

## Evaluación de la producción de palma de coco (*Cocos nucifera*) bajo fertirrigación con diferentes dosis de nitrógeno y potasio

Evaluation of the coconut palm (*Cocos nucifera*) production in function of rates of nitrogen and potassium applied via fertigation

Sammy Sidney Rocha Matías<sup>1</sup>, Boanerges Freire de Aquino<sup>2</sup> y José de Arimateia Duarte de Freitas<sup>3</sup>

### RESUMEN

El cultivo de coco variedad Anão viene creciendo en el Estado de Ceará (Brasil) como respuesta a la creciente demanda de este producto por las grandes industrias. El objetivo del presente estudio fue evaluar los efectos de dosis de nitrógeno y potasio sobre el número de flores femeninas, de frutos, de racimos, peso del fruto, volumen de agua del coco y sólidos solubles (°Brix), en palmas de coco variedad Anão verde de Jiqui, con 4 años de edad, aplicadas bajo fertirrigación en un suelo litoral. El trabajo fue desarrollado en un suelo Neossolo Quartzarênico distrófico en el período de enero a diciembre de 2003. El diseño experimental utilizado fue de bloques aleatorios, con 4 repeticiones, considerando 5 dosis de N y 5 de K combinadas. Con excepción del número de racimos por palma, los otros parámetros estudiados mostraron valores superiores de producción, en relación con la dosis aplicada. Los resultados más significativos, con relación a la máxima eficiencia de respuesta, para las variables número de flores femeninas, de fruto, peso del fruto, volumen de agua del coco y sólidos solubles totales, tuvo el tratamiento con 2,10 kg N y 3,50 kg K por planta y año que parece ser la dosis óptima en todas las variables analizadas.

**Palabras clave:** irrigación, nutriente, fertilidad.

### ABSTRACT

The culture of the dwarfed coconut palm has been growing in the Ceará State (Brasil) as a response of the growing demand for this product by the great industries. The objective of the present study was to evaluate the effects of nitrogen and potassium fertilizer rates on the number of female flowers, fruits, coconut clusters, fruit weight, coconut water content and °Brix, in a plantation of dwarfed coconut palm 'Anão verde de Jiqui' with 4 year old plants, applied via fertigation in a soil of the littoral region of the State of the Ceará. The experiment was conducted in a soil classified as Neossolo Quartzarênico dystrophic in the period between January and December of 2003. The statistical design was a randomized block with 4 replications consisted of combination of 5 rates N and 5 ones of K. With exception to the number of coconut clusters, all variables were higher than the production averages with relation to determined applied rate. The most significant results, in terms of maximum production responses, were related to the variables number of female flowers, coconut clusters, fruits, and °Brix, where the treatment with 2.10 kg N and 3.50 kg K per plant and year might be the optimal one for all studied variables.

**Key words:** irrigation, nutrient, fertility.

### Introducción

Una fuente de ingreso para más de 220 mil productores en Brasil es el cultivo de coco, cuyas áreas difícilmente superan las 10 ha. Cerca del 90% de estos productores se encuentran localizados en el litoral del nordeste brasileño (Censo Agropecuaria, 1996).

De acuerdo con Barbosa (1999, citado por Miguel Neto, 2005), en la zona rural del Estado de Paraíba (Brasil), caracterizada por una baja precipitación, los productores de coco alcanzan una producción cercana a 160 frutos por

palma al año, con una aplicación media de 200 L diarios de agua por palma. Según Silva *et al.* (2006), las fertilizaciones nitrogenadas y potásicas presentan impacto favorable para diferentes tipos de frutales, dado que además de aumentar la productividad también mejoran la calidad de los frutos producidos. En el caso específico del coco, Araújo (2001) observó que altas dosis de nitrógeno reducen el contenido de sólidos solubles totales en los frutos, mientras que altas dosis de potasio aumentan los sólidos solubles, por lo que se concluye que es importante considerar una adecuada relación de nitrógeno y potasio para la calidad de los frutos. Resultados alentadores también son reportados por

Fecha de recepción: octubre 29 de 2007. Aceptado para publicación: abril 9 de 2008

