

# LA ROTACIÓN DE CULTIVOS EN EL VALLE CÁLIDO DEL ALTO MAGDALENA: UN ENFOQUE CONSERVACIONISTA DE ALTO RENDIMIENTO

*Ricardo Alfaro Rodríguez*<sup>1</sup> • *Antonio María Caicedo*<sup>2</sup>  
*Hugo Eduardo Castro Franco*<sup>3</sup> • *Edgar Amézquita Collazos*<sup>4</sup>

## RESUMEN

En el Centro de Investigaciones "Nataima" situado a 431 msnm, con una temperatura promedio de 28° C y una precipitación anual de 1274 mm, en un suelo clasificado como Arenic Haplustalf, se investigaron durante cinco años diversas rotaciones de cultivos con base en arroz y sorgo; las combinaciones usadas fueron: arroz-arroz (A-A), arroz-soya (A-Sy), arroz-crotalaria-sorgo (A-C-S), sorgo-sorgo (S-S), sorgo-soya (S-Sy) y algodón-sorgo (Al-S). Simultáneamente se evaluó la respuesta a cuatro niveles de fertilización nitrogenada, con los que se obtuvo las funciones de rendimiento y a la vez se optimizó económicamente. Las rotaciones S-Sy, A-Sy y Al-S fueron las mejor calificadas desde una perspectiva ambiental. La rotación S-Sy presentó incrementos en rendimiento en relación con los valores esperados, lo cual permite asegurar que se trata de una rotación verdaderamente sostenible; además tuvo excelente rentabilidad constituyendo la mejor opción dentro del enfoque del presente trabajo.

**Palabras Claves Adicionales:** Sostenibilidad, incrementos de rendimiento, mejoramiento del suelo, fertilización nitrogenada, funciones de producción, evaluación ambiental, optimización económica.

## ABSTRACT

### CROPS ROTATION IN THE VALLE CALIDO DEL ALTO MAGDALENA A SUSTAINABLE FOCUS OF HIGH YIELD

Experiments were carried out during five years at the "Nataima" Research Center, located at 431 m.a.s.l. with average temperature of 28°C and annual rainfall of 1274 mm, on a soil classified as Arenic Haplustalf, to evaluate different crops rotation based on rice and sorghum; the combinations used were as follows: rice-rice (R-R), rice-soybean (R-Sy), rice-crotalaria-sorghum (R-C-S), sorghum-sorghum (S-S), sorghum-soybean (S-Sy) and cotton-sorghum (Al-S). Simultaneously it was evaluated the response to four nitrogen levels, which allowed to find out yield functions and the optimum economical. The rotations S-Sy, R-Sy and Al-S have been the best qualified from an environmental perspective.

Sorghum-soybean rotation presents increases in yield compared with expected values which allows to think that it is a truly sustainable rotation. This rotation also had an excellent profitability and for that reason is considered the best option within the goals of this work.

**Additional Index Words:** Sustainability, yield increases, soil improvement, nitrogenous fertilization, production functions, environmental evaluation, economical optimization.

---

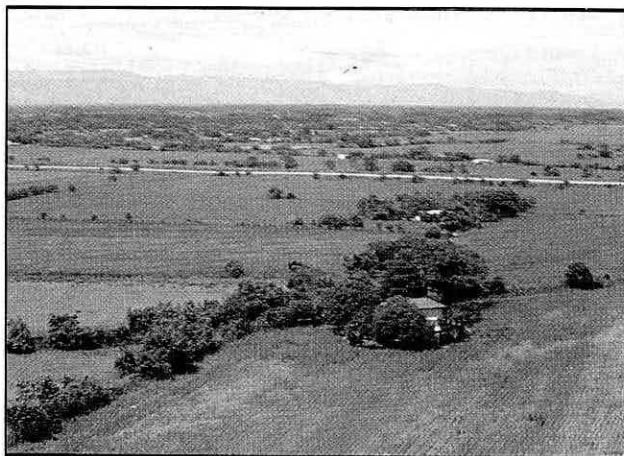
1 Agrólogo, M.Sc. Manejo de Suelos. CORPOICA-ICA, C.I. Nataima. El Espinal, Tolima.  
2 I.A.M.Sc. Optimización del Recurso Hídrico. C.I. Nataima. A.P. 40. El Espinal Tolima.  
3 I.A.M.Sc. Profesor de Suelos, Facultad de Agronomía. UPTC. A.A. 1094 Tunja, Boyacá.  
4 I.A., Ph.D. Conservación de Suelos. CIAT. Cali, Valle.

El hecho de que un segmento significativo de la población mundial no recibe actualmente una dieta adecuada debe ser parte de la ecuación que define sostenibilidad; también es cierto que la verdadera sostenibilidad debe incluir la idea de incrementar los rendimientos para satisfacer las crecientes necesidades de alimentos, fibras y energía de una población global en continuo crecimiento. La población debe ser una de las principales consideraciones de la sostenibilidad; proyecciones recientes indican que la población mundial será superior a 6.000 millones de personas en el año 2.000. Otros estiman que se estabilizará en 10.000 millones en el año 2100. Para ubicar el crecimiento poblacional en una perspectiva más clara respecto a la sostenibilidad agrícola, se puede indicar que en los siguientes 10 años se requerirán producir alimentos para alrededor de 100 millones de personas más por año, solamente para mantener los estándares actuales. Uno de los principales problemas relacionados con el incremento de población es el hecho de que alrededor del 90% de este incremento ocurrirá en los países en vías de desarrollo (PVD), donde ya existe un déficit de alimentos.

