

SECUESTRO DE CARBONO ORGÁNICO Y CAMBIOS DE FERTILIDAD EN UN ULTISOL DE SABANAS EN LA AMAZONÍA VENEZOLANA

Alonso D. Ojeda¹, Marianela Stein¹ y Danilo López-Hernández¹

RESUMEN

La asociación de los pastos cultivados *Urochloa dictyoneura*, *Stylosanthes capitata* y *Centrosema macrocarpum* en un suelo arenoso ácido, fertilizado con 1,0 y 0,3 Mg·ha⁻¹ de roca fosfórica (RF) y NPK (12-24-12) respectivamente, permitió evaluar los cambios en indicadores de la fertilidad del suelo, así como el secuestro de carbono orgánico cuatro años después de iniciado el fomento agronómico. El ensayo se estableció al norte del estado Amazonas, en la localidad de Sabaneta de Guayabal, Venezuela, comparando dos tratamientos: sabana natural (SN) y sabana cultivada (SC). Se realizaron muestras de suelo a tres profundidades (0-3, 3-6 y 6-10 cm) para evaluar textura, densidad aparente, pH (1:5) en H₂O y KCl, carbono orgánico del suelo (C), contenido de nitrógeno (N), fósforo total y asimilable (Pa), y bases cambiables. Los valores de pH_{H₂O} y pH_{KCl} permitieron determinar la densidad de carga neta coloidal (DCNC). Se aplicaron análisis de varianza y pruebas de MDS para evaluar las diferencias entre tratamientos y profundidades, así como análisis de correlación entre los parámetros físicos y químicos. El tratamiento de la SC mostró cambios de la fertilidad asociados a un mayor secuestro del C del orden de 2970 kg·ha⁻¹ en los primeros 10 cm del suelo, lo que indujo valores más electronegativos de DCNC en todas las profundidades. Este tratamiento presentó también mayor contenido de bases cambiables, N y Pa a las tres profundidades del suelo. Se concluyó que en los suelos de la sabana cultivada hubo cambios físicos, químicos y fisicoquímicos favorables en comparación con la sabana natural.

Palabras clave adicionales: *Urochloa dictyoneura*, roca fosfórica, punto isoléctrico, cargas variables dependientes del pH

ABSTRACT

Organic carbon sequestration and fertility changes in a savanna's ultisol of the Venezuelan Amazonia

Carbon sequestration and fertility changes were evaluated after four years of cover crop settlement with *Urochloa dictyoneura*, *Stylosanthes capitata* and *Centrosema macrocarpum* in a sandy acid soil fertilized with 1.0 and 0.3 Mg·ha⁻¹ of phosphoric rock and NPK (12-24-12), respectively. The experiment was established at Sabaneta de Guayabal, north of Amazonas State, Venezuela, where two treatments were compared: natural (NS) and cultivated savanna (CS). Soil samples were taken at three depths (0-3, 3-6, and 6-10 cm) for determinations of texture, bulk density, 1:5 water-pH and KCl-pH, organic carbon (C), total nitrogen (N), total and available phosphorous (Pa), and exchangeable cations. The difference between the pH_{H₂O} and pH_{KCl} allowed the determination of the colloidal charge density. Analysis were performed by ANOVA and LSD to assess differences between treatments and among depths. Correlation coefficients for the physical and chemical parameters were also obtained. The CS showed fertility changes associated with an increase of carbon sequestration of 2970 kg·ha⁻¹ in the first 10 cm of soil, which induced higher electronegative values of the colloidal charge density in CS at the different depths. The CS also revealed higher contents of the exchangeable bases as well as N and Pa at the three different soil depths. It was concluded that in the cultivated savanna soils there were favorable physical and chemical changes in comparison with those of the natural savanna.

Additional key words: *Urochloa dictyoneura*, phosphate rock, isoelectric point, charges dependent on pH

INTRODUCCIÓN

Las sabanas del estado Amazonas en Venezuela presentan fuertes restricciones para el desarrollo agrícola intensivo como consecuencia de la predominancia de suelos arenosos ácidos, altamente meteorizados, por ende de baja

fertilidad química natural y drenaje excesivamente rápido que favorece el lavado de nutrientes y la escasa retención del agua disponible en el suelo. La deforestación y el establecimiento de la agricultura en ecosistemas boscosos aledaños, con suelos de mejor calidad, ha sido una alternativa para incrementar la producción agrícola en la zona

