el desarrollo de sistemas productivos de altos y bajos insumos, constituyendo un espacio de expansión agrícola que disminuye la presión sobre los ecosistemas de bosques tropicales. Visto este panorama, y la fragilidad de estos ecosistemas, es necesario promover el desarrollo de manejos agroecológicos adaptados a las condiciones ecológicas de las sabanas que permitan un uso sostenible de los mismos. Surge entonces como prioritario, el manejo de la materia orgánica de sus suelos, que

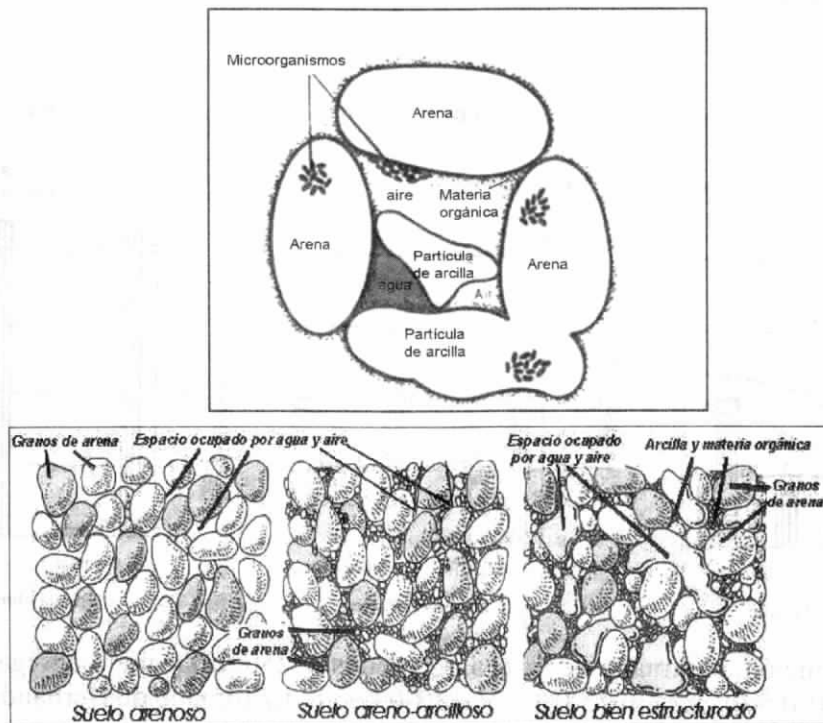
lleven a incrementos de la misma especialmente de las fracciones que tienen nutrientes potencialmente mineralizables a corto y mediano plazo. Las alternativas más promisorias deben estar en consonancia con la biodiversificación de los sistemas de producción, con el fin lograr un uso más eficiente de los nutrientes por parte de los cultivos, y simular las condiciones naturales de los ecosistemas tropicales de alta biodiversidad, aún bajo un uso de tierra con fines agrícolas. Las formas de biodiversificar los sistemas productivos pueden ser a una escala espacial o escala temporal, ya sea mediante asociaciones de plantas de diferente interés agrícola y ecológico, ó mediante rotaciones de cultivos, sistemas de descanso, barbechos mejorados. Algunos de estos manejos tienen incluso la potestad de otorgar un papel importante en los agroecosistemas de sabanas de secuestrar C, sin embargo en las políticas de decisión no debe dejar de prevalecer la importancia del mantenimiento de la biodiversidad, aspecto clave en los ciclos biogeoquímicos. Más importante aún es el manejo de la biodiversidad basado en el conocimiento local, cultural, social y productivo, que serían los fundamentos que servirían de pedestal para que la sustentabilidad en los ecosistemas de sabanas dejara de ser una utopía.