Estimadores de la FAO indican que solamente se podrá cubrir el 24% de las necesidades futuras de alimentos con el sólo hecho de incluir nuevas tierras a la producción agrícola. El restante 76% deberá ser satisfecho incrementando los rendimientos de los cultivos en las tierras que se encuentran actualmente en producción; pero también existe la preocupación por la disminución de los rendimientos en los PVD por degradación ambiental, en lo que se refiere a las condiciones edáficas deterioradas por el uso y el manejo inadecuados de los

suelos. Para mejorar el suelo se puede recurrir a métodos biológicos o a métodos de intervención puramente artificiales; los métodos biológicos consisten en seleccionar aquellas secuencias de cultivos que puedan contribuir a una mejor evolución del humus, fijar nitrógeno atmosférico, o, gracias a un sistema radicular potente y profundo, mejorar la estructura del suelo y aumentar la macroporosidad de horizontes colmatados; este método se ha denominado comúnmente como "rotaciones".

En muchas partes del país y en particular en el Valle Cálido del Alto Magdalena, el uso intensivo de la tierra asociado al monocultivo ha hecho disminuir notablemente los rendimientos o aumentar los costos de producción, para mantener altos niveles de producción, por lo cual puede asegurarse que el potencial productivo de estas tierras ha disminuido. Una alternativa moderna, enmarcada dentro del actual concepto de agricultura biológica es la utilización de los sistemas de rotación en la



En el Valle Cálido del Alto Magdalena, el uso intensivo de la tierra asociado al monocultivo ha disminuido notablemente los rendimientos, pudiéndose asegurar que el potencial productivo de estas tierras ha disminuido. Se hace impostergable utilizar sistemas de rotación en la búsqueda de rendimientos sostenibles y estables.

búsqueda de rendimientos sostenibles y estables.

Son múltiples las referencias bibliográficas relacionadas con los beneficios que se logran al usar rotaciones adecuadas de cultivos, en combinación con prácticas mecánicas que ejerzan acciones sinérgicas sobre los procesos biológicos, tales como, cobertura del suelo, fijación simbiótica de nitrógeno, etc.

Los suelos motivo del presente estudio en general poseen bajas cantidades de materia orgánica y alta rata de mineralización de la misma, por ésto es necesario combinar la rotación de cultivos socioeconómicamente importantes, con abonos verdes y aplicación de nitrógeno. La investigación se planteó con los siguientes objetivos:

## **General**

Evaluar los efectos de diversas rotaciones de cultivos sobre la sostenibilidad ambiental.

## **Específicos**

Evaluar agroeconómicamente la producción por rotación.

- Estudiar superficies de respuesta a la fertilización nitrogenada por rotación.
- Cuantificar cambios físico-químicos del suelo.
- Establecer la sostenibilidad de las rotaciones en estudio.
- Generar recomendaciones estratégicas.

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

- **Campbell y Zentner (2)**, en un estudio de rotaciones monitorearon la materia orgánica del suelo a dos profundida-

des 0-15 cm y 15-30 cm en un experimento que lleva 24 años en un suelo Aridic Haploboroll de textura media en el Sur de Saskatchewan (Canadá). La materia orgánica se incrementó en la rotación de cultivos anuales bien fertilizados y permaneció constante en las parcelas cultivo-descanso y en las de trigo-trigo, con inadecuada fertilización nitrogenada. Los cambios en materia orgánica del suelo estuvieron directamente relacionados con la cantidad de residuos generados por estos sistemas y por la susceptibilidad a la erosión. La materia orgánica del suelo estuvo inversamente relacionada con el déficit aparente de N (N exportado en el grano menos N aplicado como fertilizante).

- **Borresen y Njos (1)**, encontraron en un suelo arcilloso sometido a diversas técnicas de labranza que la distribución de agregados del suelo por tamaño no se afectó por la cantidad de nitrógeno aplicado, no existiendo además interacción entre labranza y nitrógeno.

El tratamiento donde se usó rotovalor tuvo una acumulación de  $310 \text{ kg-ha}^{-1}$  de materia orgánica por año; mientras que en el que se utilizó rastra el contenido de materia orgánica se mantuvo constante. El incremento de materia orgánica también produjo un aumento proporcional de nitrógeno.

- **Dale y Chandler (3), y Wax y Schoper (11)**, concluyeron que los problemas de malezas son más severos bajo condiciones de monocultivo continuo que en sistemas de rotación debido a que diversos cultivos requieren operaciones diferentes de labranza, lo cual reduce notoriamente las necesidades de herbicida.

Usar soya en sistema de rotación es importante debido a la fijación simbió-

tica de nitrógeno por *Rhizobium spp.*; estudios han demostrado que la soya contribuye con nitrógeno para el cultivo subsiguiente (Heichel y Barnes, 1984; Nafziger, 1984; Welch, 1979).