Recibido: Julio 28, 2008

Aceptado: Junio 1, 2009

¹ Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 47058. Caracas, Venezuela. e-mail: alonso.ojeda@ciens.ucv.ve

(F. Torres, comunicación personal, 1993). Sin embargo, la pérdida de los mecanismos de conservación de los suelos con periodos de barbechos muy cortos (2-3 años) ha inducido una sobre explotación de estas áreas boscosas, acelerados procesos de erosión, lenta recuperación de los ecosistemas intervenidos y pérdida de la biodiversidad, todo lo cual merma la fertilidad química y la actividad biológica de los agroecosistemas establecidos en el bosque lluvioso tropical (Woomer et al., 1994; López-Hernández y Ojeda, 1997; López-Hernández et al., 1997).

Aunado a ello, el transporte de los insumos agrícolas para mejorar la fertilidad es muy oneroso, por lo alejado de las fuentes de producción y la disminución del subsidio de estos rubros (López-Hernández et al., 1997). Pese a las limitaciones, algunos productores asentados en las sabanas del eje carretero Puerto Nuevo-Puerto Ayacucho-Puerto Samariapo, han establecido sistemas de producción mediante el uso de diferentes formas de abonos orgánicos: vacuno, gallinaza y compost (López-Hernández et al., 2004, 2006; López-Contreras et al., 2007), que no sólo mejoran la productividad vegetal y la calidad del suelo, sino que también favorecen la reutilización de desechos y la reducción de los costos de producción. Prácticas basadas en el uso de fuentes externas de carbono y nutrientes como las citadas; sin embargo, presentan el inconveniente de estar supeditadas igualmente a insumos importados, tal es el caso del alimento animal. De esta manera, el tratar de incrementar los escasos niveles de materia orgánica del suelo mediante tecnologías generadas *in situ* constituye una premisa de la mayor importancia en el área.

La región de estudio presenta las más abundantes precipitaciones del país. Bajo estas condiciones los suelos ácidos de cargas variables están frecuentemente asociados a suelos muy evolucionados, con baja fertilidad natural debido a las fuertes pérdidas de arcilla, materia orgánica y bases cambiables (Mohr et al., 1972; Adams, 1995). En estos suelos predominan los sesquióxidos de hierro y aluminio y otros minerales secundarios con cargas dependientes del pH (Blancaneaux et al., 1977; García, 1994). Luego, pH inferiores al punto isoeléctrico (pH_0), generalmente ácidos, inducen una densidad de carga positiva en las arcillas de carga variable; por el contrario, por encima del pH_0 dichos coloides

presentan capacidad de intercambio catiónico al exhibir una superficie electronegativa que se opone al fácil lavado de las bases cambiables. En consecuencia, un fomento agronómico que permita inducir *in situ* incrementos perdurables del carbono orgánico del suelo (C), que además estimule la actividad biológica, el metabolismo del suelo y retenga mayor humedad es factor clave para el manejo agroecológico de estos suelos arenosos de sabanas. El principal objetivo de este trabajo fue evaluar el secuestro del C en un ultisol de sabana y los cambios de fertilidad, después de cuatro años de cultivo de pasturas adaptadas, fertilizadas inicialmente con fosfato de roca y NPK como fuente complementaria. Este manejo agroecológico en las sabanas se presenta como una opción alterna al acelerado cambio de uso del bosque tropical lluvioso y sus riesgosas consecuencias ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en una sabana de “trachypogon”, localizada a 5° 47' N y 67° 30' W a 80 msnm, próxima a una comunidad indígena Guahiba, en Sabaneta de Guayabal, municipio Atures, al sur de Puerto Ayacucho, estado Amazonas, Venezuela.

El clima del área de estudio es tropical de sabana (Aw) con un período lluvioso que se inicia en el mes de abril y finaliza en diciembre. Los promedios anuales de precipitación y temperatura registran valores de 2200 mm y 28 °C, respectivamente.

El área de estudio está ubicada en una zona que fisiográficamente corresponde a una transición entre los llanos al noroeste y el sistema montañoso del Macizo Central Guayanés al este. Los suelos, con una pendiente aproximada de 1%, se caracterizan por procesos de lavado y empobrecimiento superficial de arcilla (Blancaneaux et al., 1977).

El suelo se identificó como un Arenic Paleudults, de textura franco arenosa, caracterizado por una alta proporción de arena a lo largo del perfil; presenta estructura granular débil, que le confiere una alta permeabilidad, pero también un fuerte secado durante el período menos lluvioso y lixiviación excesiva durante los meses de máxima precipitación.