<sup>1</sup> Programa de Doctorado en Producción Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias - FCAV, Universidad Estatal Paulista, UNESP, Jaboticabal-SP, Brasil. ymmsa2001@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Profesor adjunto, Departamento de Suelos, Centro de Ciencias Agrarias, Universidad Federal de Ceará. aquino@ufc.br

<sup>3</sup> Investigador, Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza - Ceará. ari@cpat.embrapa.br

Malavolta *et al.* (1997), Aragão *et al.* (2002) y Ferreira Neto (2005) en palmas de coco, quienes comprobaron efectos positivos de dosis adecuadas de N y K, en el volumen de agua del coco, contenido de sólidos solubles totales y aumento de la producción de frutos. Ollagnier y Wahyuni (1984) reportaron que a pesar de que se ha demostrado la importancia de la fertilización de la palma de coco, así como una mayor rentabilidad para los agricultores sin aumentar el área, apenas 1% de las plantaciones de coco en el mundo se fertiliza correctamente.

Sobral (1997) afirma que para realizar un programa de fertilización en coco es necesario tener un estudio de suelos, donde el cultivo será establecido, asociado a otras características edafoclimáticas y de la palma.

El objetivo del presente estudio fue evaluar los efectos de dosis de N y K sobre la producción de coco variedad verde año, con 4 años de edad, aplicadas mediante fertirrigación en un suelo de la de la región litoral del Estado de Ceará (Brasil).

## Materiales y métodos

El trabajo fue desarrollado en un cultivo comercial de coco variedad Año establecido por Embrapa Agroindústria Tropical, localizado en las coordenadas geográficas 3° 17' de latitud sur, 39° 15' de longitud oeste y una altitud de 30 m, en el Estado de Ceará (Brasil), cerca del distrito de riego Curu - Paraipaba. El suelo de la zona de estudio presenta una textura arenosa, profundo, clasificado como Neossolo Quartzarênico distrófico (Embrapa, 1999). La región presenta un clima del tipo AW (tropical lluvioso) por la clasificación de Koppen (Tubelis y Nascimento, 1980).

El experimento fue realizado en una plantación de palmas de coco de 4 años de edad, de la variedad Año verde de Jiqui, provenientes del banco de germoplasma de la Estación de Jiqui, la cual pertenece a la Empresa de Pesquisa Agropecuária del Rio Grande del Norte (Emparn). Las palmas de coco se encontraban sembradas a una distancia de 7 m por 9,5 m, lo que da un total de 342 plantas en el área de estudio, de las cuales 102 se asumieron para efectos de borde, y se utilizaron 6 palmas por unidad experimental. Durante la realización de este estudio se evaluaron las siguientes características de la palma de coco: número de racimos por planta, contados en todas las palmas al inicio de la producción; número de frutos por palma, contando los frutos sanos cosechados por racimo; peso del fruto, de los frutos cosechados se escogieron aleatoriamente 3; número de flores femeninas; volumen de agua del coco de los frutos escogidos y, finalmente, determinación de los

sólidos solubles totales (°Brix), tomando una muestra de agua del coco, determinado con un refractómetro de mano, marca Kikuchi, con escala 0 a 30 °Brix.

La irrigación fue realizada con microaspersores y un emisor por palma instalado a 20 cm de la palma, con un caudal de 50 L·h<sup>-1</sup> y radio de alcance de 3 m. Las láminas aplicadas y el tiempo de irrigación fueron calculados considerando el porcentaje de evaporación del tanque tipo A. El contenido de agua en el suelo fue monitoreado mediante el uso de tensiómetros de mercurio, instalados a profundidades de 20, 40 y 60 cm, en el centro del experimento. La frecuencia de la fertirrigación fue semanal. Para cada tratamiento hubo una línea de distribución de agua, separada con un punto de inyección de fertilizantes en el inicio de cada línea. La inyección de la solución fertilizante fue realizada por una bomba inyectora de accionamiento hidráulico con capacidad para 50 L·h<sup>-1</sup> (modelo TMB WP-10).