- **Varuel y Todd** (10), en un experimento de sistemas de rotación con base en la soya encontraron que la soya remueve aproximadamente de 150 a 200 kilogramos de nitrógeno por hectárea por año para niveles de rendimiento de 2.5 a 3.4 t/ha<sup>-1</sup>. La soya puede actuar como un almacén de nitrógeno, lo cual reduce la cantidad de Nitrógeno del suelo disponible para lavado. La soya promete reducir las pérdidas de nitrato por lavado hacia aguas freáticas, ya sea que el nitrógeno provenga del suelo o de la fertilización; se dispone de poca información para los cultivos sucesivos.

La rotación de soya con cultivos de grano es una práctica popular a lo largo de EUA, y se carece de información acerca del ciclo del nitrógeno en sistemas de rotación de soya, lo cual demanda investigación futura.

- **Gómez** (4), investigó los efectos de una rotación con soya o alfalfa en la producción de maíz; en los primeros nueve años encontró que el maíz en monocultivo disminuye su producción, debido a una merma del nitrógeno asimilable del suelo; el maíz rotado con alfalfa o con soya conserva alta la producción de la cosecha siguiendo la leguminosa. Esta producción es similar a la del maíz en monocultivo fertilizado con nitrógeno; la aplicación de nitrógeno al maíz en monocultivo reemplaza totalmente el efecto de la rotación en la producción de maíz; el efecto benéfico de la alfalfa se extiende a las dos cosechas de maíz que le siguen, pero es mayor en la primera.

- **Jones y Sinclair** (5), encontraron las siguientes cantidades de nitrógeno mineral disponible para el cultivo de sorgo, 45, 113 y 53 kg-ha<sup>-1</sup> cuando el suelo provenía de barbecho, caupí y sorgo, respectivamente, en donde se observó la superioridad del caupí previo para aportar nitrógeno. La fertilización aplicada seis semanas posterior a la emergencia del cultivo tuvo efectos significativos únicamente para las parcelas provenientes de barbecho.

Una posible causa de estos resultados es el efecto alelopático de los residuos de las raíces del sorgo sobre el siguiente cultivo, la cual ha sido descrita por Burgos y Leon en 1980, para suelos arenosos del oeste de África.

- **Schneekloth, Klocke, Hergert, Martin y Clark** (6), condujeron un experimento en Nebraska en un suelo Fluventic Haplustoll relacionado con la rotación de cultivos y diversas prácticas de manejo de agua. Los rendimientos de maíz en la rotación trigo, maíz, soya (T-M-S), fueron mayores que para la rotación maíz-maíz (M-M) en dos de tres años bajo condiciones de secano. Los rendimientos de maíz fueron similares para ambas rotaciones bajo irrigación suplementaria, pero existe la tendencia a presentar mayores rendimientos el maíz de la rotación T-M-S que el de M-M a través de los años. Investigaciones previas también mostraron un efecto positivo de la rotación de maíz con otro cultivo, comparado con un monocultivo continuo. Dichas investigaciones fueron hechas bajo condiciones de secano y sin aplicación de fertilizante; los resultados indicaron que las diferencias en rendimiento encontradas entre rotaciones dependieron exclusivamente del agua, cuando todas las otras variables no fueron limitantes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó a partir del segundo semestre de 1990 en el Centro de Investigación Agrícola "Nataima", ubicado en las siguientes coordenadas: Latitud 4° 12' N y longitud 74° 56' W, a una altura de 431 msnm, con una temperatura media de 28°C, humedad relativa del 70% y precipitación total promedio anual de 1288 mm.

El experimento se llevó a cabo en un suelo de la serie "Dindalito" clasificado según la taxonomía como Arenic Haplustalf, isohipertérmico, franco grueso. Las especies vegetales usadas fueron: arroz (*Oryzica* 3), sorgo (ICAIMA), soya (*Soyica* N-22), crotalaria y algodón (*Gossica* N-23). Los niveles de fertilización nitrogenada correspondieron a 0,50, 100 y 150 kg-ha<sup>-1</sup>, durante los primeros 4 años; en el quinto año se incrementó 10 kg-ha<sup>-1</sup> para aquellos tratamientos con aplicación de nitrógeno. Se utilizó el diseño experimental de franjas divididas con cuatro repeticiones; el tamaño de la parcela fue de 50 m<sup>2</sup>. El número total de tratamientos al combinar las rotaciones con los niveles de nitrógeno fue de 24, descritos en la Tabla 1.

**TABLA 1. Descripción de los tratamientos utilizados. Rotación de Cultivos C.I. Nataima, 1990.**

No. Tratamiento	Rotación cultivos	Fertilización nitrogenada a intervalo de 50 kg/ha <sup>-1</sup>
1 a 4	Arroz-arroz	0-150
5 a 8	Arroz-soya	0-150
9 a 12	Arroz-crotalaria-sorgo*	0-150
13 a 16	Sorgo-sorgo	0-150
17 a 20	Sorgo-soya	0-150
21 a 24	Algodón-sorgo	0-150

\* Sembrada en el intersemestre e incorporada como abono verde.

Se monitorearon variaciones físico-químicas del suelo, desarrollo y rendimiento de los cultivos, rentabilidad de los mismos y población de malezas; estas observaciones permitieron confeccionar una matriz ambiental para calificar el efecto de cada una de las rotaciones o actividades del hombre sobre algunos indicadores considerados de gran importancia.

Se buscaron funciones matemáticas correspondientes a nitrógeno-rendimiento, a partir de las cuales se optimizó económicamente la producción y se realizó alguna inferencia, en relación con las proyecciones.