La vegetación es la típica de las “sabanas de trachypogon”, con árboles (Ramia, 1967). El

estrato herbáceo estuvo representado principalmente por las gramíneas *Trachypogon* sp. y *Axonopus* sp.; mientras que el componente arbóreo por *Curatella americana*, *Byrsonimia crassifolia* y *Bowdichia virgilioides*.

Para el estudio se tomó un área de 360 x 90 m dividida en dos parcelas iguales. De éstas, una se dejó como tratamiento de sabana natural (SN) de *Trachypogon* sp. y otra fue cultivada (SC) con *Urochloa dictyoneura* en asociación con las leguminosas *Stylosanthes capitata* y *Centrosema macrocarpum*; esta segunda parcela fue sometida a dos pases de rastra y una fertilización al voleo, con dosis de 1,0 y 0,3 Mg·ha⁻¹ de roca fosfórica de Riecito y NPK (12-24-12), respectivamente. El experimento incluyó también un pastoreo breve y discontinuo de semovientes menores.

Los suelos de la SN y SC fueron muestreados al azar cuatro años después en 12 puntos a las profundidades de 0-3, 3-6 y 6-10 cm. En cada tratamiento se obtuvieron tres muestras compuestas al mezclar cuatro unidades de muestreo que tenían en común el tratamiento y la profundidad. Las muestras de suelos se secaron a temperatura ambiente y luego fueron tamizadas, homogenizadas y cuarteadas para los análisis físicos y químicos.

Se determinaron la textura y la densidad aparente (Da) empleando el método descrito por Bouyoucos y el método del hoyo en campo (Casanova, 1996), respectivamente.

Los análisis químicos de suelo realizados fueron: pH en suspensión suelo:solución (H₂O o KCl 1N) 1:5. Se empleó digestión con H₂SO₄ y H₂O₂ y posteriormente método del fosfato-molibdato para determinar P, y método de Kjeldhal para N. Para el P asimilable (Pa) se utilizó la metodología de Olsen. Para determinar el carbono se empleó el método colorimétrico por oxidación de la materia orgánica descrito por Walkley y Black; y para los cationes intercambiables: Ca⁺², Mg⁺², K⁺ y Na⁺ se empleó una solución de acetato de amonio 1M a pH 7 y espectroscopía de absorción atómica. La fracción ligera de la materia orgánica del suelo (FL MOS), constituida principalmente de raicillas y detritus del suelo, fue determinada de acuerdo al método descrito por Anderson e Ingram (1993). La carga neta del suelo se determinó al medir su pH en una solución con KCl y en agua; la diferencia entre estos valores de pH ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) correspondió a la densidad de carga neta coloidal

del suelo (Theng, 1980; Uehara y Gillman, 1981). Según estos autores, los suelos de cargas variables dependientes del pH y con valores superiores al pH₀ (punto de carga neta cero equivalente al valor de pH donde iguales cantidades de H⁺ y OH⁻ se adsorben sobre las superficies hidroxiladas) tienen densidad de carga neta negativa en sus coloides, mientras que valores por debajo de pH₀, muestran carga neta con signo positivo asociada a procesos de intercambio aniónico.

Se realizó un análisis de varianza para detectar las diferencias entre los tratamientos SN y SC, y entre las profundidades de cada muestra de suelo, y prueba MDS para la separación de medias. Adicionalmente, se realizó un análisis de correlación entre los siguientes parámetros físicos y químicos del suelo: limo, pH_{H₂O}, pH_{KCl}, FL MOS, Ca⁺², DCNC y C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas y fisicoquímicas de la SC y SN

El suelo del área experimental presentó un pH bajo (4,5-5,5), con contenidos de arena de alrededor del 90 % y contenidos muy bajos de arcilla (Cuadro 1). Sin embargo, se observó un cambio ligero en la fracción limo del tratamiento SC a las profundidades de 3-6 y 6-10 cm, donde hubo un incremento de alrededor 3-4 puntos porcentuales en comparación con SN.