**Figura 1.** Fracciones dinámicas de la materia orgánica y tiempos de recambio.



**Figura 2:** Áreas de sabanas bien drenadas en los Llanos Venezolanos.

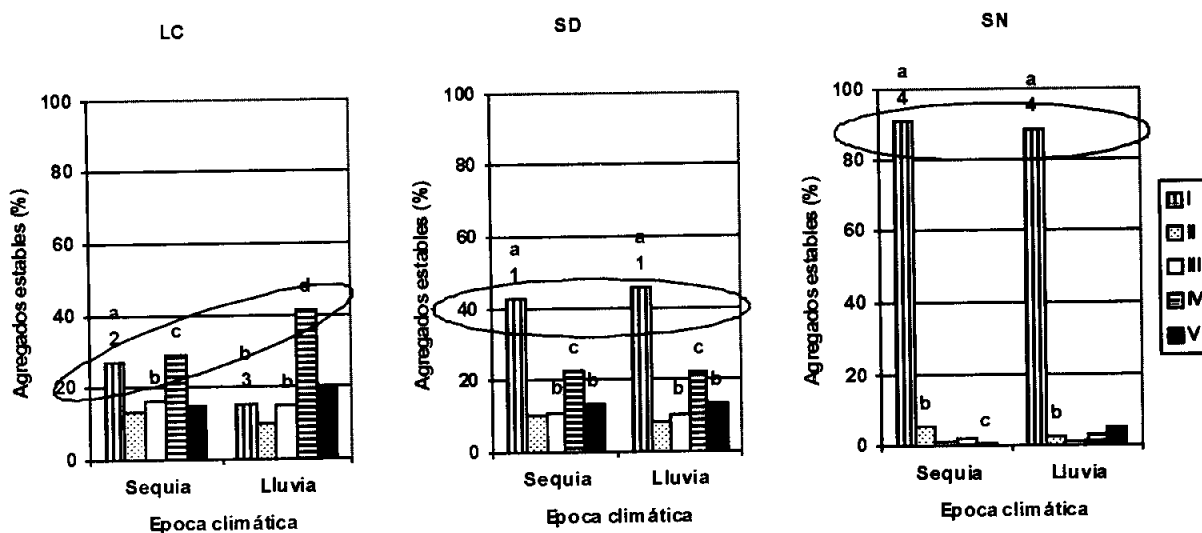


**Figura 3.** El suelo arenoso visto como un microecosistema.

**Cuadro 1.** Fracciones de MOS ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) en sabanas bien drenadas de los Llanos Centrales Venezolanos manejadas con Labranza Convencional y Siembra Directa. Modificado de Hernández-Hernández y López-Hernández (2002b).

Fracciones de MOS	Sabana	Maíz con Labranza	
		convencional	Directa
C de la biomasa microbiana	0.16	0.11	0.15
C de la fracción macroorgánica	0.37	0.07	0.62
C de la fracción físicamente protegida	9.67 *	1.08	4.53
C de la fracción químicamente protegida	0.06 **	0.93	0.49
C total	10.59	7.30	11.44

\*Protegida en macroagregados \*\*Protegida en microagregados



**Figura 4.** Distribución de tamaño de macro agregados ( $>250\mu\text{m}$ ) y microagregados ( $<250\mu\text{m}$ ). (I:4-1, II:1-0.5, III:0.5-0.25, IV:0.25-0.15, V:0.15-0.053 mm) Tomado de Hernández-Hernández et al. (2000).

**Cuadro 2.** Biomasa microbiana y su actividad en macro y microagregados de suelos de sabanas bien drenadas cultivadas con maíz asociado a coberturas perennes y siembra directa. Tomado de Hernández-Hernández y Ruiz (2007).