El manejo agronómico de los cultivos se realizó según las indicaciones establecidas a nivel comercial para cada uno de ellos; la época de aplicación del fertilizante nitrogenado fue la siguiente:

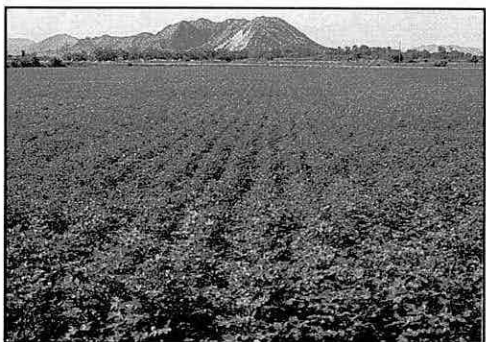
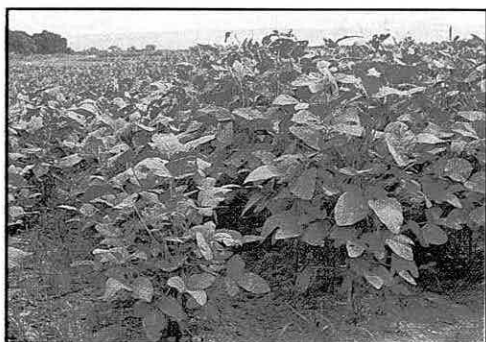
Cultivo de sorgo:	1/4 DG*, 3/4 28 DDG**
Cultivo de soya:	1/3 DG, 2/3 al inicio de floración.
Cultivo de arroz:	1/3 20 DDG, 1/3 45 DDG, 1/3 65 DDG
Cultivo de algodón:	1/4 después de raleo, 3/4 al inicio de floración

\* Después de germinación

\*\* Días después de germinación

La selección de cultivos en rotación se hizo tomando en consideración la importancia socioeconómica de los mismos, así como las recomendaciones establecidas para el área Cj, de la zonificación agroecológica de Colombia (ICA-IGAC, 1986).

Algunos de los métodos empleados se citan en la Tabla 2.



La selección de cultivos en rotación se hizo considerando su importancia socioeconómica y las recomendaciones para el área Cj de la zonificación agroecológica de Colombia; las especies fueron: arroz, soya, crotalaria, algodón y sorgo.

**TABLA 2.** Métodos utilizados para la determinación de algunos parámetros. C.I. Nataima, 1990-1995.

Determinación	Método
Materia orgánica	Walkley - Black
pH	Potenciométrico 1:2.5
Fósforo	Bray II
Bases intercambiables	Acetato de amonio normal y neutro
Infiltración	Anillos concéntricos
Densidad aparente	Cilindro de volumen constante
Densidad real	Picnómetro
Resistencia a la penetración	Penetrómetro de cono
Cuantificación de malezas	Cuadrado

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido al volumen de información obtenida durante los primeros cinco años, únicamente se presenta aquella considerada muy importante para calificar la matriz de evaluación de actividades sostenibles.

### Densidad aparente

La densidad aparente es el parámetro físico que indica por excelencia el estado general del suelo en relación con su empaquetamiento; para texturas franco-arenosas a franco-arcillo-arenosas puede considerarse un valor de  $1.6 \text{ g-cm}^{-3}$ , como una cifra normal. En la Tabla 3 se presentan los valores actuales para cada una de las rotaciones después de diez semestres de experimentación; como puede apreciarse, el valor de referencia concuerda con el promedio obtenido por la rotación cuya base es el cultivo de arroz, existiendo una tendencia a presentar valores más pequeños cuando se siembra una leguminosa como la soya; estas cifras permiten inferir que el cultivo de arroz facilita los procesos de compactación del suelo.

**TABLA 3.** Evolución de la densidad aparente del suelo bajo rotación de cultivos. C.I. Nataima, 1994-1995.

Rotación	Semestre		Promedio
	A	b	
A-A	1.71 B <sup>1</sup>	1.64 AB	
A-Sy	1.76 A	1.61 BC	1.67
A-C-S	1.61 C	1.69 A	
S-S	1.64 C	1.59 BC	
S-Sy	1.65 C	1.57 C	1.59
Al-S	1.59 C	1.55 C	

<sup>1</sup> Tukey 0.05  
Valor original 1990B:  $0-20 \text{ cm}$ ,  $1.67 \text{ g-cm}^{-3}$

Los valores obtenidos cuando la base es sorgo son los más deseables desde el punto de vista de relaciones adecuadas agua-aire-suelo; estas cifras están directamente relacionadas con el contenido de materia orgánica del suelo (Tabla 4), la que según Harris *et al* citado por Borresen and Njos (1), provee unas mejores condiciones para los microorganismos del suelo y por lo tanto tiene un efecto positivo sobre la estructuración del mismo. De igual manera, aunque no se encontraron diferencias estadísticas para la densidad aparente, en relación con los niveles de nitrógeno aplicado, sí existe una clara ten-

dencia en la que a mayor cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado es menor la densidad aparente del suelo.