El cambio observado en la fracción limo del suelo es difícil de explicar. Si se descarta que la causa esté asociada a la variabilidad espacial del perfil dado que un análisis realizado en cuadrículas de 10 x 10 m en el área experimental, previo al establecimiento de las pasturas (datos no publicados), había mostrado la homogeneidad del suelo, se podría sugerir que la alta actividad biológica de la comunidad de lombrices de tierra, que en mejores condiciones de retención de humedad y protección de la luz solar, por el efecto de la cobertura herbácea establecida, habría inducido mayor mezclado entre las capas del suelo y mayor acarreo de la fracción limo en la SC en contraste con la SN. A pesar de que no existe una base sólida para suponer que las lombrices pudieran ejercer cierta selectividad sobre el transporte de los limos, existe una experiencia de Decaëns et al. (2001), en suelos con características parecidas, en la que encontraron diferencias significativas de la densidad aparente al comparar

las estructuras biogénicas provenientes de las lombrices, con agregados del suelo del mismo tamaño. Si bien la población de oligoquetos de las parcelas estudiadas no fue analizada, observaciones independientes realizadas para

sistemas de sabanas similares indican la presencia de una población endógena de lombrices de tierra que incrementa en biomasa y densidad en sistemas orgánicos agroforestales (Araujo y López-Hernández, 1999).

Cuadro 1. Propiedades físicas y fisicoquímicas de los suelos en la sabana cultivada (SC) y la sabana natural (SN)

Prof (cm)	Arena (%)		Limo (%)		Arcilla (%)		Da		pH _{H₂O}		pH _{KCl}		DCNC	
	SC	SN	SC	SN	SC	SN	SC	SN	SC	SN	SC	SN	SC	SN
0-3	90,5	92,0	6,2	4,7	3,3	3,3	1,4	1,4	5,4	5,4	4,3	4,7	-1,1	-0,7
	(1,10)	(0,00)	(1,22)	(1,15)	(1,15)	(1,15)	Ab	Ac	Aa	Aa	Ba	Aa	Ba	Ab
3-6	88,8	92,7	7,2	3,3	4,0	4,0	1,5	1,8	5,3	5,3	4,2	4,8	-1,1	-0,5
	(1,06)	(1,15)	(2,08)	(1,15)	(2,00)	(2,00)	Bb	Ab	Aa	Aa	Ba	Aa	Ba	Aa
6-10	89,8	93,3	7,5	4,0	2,7	2,7	1,9	2,2	5,3	5,2	4,3	4,8	-1,0	-0,4
	(1,15)	(1,15)	(1,15)	(0,00)	(1,15)	(1,15)	Ba	Aa	Aa	Aa	Ba	Aa	Ba	Aa

Letras distintas denotan diferencias estadísticas significativas según la prueba MDS ($P \leq 0,05$). Valores entre paréntesis indican la desviación estándar. Letras mayúsculas para comparaciones entre tratamientos (SC y SN), y minúsculas para profundidades

Los valores de Da mostraron diferencias significativas entre los tratamientos para las profundidades de 3-6 y 6-10 cm, en contraste con la primera profundidad en la que no hubo diferencias entre la SC y la SN. La Da registró un incremento estadísticamente significativo en las muestras provenientes de la capa más profunda (6-10 cm) al compararlo con los valores promedio de Da de las capas de los suelos más superficiales (Cuadro 1). Este incremento en densidad aparente con la profundidad en ambos tratamientos, alcanzó valores superiores al límite considerado crítico (1,6) en suelos de textura arenosa, lo que sugiere una mayor compactación del suelo a partir de los 3 cm de profundidad y que fue más acentuado en el caso de la SN.

Con relación a la densidad de carga neta coloidal (DCNC), el tratamiento SC presentó en las tres profundidades, valores más electronegativos en comparación con la SN (Cuadro 1). Estas diferencias representaron incrementos de 0,5 y 0,6 unidades de pH, estadísticamente significativas, y por consiguiente con una mayor capacidad de intercambio catiónico. El pH de este suelo al oscilar entre valores de 4,5 y 5,0, induce valores por debajo del punto de carga neta cero (PCNC), lo que determina una densidad de carga neta positiva y un predominio de los fenómenos de intercambio aniónico, en la superficie de los principales coloides inorgánicos, característicos

de los suelos ácidos altamente meteorizados.

En consecuencia, los cambios de fertilidad observados aquí se asocian a fenómenos de naturaleza electroquímica, identificados en valores de pH_{H₂O} que no mostraron diferencias entre los tratamientos, en contraste con valores significativamente más bajos de pH_{KCl} en los suelos y las profundidades del tratamiento SC. Lo anterior tuvo influencia directa y correlativa sobre el incremento en la DCNC en el suelo de la SC, aunque al parecer estos cambios no se atribuirían a solubilización de la roca fosfórica, pues los valores de pH_{H₂O} permanecieron prácticamente constantes, e induce a pensar que la carga generada provino básicamente de la materia orgánica acumulada durante el desarrollo de las pasturas.