Coberturas + siembra directa + maíz	Tamaño de agregados	C de la Biomasa microbiana (mg/kg)	CO <sub>2</sub> (mg/kg d)	% de agregados estables al agua
<i>Brachiaria</i>	Ma	60.9	53.1	16.2
<i>dictioneura</i>				
<i>Centrosema</i>	mi	47.3	55.0	2.0
<i>macrocarpum</i>				
<i>Brachiaria</i>	Ma	44.0	36.6	11.5
<i>dictioneura</i>				
<i>Centrosema</i>	mi	24.1	23.3	4.2
<i>macrocarpum</i>				
<i>Brachiaria</i>	Ma	32.8	5.8	17.8
<i>dictioneura</i>				
<i>Centrosema</i>	mi	57.6	11.0	3.2
<i>macrocarpum</i>				

**Cuadro 3.** Carbono total y proporción de fracciones húmicas en suelos de sabanas bien drenadas cultivadas con maíz asociado a coberturas perennes y siembra directa. \*Tomado de Lozano et al. (2004) \*\* Tomado de Hernández-Hernández et al. (2004).

Coberturas + siembra directa + maíz	C total** (Mg/ha)	C ácidos húmicos/C* ácidos fúlvicos	C ácidos húmicos/C* total
<i>Brachiaria</i>	29.8	1.05	0.28
<i>dictioneura</i>			
<i>Centrosema</i>	34.9	1.34	0.26
<i>macrocarpum</i>			
Sabana natural (control)	25.4	1.44	0.27

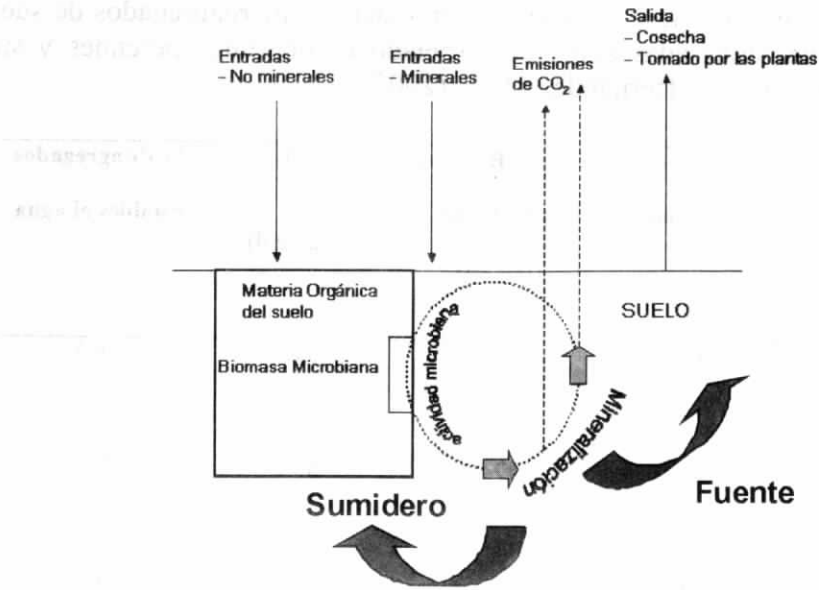


Figura 5. Rol de biomasa microbiana en suelos.

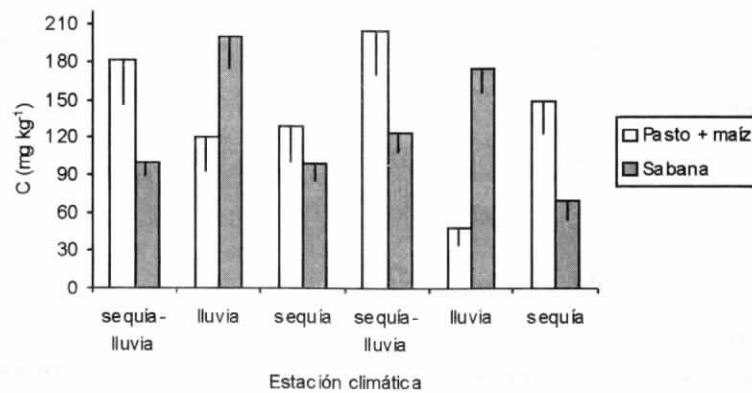


Figura 6. Cambios en la biomasa microbiana en suelos de sabanas cultivados con maíz asociado a pastos. Datos tomados de Hernández-Hernández y col. (2004).