**TABLA 4. Contenido de materia orgánica del suelo, por efecto de la rotación de cultivos. C.I. Nataima, 1995.**

Rotación	Año**			Promedio
	1992	prom.	1995	
A-A	1.0*		1.09	
A-Sy	1.7	1.40	1.36	1.24
A-C-S	1.5		1.28	
S-S	1.1		1.34	
S-Sy	1.5	1.20	1.70	1.55
Al-S	1.0		1.62	

\* En %, 0.1% MO 170 kg Nitrógeno total-ha<sup>-1</sup>

\*\* 1990 B, 1.0% M.O valor de referencia

### Materia orgánica y nitrógeno.

En la Tabla 4 se presentan los valores de materia orgánica del suelo a través del tiempo; comparando los valores obtenidos en 1992 con los actuales se observa un descenso en aquellas rotaciones con base arroz, mientras sucede lo contrario cuando la base es sorgo, obteniéndose el mayor valor cuando se combina con la soya la cual proporciona nitrógeno al suelo por medio de la relación simbiótica que mantiene con el *Rhizobium japonicum*. La explicación de la disminución de materia orgánica en suelos con arroz puede deberse a la necesidad de mantener húmedo el suelo casi en forma continua, lo cual reduce el oxígeno y en consecuencia la actividad de organismos nitrificantes; esta misma condición también causa denitrificación, lo cual podría resultar en menos nitrógeno disponible para ser tomado por la planta (Schmidt, Firestone 1982, citados por Thicke *et al* (7)). Otra posible explicación dada por los mismos autores es que el suelo para poder suplir la demanda de nitrógeno del cultivo, tenga que mineralizar sus reservas y por lo tanto se presente una caída en la materia orgánica total.

La Tabla 5, contiene las funciones fertilización nitrogenada-rendimiento para cada una de las rotaciones; estas ecuaciones fueron estimadas incluyendo los rendimientos de 1994A, en donde la fertilización nitrogenada aplicada variaba de 0-150 kg-ha<sup>-1</sup>; al graficar y comparar el monocultivo de arroz, con arroz seguido de soya se observa que en esta última rotación una aplicación de 150 kg-ha<sup>-1</sup> de nitrógeno produce un efecto decreciente en los rendimientos, mientras en el monocultivo con una fertilización de esta magnitud no se alcanza a obtener los rendimientos máximos (Figura 1). En la Figura 2, se establece una comparación similar cuando el cultivo es sorgo. Al respecto Thicke *et al* (7), aseguran que no es posible predecir exactamente la disponibilidad del nitrógeno y la respuesta del cultivo, debido a la naturaleza dinámica del ciclo de nitrógeno y a la variabilidad impuesta por la interacción del clima, el manejo y el crecimiento del cultivo; pero puede establecerse un comportamiento aproximado para lograr una optimización en el uso del nitrógeno y de la misma forma conservar la fertilidad actual del suelo.

**TABLA 5. Respuesta cuadrática del rendimiento a la fertilización nitrogenada en rotación de cultivos. C.I. Nataima, 1990- 1994.**

Rotación*	Semes			
	-tre	a	b	c
A-A (promedio)	A-B	2320.39	39.82	-0.100
A-Sy	A	2692.17	62.35	-0.252
A-C-S	A	2958.02	42.85	-0.111
S-S (promedio)	A-B	1758.61	42.44	-0.061
S-Sy	A	2744.30	9.59	-0.027
Al-S	A	872.78	6.54	-0.018
A-Sy	B	2108.27	6.20	-0.030
A-C-S	B	3166.33	17.97	-0.077
S-Sy	B	2283.77	1.14	-0.005
Al-S	B	1834.71	30.86	-0.116

a: Intercepto

\* El primer cultivo corresponde al semestre A

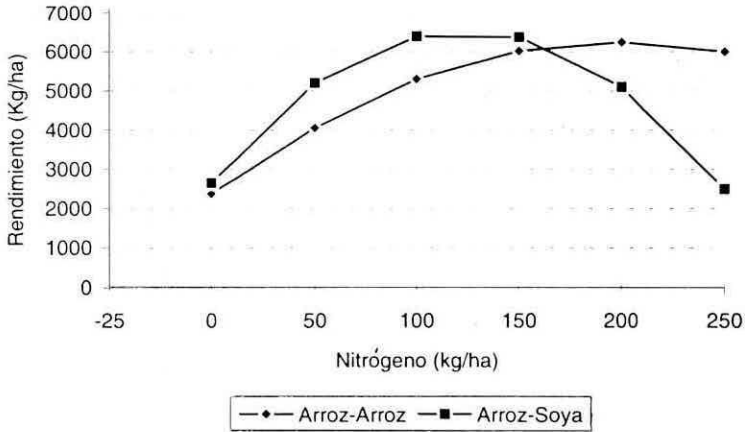


FIGURA 1. Comparación de funciones de producción. Fertilización nitrogenada para la rotación con base arroz. C.I. Nataima.

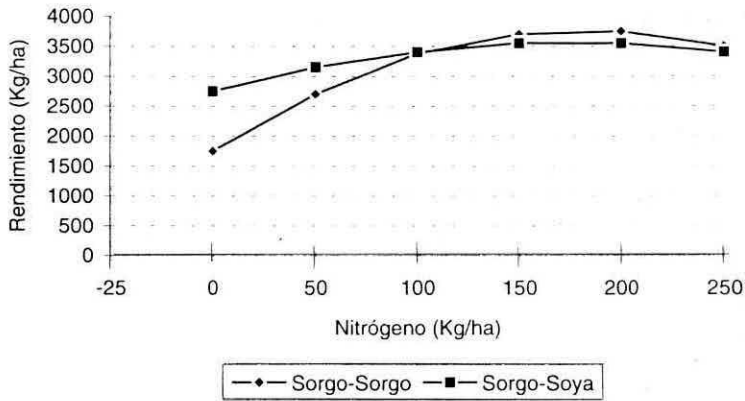


FIGURA 2. Comparación de funciones de producción. Fertilización nitrogenada para la rotación con base sorgo. C.I. Nataima.