Propiedades químicas de las sabanas SC y SN

El C en la SN disminuyó con la profundidad, particularmente en la capa más profunda (Cuadro 2). La SC presentó mayor contenido de C, con diferencias significativas a las profundidades de 3-6 y 6-10 cm en comparación con la SN.

El contenido de N, en general tendió a disminuir con la profundidad (Cuadro 2); así, la SC presentó el valor más bajo ($206 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ N}$) en la capa más profunda y resultó estadísticamente distinto al compararlo con el contenido de N de las capas superiores (0-3 y 3-6 cm) las cuales no mostraron diferencias entre sí. Los niveles de N en ambos tratamientos no mostraron diferencias significativas, excepto para la capa más superficial del suelo.

Cuadro 2. Propiedades químicas de los suelos en la sabana cultivada (SC) y la sabana natural (SN)

Prof (cm)	C (g·kg ⁻¹)		N (mg·kg ⁻¹)		P (mg·kg ⁻¹)		Pa (mg·kg ⁻¹)		C/N		C/P	
	SC	SN	SC	SN	SC	SN	SC	SN	SC	SN	SC	SN
0-3	6,8	6,7	279	210	122	62,0	9,5	3,0	24,4	31,8	55,6	108
	Aa	Aa	Aa	Ba	Ab	Bab	Aa	Ba				
3-6	7,1	6,2	254	217	147	66,0	9,0	1,5	27,9	28,5	48,2	93,9
	Aa	Ba	Aa	Aa	Aa	Ba	Aa	Ba				
6-10	7,2	4,7	206	191	95	57,5	7,5	2,0	34,9	24,6	75,9	81,7
	Aa	Bb	Ab	Aa	Ac	Bb	Aa	Ba				

Letras distintas denotan diferencias estadísticas significativas según la prueba MDS ($P \leq 0,05$). Valores entre paréntesis indican la desviación estándar. Letras mayúsculas para comparaciones entre tratamientos (SC y SN), y minúsculas para profundidades

En el caso del P se encontró un incremento significativo en la SC a las tres profundidades, tanto de P total como de P asimilable, respecto a la SN (Cuadro 2), lo que refleja el efecto residual de la fertilización fosfórica cuatro años después de iniciado el fomento agronómico. El contenido de P total en la SC mostró diferencias significativas entre las tres profundidades y el valor más alto (147 mg·kg⁻¹ P) se presentó a la profundidad intermedia. El contenido de P asimilable resultó superior en el tratamiento SC respecto a la SN para todas las profundidades, lo que está en concordancia con los niveles de P total. No se observó un patrón claro de acumulación de P con la profundidad en ambos tratamientos. Por su parte, las aplicaciones de roca fosfórica y NPK

modificaron los contenidos de P y Pa en la SC; sin embargo, la roca fosfórica no tuvo efecto sobre los valores de pH_{H_2O} ni de pH_{KCl} como fue señalado anteriormente. No obstante, la reducción del pH_{KCl} en la SC, reflejó la generación de mayores lugares de superficie electronegativa y un desplazamiento de protones.

Se detectaron correlaciones significativas ($P \leq 0,05$) entre la FL MOS y el pH_{H_2O} ($r = 0,60$), la DCNC ($r = 0,85$) y el pH_{KCl} ($r = -0,79$) (Cuadro 3). El contenido de C también mostró correlación significativa con pH_{KCl} ($r = -0,76$) y Ca^{+2} ($r = 0,76$) lo que sugiere, que el carácter más electronegativo de la DCNC fue de origen orgánico. No hubo correlación significativa entre el pH_{H_2O} y la DCNC.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de parámetros físicos y químicos de suelos de la sabana cultivada y la sabana natural

	Limo	pH_{H_2O}	pH_{KCl}	C	FL MOS	Ca^{+2}	DCNC
Limo	1						
pH_{H_2O}	0,19	1					
pH_{KCl}	<u>-0,85</u>	-0,32	1				
C	<u>0,66</u>	0,36	<u>-0,76</u>	1			
FL MOS	<u>0,71</u>	<u>0,60</u>	<u>-0,79</u>	0,57	1		
Ca^{+2}	<u>0,78</u>	0,38	<u>-0,85</u>	<u>0,76</u>	<u>0,63</u>	1	
DCNC	<u>0,80</u>	0,56	<u>-0,96</u>	<u>0,77</u>	<u>0,85</u>	<u>0,85</u>	1