Cuadro 4. Reservas potenciales de MOS lábil (Mg ha<sup>-1</sup>) y la eficiencia de su metabolización.

	Sabana	Barbecho	Maíz+LC	Maíz+SD	Leg.	Pastos	Pinares
C total	6.2 -19.7	8	15.6	19.9	7.7	6.3	7.4
Biomasa microbiana	0.09 - 0.32	0.08	0.20	0.24	0.06	0.11	0.08
Fracción macroorgánica	0.89 - 1.61	0.45	0.23	2.49	0.31	0.34	3.77
Respiración	0.05 - 0.13	0.08	0.28	0.26	0.08	0.12	0.04
Coefficiente mineralización	0.66 - 0.96	1.00	1.79	1.31	1.03	1.90	0.54
Coefficiente metabólico	0.40 - 0.56	1.00	1.4	1.08	1.33	1.09	0.5
Coefficiente de inmovilización	1.62 - 1.73	1.00	1.28	1.21	0.78	1.75	1.08
% de FL/C total	8.17 - 17.11	5.6	1.47	12.51	4.03	5.40	50.95

FL: Fracción ligera. LC: Labranza Convencional. SD: Siembra Directa. Leg: Leguminosas.

## LITERATURA CITADA

- Accoe, F., P. Boeckx, J. Busschaert, G. Hofman y O. Van Cleemput. 2004. Gross N transformation rates and net N mineralization rates related to the C and N contents of soil organic matter fractions in grassland soils of different age. *Soil Biol. Biochem* 36: 2075-2087.
- Araujo, Y. y D. López-Hernández. 1999. Earthworm populations in a savanna agroforestry system of Venezuelan Amazonia. *Biol. Fert. Soils* 29: 413-418.
- Barrios, E., R. J. Buresh y J. I. Sprent. 1996. Organic matter in soil particle size and density fractions from Maite and legume cropping systems. *Soil Biol. Biochem* 28: 185-193.
- Bending, G. D., C. Putland y F. Rayns. 2000. Changes in microbial community metabolism and labile organic matter fractions as early indicators of the impact of management on soil biological quality. *Biol. Fert. Soils* 31: 78-84.
- Bending, G. D., M. Turner, F. Rayns, M. Marx y M. Wood. 2004. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. *Soil Biol. Biochem* 36: 1785-1792.
- Birbe, B., P. Herrera, N. Martínez y O. Colmenares. 2002. Suplementación con bloques multinutricionales y su efecto en la reproducción de hembras bovinas en los llanos centrales de Venezuela. En: *VIII Seminario Manejo y Utilización de Pastos y Forrajes en Sistemas de Producción Animal*. Universidad Ezequiel Zamora (UNELLEZ). pp. 107-122.
- Boddey, R.M., BJR. Alves y S. Urquiaga. 1996. Nitrogen cycling and sustainability of improved pastures in the Brazilian Cerrados. En: *Symposio sobre o Cerrado. 1st International Symposium on Tropical Savannas*. (R.C. Pereira, L.C. Nasser, Eds.). 8° EMBRAPA-CPAC. pp. 33-38.
- Bolinder, M., D. A. Angers, E. G. Gregorich y M. R. Carter. 1999. The response of soil quality indicators to conservation management. *Can. J. Soil Sci.* 79: 37-45.
- Bremer, E., B.H. Ellert y H.H. Janzen. 1995. Total and light-fraction carbon dynamics during four decades after cropping changes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1398-1403.
- Brossard, M., M.L. Lopes, L. Chapuis y A.O. Barcellos. 1997. Estoques de carbono em solos sob diferentes fitofisionomias de Cerrados. En: *Contribuição ao conhecimento ecológico do Cerrado* (L.L. Leite, C.H. Saito, Eds.). Universidad de Brasilia, Brasil. pp. 272-277.