Con las funciones citadas anteriormente se optimizó económicamente la cantidad de nitrógeno a utilizar, Tabla 6. La mayor eficiencia en el uso del nitrógeno se consiguió con la rotación S-Sy lo que concuerda con una mayor acumulación de materia orgánica en él; el segundo lugar lo ocupa la rotación arroz-soya y en ambos casos el cultivo de soya sule aproximadamente 60 kg de N-ha<sup>-1</sup>; según Varuel y Tood (10), aún se desconoce el mecanismo mediante el cual el cultivo de la soya aporta la citada cantidad de nitrógeno al suelo, para ser aprovechado por el cultivo subsiguiente.

**TABLA 6. Optimización económica de nitrógeno y rentabilidad para cada rotación. C.I. Nataima, 1995.**

Rotación	Semestre	N óptimo kg-ha <sup>-1</sup>	Rendimiento	Rentabilidad anual (%)
A-A	A	252	7372.59	88.4
	B	155	5640.92	
A-Sy	A	124	6548.81	197.3
	B	103	2428.60	
A-C-S	A	184	7084.40	114.2
	B	100	4193.33	
S-S	A	163	3715.40	64.1
	B	160	3822.94	
S-Sy	A	128	3577.32	188.14
	B	0	2283.77	
Al-S	A	160	1448.14	45.4
	B	122	3867.13	

Es necesario tomar con cuidado la extrapolación en rendimiento, cuando el nitrógeno óptimo es mayor a 150 kg-ha<sup>-1</sup> debido a que no se encuentra dentro de los rangos estudiados; los coeficientes de determinación estuvieron comprendidos entre 0.7 - 0.95.

En concordancia con la información anterior la mayor rentabilidad se obtuvo donde está involucrado el cultivo de soya

(S-Sy-A-Sy), seguida por la rotación en la que se incorpora crotalaria (A-C-S) como abono verde; este abono verde sule aproximadamente 60 kg-ha<sup>-1</sup> de nitrógeno al cultivo subsiguiente.

### Malezas

Dentro de la distribución de las principales malezas por rotación de cultivos, la considerada como más perjudicial es el coquito, debido a los efectos alelopáticos que presenta. Al comparar entre rotaciones, la mayor cantidad de coquito se encuentra en la rotación A-C-S, que se explica por la mayor cantidad de mecanización a que es sometido el suelo, para poder sembrar e incorporar el abono verde en el intersemestre; la remoción del suelo facilita la reproducción vegetativa del coquito aumentando drásticamente el nivel de infestación; en segundo lugar se encuentra la rotación S-S, lo cual explican Dale *et al* (3), por la presencia del monocultivo, que requiere de prácticas agronómicas repetitivas como son la labranza y el uso de herbicidas. Borresen *et al* (1), investigando en rotación de cultivos, labranza y aplicación de fertilizante no encontraron ninguna influencia de los tratamientos con nitrógeno sobre la distribución y cantidad de maleza. Tabla 7.

**TABLA 7. Dinámica de malezas por efecto de la rotación de cultivos. C.I. Nataima. 1995.**

Sistema	Coquito <i>C. rotundus</i> (L)	Guarda rocío <i>D. horizontales</i> (Willd)	Viernes Santo <i>Ph. niruri</i> (L)
A-A	22*	-	33
A-Sy	16	-	47
A-C-S	86	13	-
S-S	56	43	-
S-Sy	22	5	30
Al-S	28	70	-

\* % en 1 m<sup>2</sup>

## Biomasa

La producción de biomasa por cultivo, presenta diferencias estadísticas significativas y altamente significativas para las diversas cantidades de nitrógeno aplicado; estas cantidades son importantes debido a que son reintegradas al suelo en donde se recirculan los nutrientes a través de la actividad biológica por descomposición. Nueve toneladas de tamo de arroz aportan: 35 kg N, 20 Kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 120 kg k<sub>2</sub>O, 18 kg Ca, 12 kg Mg y 6 kg S. Seis toneladas de residuos de sorgo aportan: 34 kg N, 14 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 72 kg K<sub>2</sub>O, 21 kg Ca, 13 kg Mg y 5 kg S. Tabla 8.

**TABLA 8. Producción de biomasa (kg-ha<sup>-1</sup>). Rotación de cultivos. C.I. Nataima, 1994-1995.**

Cultivo	Nitrógeno (kg-ha <sup>-1</sup> )			
	0	60	120	180
Arroz**	6765 B	8972 B	12066 A	14684 A
Sorgo*	7276 B	8150 AB	11263 AB	11580 A
Soya*	2413 B	2383 B	2567 B	3962 A

\*\* Diferencias al 0.05 y 0.01 de probabilidad  
1 Prueba de Tukey 0.05

De lo anterior se deduce la importancia de incorporar al suelo estos residuos de cosecha. Campbell *et al*(2), explican el incremento de materia orgánica del suelo por una relación directa con la cantidad de residuos generados e incorporados y con un adecuado suministro de fertilizante nitrogenado.