FL MOS: fracción ligera de la materia orgánica del suelo; DCNC: densidad de carga neta coloidal. Valores subrayados denotan significancia estadística ($P \leq 0,05$)

Los valores de las bases cambiables tanto en la sabana natural como en la manejada con pastos fueron bastante bajos (Cuadro 4) como corresponde a un Arenic Paleudults. Sin embargo, se observó una mejora en la fertilidad del Ca^{+2} intercambiable, que resultó el doble en las tres

profundidades de la SC, atribuido principalmente a la aplicación de la roca fosfórica. Con excepción de la primera profundidad, los contenidos de Mg^{+2} y Na^{+} intercambiables mostraron tendencias similares de enriquecimiento a la profundidad intermedia, en contraste con

la profundidad de 6-10 cm, cuyos valores más altos correspondieron a la SN. El contenido de K^+ intercambiable no mostró diferencias significativas entre los tratamientos para ninguna de las tres profundidades. Sin embargo, la suma de bases cambiables fue mayor en el

tratamiento de la SC en comparación con la SN en las primeras dos profundidades, en contraste con valores más bajos a la profundidad de 6-10 cm. Este resultado ratifica los cambios observados en la DCNC al coincidir ambas tendencias (Cuadros 1 y 4).

Cuadro 4. Concentración de bases cambiables (cmol·kg) de los suelos en la sabana cultivada (SC) y la sabana natural (SN)

Prof. (cm)	Ca^{+2}		Mg^{+2}		K^+		Na^+		Σ bases cambiables	
	SC	SN	SC	SN	SC	SN	SC	SN	SC	SN
0-3	0,208	0,144	0,053	0,053	0,035	0,032	0,015	0,032	0,311	0,261
	Aa	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Bb	Aa	Aa	Ba
3-6	0,253	0,104	0,037	0,015	0,029	0,020	0,020	0,016	0,339	0,155
	Aa	Ba	Aa	Bb	Aa	Aa	Aa	Bb	Aa	Bab
6-10	0,206	0,091	0,012	0,031	0,023	0,019	0,013	0,026	0,254	0,167
	Aa	Ba	Bb	Aa	Aa	Aa	Bb	Aa	Ab	Ab

Letras distintas denotan diferencias estadísticas significativas según la prueba MDS ($P \leq 0,05$). Valores entre paréntesis indican la desviación estándar. Letras mayúsculas para comparaciones entre tratamientos (SC y SN), y minúsculas para profundidades

Relaciones C/P y C/N en los suelos

La relación C/P de la SN en las primeras dos profundidades duplicó el valor obtenido para la SC (Cuadro 2), lo cual se atribuye al incremento del contenido de P en la sabana fertilizada con roca fosfórica. Para las mismas profundidades la relación C/N mostró igualmente un ligero aumento en la SN respecto a la SC, pero con una diferencia mucho menor porque los incrementos en N por efecto de la fertilización química y biológica, asociada esta última a la presencia de leguminosa en este tratamiento, no se observaron al final del experimento. El patrón anteriormente descrito para la relación C/N se modificó a la profundidad de 6-10 cm, mientras que en la misma profundidad la relación C/P sólo mostró una pequeña diferencia entre ambos tratamientos. La literatura refiere que los restos orgánicos con altos valores de C/N (por ejemplo 50:1) incorporados al suelo inducen una mayor inmovilización de N, de igual forma que las relaciones C/P-orgánico, mayor o igual a 300 inducen una mayor inmovilización de P (Enwezor, 1968; Guerra et al., 1983); esto podría interpretarse como mecanismos de compensación entre las distintas fracciones del C mediante los fenómenos de mineralización e inmovilización de N y P a las distintas profundidades del suelo. Los menores valores para ambas relaciones (C/N y C/P) en SC muestran los cambios de fertilidad

asociados a los tratamientos después del fomento agronómico.