- Cambardella, C. A y E. T. Elliot. 1994. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:123-130.
- Campos, A. 1999. Efecto de la siembra de *Pinus caribaea* L. en fracciones de materia orgánica de un suelo de sabana, Uverito-Estado Monagas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 84 pp.
- Chapuis-Lardy, L., M. Brossard y H. Quiquampoix. 2001. Assessing organic phosphorus status of Cerrado oxisols using <sup>31</sup>P NMR spectroscopy and phosphomonoesterase activity measurement. *Can. J. Soil Sci.* 81: 591-601.
- Elliott, E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 627-633.
- Espinoza, Y. 2004. Calidad de la material orgánica bajo diferentes prácticas de manejo en un suelo ácido tropical. *Revista de la Facultad de Agronomía - LUZ.* 21:126-140.
- Fisher, M.J., R.J. Thomas y I.M. Rao. 1997. Management of tropical pastures in acid soils savannas of South America for carbon sequestration in the soil. En: *Management of Carbon Sequestration in Soil* (R. Lal, J. Kimble, R. Follett, B. Stewart, Eds). CRC press, New York. pp. 405-420.
- Follet, R.F. y D.S. Schimel. 1989. Effect of tillage practices on microbial biomass dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1091-1096.
- Gómez, I., J. Paolini y R.M. Hernández-Hernández. 2008. Sustitución de la sabana nativa con plantaciones de *Pinus caribaea* (Pinaceae) en Venezuela: efecto sobre parámetros indicadores de cambios en el carbono del suelo. *Int. J. Trop. Biol.* 56: 2041-2053.
- Güerere, I. 1992. Comparación de parámetros físicos, químicos y de la biomasa microbiana del suelo entre una sabana protegida del fuego y una sabana quemada anualmente. Tesis. Universidad Central de Venezuela. 45 pp.
- Hassink, J. 1995. Density fractions of soil macroorganic matter and microbial biomass as predictors of C and N mineralization. *Soil Biol. Biochem.* 27: 1099-1108.
- Hendrix, P.F., D.A. Parmelle, Jr. D.A. Crossley, D.C. Coleman, E.P. Odum y P.M. Groffman. 1986. Detritus food webs in conventional and no-tillage agroecosystems. *BioScience* 36: 374-380.
- Hernández-Hernández, R. M. y I.D. López-Hernández. 1998. Efecto de la intensidad de la labranza sobre diversas fracciones de la materia orgánica y la estabilidad estructural de un suelo de sabana. *Ecotrópicos* 2: 69-82.
- Hernández-Hernández, R.M., A. Florentino y I.D. López-Hernández. 2000. Efecto de la siembra directa y la labranza convencional en la estabilidad estructural y otras propiedades físicas de un ultisol en el estado Guárico-Venezuela. *Agronomía Tropical* 50: 9-29.
- Hernández-Hernández, R.M. y C. Domínguez. 2002. Efecto de prácticas agrícolas usadas en distintas unidades de producción de maíz y sorgo sobre algunas propiedades bioquímicas de suelos del Estado Guárico. *Agrobiológica* 2: 10-18.
- Hernández-Hernández, R.M. y I.D. López-Hernández. 2002a. Microbial biomass, mineral nitrogen and carbon content in savanna soil aggregates under conventional and no-tillage. *Soil Biol. Biochem* 34: 1563-1570.