## Rendimiento

El rendimiento durante los primeros cuatro años está consolidado en las funciones nitrógeno-rendimiento referidas en la Tabla 3. El último año se aplicó 10 kg-ha<sup>-1</sup> más de nitrógeno a los tratamientos preestablecidos a excepción del testigo; en el Semestre 1994B hubo diferencias altamente

significativas a la fertilización nitrogenada para el cultivo de arroz y significativas para la interacción rotación-fertilización en los cultivos de soya y sorgo. Tabla 9. Una vez realizada la prueba de Duncan a la citada interacción aparecen como mejores tratamientos las rotaciones A-Sy, S-Al y S-Sy, con niveles de fertilización comprendidos entre 60-180 kg-ha<sup>-1</sup>. Durante 1995 A, no se presentó interacción entre la rotación y la fertilización nitrogenada; en este período hubo diferencias altamente significativas a la aplicación de nitrógeno para los cultivos de arroz y sorgo, mientras el algodón no presentó significancia.

**TABLA 9. Comportamiento estadístico del rendimiento por especie en rotación. C.I. Nataima, 1994 B.**

Especie	P > F		
	Rotación	Fertilización	Interacción
Arroz	—	0.0010	—
Soya	N.S	0.0331	0.0293
Sorgo	0.001	0.0001	0.0298

La Prueba de Duncan permite establecer que para el cultivo de arroz cualquiera que sea su rotación es igual aplicar 120 ó 180 kg de N por hectárea; mientras el cultivo de sorgo tuvo una mejor respuesta al nivel de 180 kg de N.ha<sup>-1</sup>. Tabla 10.

La proyección de rendimientos a través de las funciones previamente discutidas se presenta en la Tabla 11 y se establece la respectiva comparación con los rendimientos reales, los que para la mayoría de rotaciones se alejan cada vez más de las cantidades esperadas; ésto significa que existe una caída en la producción del suelo a través del tiempo haciendo insostenibles las rotaciones de A-A, A-Sy, A-C-S y S-S. En la rotación de S-Sy existe un aumento notable en los rendimientos para todos los niveles de fertilización nitrogenada, obteniéndose

TABLA 10. Diferencias en rendimiento (15% H) por efecto de diversos niveles de nitrógeno. C.I. Nataima. 1995 A.

Cultivo	P > F	Nitrógeno (kg-ha <sup>-1</sup> )			
		0	60	120	180
Arroz	0.0001**	1468.5C <sup>1</sup>	3481.8 B	5154.0 A	5535.6 A
Sorgo	0.0052**	1981.4 B	2748.5 AB	2965.8 AB	3884.9 A
Algodón	0.3963 N.S	1308.5 A	1729.2 A	949.7 A	1656.2 A

\*\* , N.S, respectivamente: Significativo al 5%, al 1% y no significativo.

<sup>1</sup> Duncan, 0.05.

un promedio de aproximadamente 700 kg; aunque en la rotación S-AI, no se presenta un incremento notable es importante mencionar que en el semestre 1994B la producción de sorgo fue aproximadamente 500 kg-ha<sup>-1</sup> superior a lo proyectado; estos resultados indican que se trata de rotaciones verdaderamente sostenibles a través del tiempo. La información encontrada concuerda con la cantidad de materia orgánica y densidad aparente encontrada en el suelo, bajo los tratamientos en consideración.

TABLA 11. Comportamiento de la proyección de rendimientos (15%) para rotación de cultivos. C.I. Nataima, 1995 A.

Rotación	Rendimiento (kg-ha <sup>-1</sup> )		Diferencias*
	Obtenido	Estimado	
A-A	3741.8	4923.37	-1181.57
A-Sy	3731.7	5114.17	-1382.47
A-C-S	4256.4	5413.38	-1156.98
S-S	1832.7	2972.80	-1140.10
S-Sy	3957.5	3259.60	+ 697.90
S-AI	1410.9	1170.00	+ 240.00

\* Signo negativo indica rendimiento decreciente.

## Sostenibilidad

La matriz ambiental involucra tanto aspectos biofísicos, como socioeconómicos, considerados muy importantes con relación a las actividades del hombre. Los indicadores elegidos son: densidad aparente representativa de las condiciones físicas del suelo, materia orgánica de condiciones bioquímicas, coquito como la principal maleza que limita el buen crecimiento y desarrollo de los cultivos, optimización económica del nitrógeno como un componente económico, biótico y ambiental, la rentabilidad netamente económica, con repercusión social. Los valores calculados permiten establecer como mejor opción de rotación a través del tiempo a las rotaciones S-Sy, A-Sy y AI-S, sin embargo como se discutió en la introducción del presente artículo, sostenibilidad debe incluir aumento del rendimiento, por lo tanto la mejor opción está representada en la rotación S-Sy. El monocultivo como es de esperar sigue siendo la peor opción, similar situación ocurre con la rotación A-C-S, debido a las características que le imprime al suelo y a la proliferación de la maleza, comúnmente denominada coquito. Tabla 12.