Balance del C en los sistemas estudiados

El balance total del contenido de C acumulado en la SC cuatro años después de iniciado el establecimiento de las pasturas arrojó un incremento de $2970 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de carbono con relación al contenido en SN (Cuadro 5), lo que equivale a una tasa de captación de $74 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ en los primeros 10 cm del suelo. Incrementos similares de C han sido registrados para las sabanas de Colombia y Venezuela, con valores entre 50 y $300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ a una profundidad de 0-40 cm (CIAT, 1999). El C acumulado en el suelo ayuda a disminuir el CO_2 en el aire, el cual es el principal responsable del efecto invernadero en el planeta (Velázquez de Castro, 2008). De esta manera, el establecimiento de las pasturas representó una práctica agronómica favorable en contraposición a las prácticas inadecuadas de manejo de los suelos, particularmente comunes en las sabanas tropicales (Ike, 1987; Ojeda y López-Hernández, 1994; Hernández-Hernández y López-Hernández, 2002).

Las sabanas del estado Amazonas en Venezuela, además de pastizales, tienen alto porcentaje de tierras con vocación silvopastoril y agroforestal, cuya implementación podría constituir una estrategia para incrementar el

secuestro de CO₂, evitar la degradación de los suelos y fomentar un mejor uso de los recursos de suelo y agua (Rondón et al., 2006). En consecuencia, estos sistemas de producción en las sabanas de la Amazonía venezolana merecen una mayor atención por su potencial para incrementar la productividad primaria y contrarrestar las emisiones globales (Lal, 2004), así como en el contexto de los cambios climáticos y la conservación del bosque tropical lluvioso.

Cuadro 5. Balance del C en los suelos en la sabana cultivada (SC) y la sabana natural (SN)

Prof. (cm)	C (kg·ha ⁻¹)		
	SC	SN	Σ = SC-SN
0-3	9520	9380	140
3-6	10650	11160	-510
6-10	13680	10340	3340
	Balance		2970

CONCLUSIONES

En la sabana cultivada hubo cambios físicos, químicos y fisicoquímicos perdurables cuatro años después de establecidas las pasturas. El experimento corrobora la factibilidad del fomento agronómico de las sabanas de suelos ácidos y drenaje interno rápido, con roca fosfórica, NPK y pasturas adaptadas como *Urochloa dictyoneura* en asociación con las leguminosas *S. capitata* y *C. macrocarpum*. Los primeros 10 cm del suelo de la sabana cultivada fueron modificados por el manejo agronómico, que indujo cambios en la fertilidad asociados a un incremento del C y a fenómenos de naturaleza electroquímica de origen orgánico, que habrían generado nuevos sitios de intercambio catiónicos, y en consecuencia, incrementos de la suma de bases cambiables.

Lo anterior sugiere la potencialidad de aprovechamiento agrícola sostenible que tienen estos agroecosistemas de suelos ácido-arenosos de las sabanas, además de la factibilidad de su uso, para reducir la presión sobre el bosque tropical lluvioso en la Amazonía venezolana mediante el fomento agronómico de pasturas adaptadas, y el levante de semovientes menores.

AGRADECIMIENTO

Al Fonacit por el financiamiento del Proyecto RP VII 290089. Al Ing. Frans Torres, al Dr. Antonio Sánchez y a la comunidad Guahiba de

Sabaneta de Guayabal por su contribución en la idea e implementación de esta experiencia. Al Lic. Roschman González por su trabajo en el tratamiento estadístico de los resultados.

LITERATURA CITADA

- Adams, M. 1995. Fundamentos de Química de Suelos. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, UCV. Caracas. 390 p.
- Anderson, J. y J.S. Ingram. 1993. Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods. CAB Int., Wallingford, UK. 171 p.
- Araujo, Y. y D. López-Hernández. 1999. Earthworm populations in a savanna agroforestry system of Venezuelan Amazonia. Biol. Fert. Soils 29: 413-418
- Blancaneaux, Ph., S. Hernández y J. Araujo. 1977. Estudio Edafológico Preliminar. Sector Puerto Ayacucho. MARNR, Serie Informes Científicos. Caracas. 120 p.
- Casanova, E. 1996. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Caracas. 379 p.
- CIAT 1999. Annual Report. Tropical Grasses and Legumes: Optimizing Genetic Diversity for Multipurpose Use. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali. 175 p.
- Decaëns, T., J.H. Galvis y E. Amézquita. 2001. Properties of the structures created by ecosystem engineers on the soil surface of a Colombian savanna. In: Jiménez y Thomas (eds.). Nature's Plow: Soil Macroinvertebrate Communities in The Neotropical Savannas of Colombia. CIAT. Cali. pp. 151-175.
- Enwezor, W.O. 1968. Significance of the C:organic-P ratio in the mineralization of soil organic phosphorus. Soil Sci. 100(1): 61-65.
- García, P. 1994. Los suelos del estado Amazonas: sus potencialidades agrícolas. Venesuelos 2: 59-66.
- Guerra, F., G.S. Cruz, R. Orayazabal, C. De Armas, J.L. Peña y R. Faloh. 1983. Edafología