- Hernández-Hernández, R.M. y I.D. López-Hernández. 2002b. El tipo de labranza como agente modificador de la materia orgánica: Un modelo para suelos de sabana de los Llanos Centrales Venezolanos. *Interciencia* 27: 529-536.
- Hernández-Hernández, R. M., Z. Lozano, C. Bravo, B. Moreno y L. Piñango. 2004. The use covers crop and no tillage as management that increases the potential sequestration carbon in the Venezuelan Central Plains soils. *Bull. Reseau Erosion* 23: 374-386.
- Hernández-Hernández, R.M. y O. Ruiz. 2007. Biomasa y actividades microbianas en agregados de suelos de sabana con dos texturas contrastantes manejados bajo sistemas conservacionistas, Proceeding Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. México CDrom
- Lopes, A., M. Ayarza y R. Thomas. 1999. Sistemas Agropastoriles en las Sabanas de América Latina Tropical. En: *Lecciones del Desarrollo Agrícola de los Cerrados de Brasil* (E.P. Guimarães, J.I. Sanz, I.M. Rao, M.C. Amézquita, E. Amézquita Eds.) Publicación CIATN° 313. pp 9-30.
- López-Hernández, I.D. y A. Ojeda. 1996. Alternativas en el manejo agroecológico de los suelos de las sabanas del norte de suramérica. *Ecotropicos* 9: 99-115.
- Lozano, Z., D. Lobo y I. Pla. 2000. Diagnóstico de limitaciones físicas en Inceptisoles de los Llanos Occidentales Venezolanos. *Bioagro* 12: 15-24.
- Lozano, Z., C. Bravo, R.M. Hernández-Hernández, M.T. Dell'Abate, F. Alianello y A. Benedetti. 2002. Efecto de cultivos de cobertura de diferentes calidades sobre la materia orgánica de dos suelos venezolanos. *Venesuelos* 10:47-60.
- Netuzhilin, Y., P. Chacón, H. Cerda, I.D. López-Hernández, F. Torres y M. Paoletti. 1999. Biodiversity tools to evaluate sustainability in savanna-forest Ecotone in the Amazon (Venezuela). En: *Management of Tropical Agroecosystems and Beneficial Soil Biota*. (M.V. Reddy, Ed). Science Publishers. Enfield, NH, EEUU. pp.291-352.
- Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- Padrino, M. y R.M. Hernández-Hernández. 2004. Dinámica de la descomposición de raíces de coberturas perennes en suelos de sabanas bien drenadas. Proceeding XVI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo, Cartagena de Indias, Colombia. CDrom.
- Rondon, M.A., D. Acevedo, R.M. Hernández-Hernández, Y. Rubiano, M. Rivera, E. Amezcuita, M. Romero, L. Sarmiento, M. Ayarza, E. Barrios y I. Rao. 2006. Carbon Sequestration potential of the Neotropical savanna of Colombia and Venezuela. En: *Carbon sequestration in soils of Latin America*. (R. Lal, C. Cerri, M. Bernoux, J. Etchevers, C. Pellegrino, Eds). Haworth Press Inc. pp 224-339.
- San José, J.J., R.A. Montes y C. Rocha. 2003. Neotropical savanna converted to food cropping and cattle feeding systems: soil carbon and nitrogen changes over 30 years. *Forest Ecol. Managm.* 184(1-3): 17-32.
- Sarmiento, G. 1983. The savannas of tropical America. En: *Ecosystems of the world - tropical savannas*. (W. Goodall, Ed.). Elsevier. pp.245-288.
- Singh, S. y J.S. Singh. 1995. Microbial biomass associated with water-stable aggregates in forest, savanna and cropland soils of a seasonally dry tropical region, India. *Soil Biol. Biochem.* 27: 1027-1033.
- Six, J., E.T. Elliott y K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32: 2099-2103.
- Theng, B., K. Tate y Ph. Sollins. 1989. Constituents of organic matter in temperate and tropical soil. En: *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. (D. Coleman, J.M. Oades y G. Uehara, Eds). NifTAL Proyect Honolulu. pp 5-32.
- Trujillo, W., E. Amézquita, M.J. Fisher y R. Lal. 1998. Soil organic carbon dynamics and land use in the Colombian savannas. En: *Soil Processes and the Carbon Cycle* (R. Lal, J. Kimble, R. Follett, B. Stewart, Eds). CRC press. pp 267-280.
- Whalen, J. K., P. J. Bottomley y D. D. Myrold. 2000. Carbon and nitrogen mineralization from light- and heavy-fraction additions to soil. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1345-1352.