**TABLA 12. Matriz de evaluación ambiental para cultivos en rotación. C.I. Nataima, 1990B-1995A.**

Rotación	Coquit				R	Total
	Da	M.O	o	No		
A-A	3	0	-3	-6	3	-3
A-Sy	9	6	9	3	9	36
A-C-S	-3	3	-9	3	9	3
S-S	9	6	3	-6	6	18
S-Sy	9	9	3	9	9	39
Al-S	9	9	3	0	6	27

La rotación S-Sy que ofrece hasta hoy el mejor comportamiento puede explicarse por el papel de la soya que según Varruel *et al*/(10), actúa como un almacén de nitrógeno evitando las pérdidas por lixiviación e igual situación sucede con el cultivo subsiguiente que por sus necesidades hídricas y hábitos de exploración radical no favorece pérdidas por este proceso.

En la rotación A-Sy la exigencia hídrica del cultivo favorece no solamente el proceso de lixiviación, sino el de volatilización y en ocasiones la denitrificación, lo que indudablemente marca la diferencia con la rotación discutida con anterioridad.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La rotación de cultivos constituye una necesidad conservacionista y de verdadera solución a la creciente necesidad de aumentos en rendimientos, para una sociedad en constante crecimiento.
2. La elección de rotaciones deberá hacerse en forma cuidadosa, tratando de conservar el frágil equilibrio existente en el suelo, entre las características físicas y la materia orgánica; de ello dependen todos los procesos bioquímicos, así como la acumulación y disponibilidad de nitrógeno.
3. El presente trabajo constituye solamente una primera aproximación en suelos con las características del Valle Cálido del Alto Magdalena, pero es necesario continuar este tipo de investigación ojalá con especies promisorias en cuanto a diversificación y sostenibilidad se refiere.
4. Los resultados aquí encontrados permiten concluir acerca de la importancia de las leguminosas en cualquier alternativa de rotación y el ahorro en cuanto a fertilización nitrogenada se refiere, ya que es una de las más costosas en el mundo. La optimización económica muestra la cantidad de nitrógeno a aplicar por rotación, sin necesidad de excederse o hacer una aplicación deficitaria.
5. No es necesario usar una sola rotación a través del tiempo, es posible realizar una combinación adecuada de ellas a través de los años, si se conoce en donde están los limitantes para cada una de ellas. Un ejemplo es el uso de crotalaria como abono verde, el cual es importante por el suministro de nitrógeno al cultivo subsiguiente, pero favorece el desarrollo de coquito y se deterioran las características físicas del suelo; luego hay necesidad de aplicar un mínimo de maquinaria en la incorporación y proyectar cultivos que al realizarles el respectivo control de malezas, tengan influencia sobre esta maleza.
6. La combinación de rotaciones debe involucrar S-Sy y Al-S, porque presentaron rendimientos crecientes a través del tiempo e incrementos notorios en el contenido de materia orgánica, que es considerada como la fuente de vida del suelo.
7. Se recomienda en ulterior investigación involucrar el cultivo de arroz, aplicando los métodos conservacionistas y de

- avanzada existentes hoy, para evitar el efecto negativo de algunos de los procesos citados y así ofrecer otras alternativas momentáneamente rentables, así como ambientalmente viables.
8. Debido a las condiciones climáticas severas de la región es recomendable mantener el suelo con algún tipo de cobertura vegetal durante el intersemestre, para favorecer la dinámica del nitrógeno y en general la actividad biológica del suelo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Borresen, T; Njos, A.** 1993. Ploughing and rotary cultivation for cereal production in a long-term experiment on a clay soil in southeastern Norway. 1. Soil properties. Soil and tillage research 28:97-108.
2. **Campbell, C; Zentner, R.** 1993. Soil organic matter as influenced by crop rotations and fertilization. Soil Sci. Soc.Am. J.57:1034-1040.
3. **Dale, J; Chandler.** 1979. Herbicide crop rotation for Johnson grass control. Weed Sci. 27; 479-485.
4. **Gómez, J.** 1967. Rotación y rendimiento en maíz. Agricultura Tropical. 24:4, 204-220.
5. **Jones, M; Sinclair, J.** 1988. Effects of bare following, previous crop and time of ploughing on soil moisture conservation in Botswana. Tropical Agriculture. 66: 1,54-60.
6. **Schneekloth, J; Klocke, N; Hergert, G; Martin, D; Clark, R.** 1991. Crop rotations with full and limited irrigation and dryland management. Am. Soc. of Agricultural Engineers. 36: 6,2372-2380.
7. **Thicke, F; Russelle, M; Hesterman, O; Sheaffer, C.** Soil nitrogen mineralization indexes and corn response in crop rotations. Soil Science V.156 No.5: 322-335.
8. **Thompson, M.** 1962. el suelo y su fertilidad. Editorial Reverté. Barcelona.
9. **Tisdale, L; Nelson, L.** 1966. Soil fertility and fertilizers. Second edition. The Macmillan Company. New York.
10. **Varuel, G; Tood, A.** Nitrogen Fertilizer Recovery by soybean in monoculture and rotation Systems. Agronomy Journal. 84: 215-218.
11. **Wax, M; Schoper, J.** 1984. Weed control and crop yields as affected by crop rotation, tillage, and levels of pest management. P.27. In Abstracts, 1983 mtgs, of the weed Sci. Soc. of Am. p.27.