- General. Pueblo y Educación. La Habana. 216 p.
11. Hernández-Hernández, R.M. y D. López-Hernández. 2002. El tipo de labranza como agente modificador de la materia orgánica: un modelo para suelos de sabana de los Llanos Centrales Venezolanos. *Interciencia* 27(10): 529-536.
 12. Ike, I.F. 1987. Influence of tillage practice and nitrogen and phosphorus fertilizer rates on crop yields in the tropical savanna. *Soil Sci.* 143(3): 213-219.
 13. Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.
 14. López-Contreras, A.Y., I. Hernández-Valencia y D. López-Hernández. 2007. Fractionation of soil phosphorus in organic amended farms located on sandy soils of Venezuelan Amazonian. *Biology & Fertility of Soils* 43: 771-777.
 15. López-Hernández, D. y A. Ojeda. 1997. Alternativas en el manejo agroecológico de los suelos de las sabanas al norte de Suramérica. *Ecotropicos*. 9(2): 99-115.
 16. López-Hernández, D., A.Y. López, I. Hernández-Valencia, A. Ojeda y C. Hernández. 2006. Impacto de la fertilización orgánica sobre indicadores de calidad de suelos en granjas agroforestales localizadas en el Amazonas Venezolano. *Memorias IV Congreso de Física y Química Ambiental*. Cáceres, España. Tomo II: 279-286.
 17. López-Hernández, D., M.P. García-Guadilla, F. Torres, P. Chacón y M.G. Paoletti. 1997. Identification, characterization and preliminary evaluation of Venezuelan Amazonian production systems in Puerto Ayacucho savanna-forest ecotone. *Interciencia* 22: 307-314.
 18. López-Hernández, D., Y. Araujo, A. López, I. Hernández-Valencia y C. Hernández. 2004. Changes in the soil properties and in earthworm populations induced by long-term organic fertilization in the Venezuelan Amazonia. *Soil Sci.* 169: 188-194.
 19. Mohr, E.C., F.A. van Baren y J. van Schuylenborgh. 1972. Tropical soils: A Comprehensive Study of their Genesis. Mouton-Ichtiar Baru-van Hoeve. The Hague. 481 p.
 20. Ojeda, A. y D. López-Hernández. 1994. Changes of phosphorus contents in light and heavy soil organic matter induced by different tillage systems. *In: Senesi y Miano (eds.). Humic Substances in the Global Environment and Implications in Human Health*. Istituto di Chimica Agraria, Università di Bari, Monopoli, Italy. pp. 673-678.
 21. Ramia, M. 1967. Tipos de sabana en los llanos de Venezuela. *Bol. Soc. Ven. Cien. Nat.* 27: 264-288.
 22. Rondón M.A., D. Acevedo, R.M. Hernández, Y. Rubiano, M. Rivera, E. Amezquita, M. Romero, L. Sarmiento, M. Ayarza, E. Barrios e I. Rao. 2006. Carbon sequestration potential of the neotropical savannas of Colombia and Venezuela. *In: Lal, Cerri, Bernoux, Etchevers y Pellegrino (eds.). Carbon Sequestration in Soils of Latin America*. Haworth Press. NY. pp. 213-243.
 23. Theng, B.K.G. 1980. Soils with variable charge. Department of Scientific and Industrial Research. New Zealand Society of Soil Science. Lower Hunt, New Zealand. pp. 17-34.
 24. Uehara, G. y G. Gillman. 1981. The mineralogy chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. Series N° 4. Westview Press, Boulder, Colorado. 160 p.
 25. Velázquez de Castro, F. 2008. Preguntas sobre el cambio climático. Conceptos básicos del efecto invernadero y del cambio climático. *Le Monde diplomatique*. Buenos Aires. 237 p.
 26. Woomer, P.L., A. Martin, A. Albrecht, D.V.S. Resck y H. W. Scharpenseel. 1994. The importance and management of soil organic matter in the tropics. *In: Woomer y Swift (eds.). The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. Wiley. Chichester, UK. pp. 47-80.