Se realizaron 10 tratamientos, en los que se estudió la influencia de 5 dosis de N combinado con 5 dosis de K, de acuerdo con el modelo de la matriz experimental *Plan Puebla III*, modificado por Leite (1984). El experimento constó de un factorial 2<sup>k</sup>+2k+1+1 (donde k es el número de factores estudiados) y se definió un intervalo para N (150 a 2.850 g/palma-año) y K<sub>2</sub>O (250 a 4.750 g/palma-año), para lo que se utilizó como dosis base el tratamiento T9, que representó la dosis más recomendada para este cultivo (tabla 1). El diseño utilizado fue de bloques aleatorios, con 4 repeticiones, para un total de 40 unidades experimentales. Las dosis de N y K fueron divididas en parcelas iguales y distribuidas semanalmente mediante fertirrigación en la forma de urea (45% de N) y clorato de potasio (60% de KCl). También se aplicó fósforo y azufre, con una dosis de 220 y 250 g/palma-año, respectivamente, como un complemento recomendado a las dosis de N y K<sub>2</sub>O.

El análisis de varianza se realizó con el programa Sistema de Análisis Estadístico y Genético (SAEG). Las medias fueron comparadas por la prueba de Tukey con niveles de significancia de 1% y 5%. Las regresiones fueron obtenidas con base en el nivel de significancia.

La superficie de respuesta fue obtenida mediante el programa Statistical Analysis System (SAS), que reúne una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para la obtención de modelos y análisis de problemas en los cuales la variable de respuesta de interés es influenciada por un conjunto de variables exploratorias, y tiene por objetivo la optimización de la variable de respuesta (Montgomery, 1991); las mismas servirán de ajuste entre

**TABLA 1.** Niveles de la matriz y dosis de N y K<sub>2</sub>O calculadas de acuerdo con la matriz experimental Plan Puebla III, modificada por Leite (1984).

Tratamiento	Niveles		Dosis de N (g/planta-año)				Dosis de K <sub>2</sub> O (g/planta-año)			
	N	K <sub>2</sub> O	2000	2001	2002	2003	2000	2001	2002	2003
T1	-0,4	-0,4	180	360	540	900	150	300	720	1.500
T2	-0,4	0,4	180	360	540	900	350	700	1.680	3.500
T3	0,4	-0,4	420	840	1.260	2.100	150	300	720	1.500
T4	0,4	0,4	420	840	1.260	2.100	350	700	1.680	3.500
T5	-0,9	-0,4	30	60	90	150	150	300	720	1.500
T6	0,9	0,4	570	1.143	1.710	2.850	350	700	1.680	3.500
T7	-0,4	-0,9	180	360	540	900	25	50	120	250
T8	0,4	0,9	420	840	1.260	2.100	475	950	2.280	4.750
T9	0,0	0,0	300	600	900	1.500	250	500	1.200	2.500
T10	-0,9	-0,9	30	60	90	150	25	50	120	250

las cantidades de fertilizantes aplicadas y las características estudiadas. El interés es usar un modelo de regresión de segundo orden del tipo:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

Donde:

$\hat{Y}$ : variable de respuesta en estudio,

$\beta_0$ : constante del modelo,

$\beta_i$ : constante lineal asociado a la i-ésima variable estudiada,

$\beta_{ii}$ : constante cuadrático asociado a la i-ésima variable estudiada,

$\beta_{ij}$ : constante del producto cruzado asociado al producto de la i-ésima y j-ésima variables estudiadas,

$\varepsilon$ : error asociado al componente aleatorio.

El uso de los términos de segundo orden y los términos de los productos cruzados permite determinar la posible existencia de una curvatura en la superficie y admitir así la posibilidad de la localización de un punto óptimo (máximo o mínimo) dentro de la región experimental en estudio. Ante la no existencia de un punto óptimo, se acudió al criterio conocido como “punto de inflexión” o *saddle point*, y así identificar una superficie donde se presenta el cambio de concavidad. Esta es una opción adecuada para aquella región experimental específica, donde no es posible identificar un punto óptimo en la superficie resultante.

De manera semejante a los modelos de regresión, el modelo es evaluado a través del análisis de varianza, utilizando el test F-Snedecor, y la significancia de los términos del modelo polinomial fue evaluada a través de la prueba t-Student.

## Resultados y discusión

La tabla 2 muestra los resultados del análisis estadístico de las superficies de respuesta para las variables estudiadas, donde se verifica que hubo significancia en los modelos lineales y cuadráticos encontrados para el número de racimos (nc). En relación con las variables número de flores femeninas (nff), volumen de agua del fruto (va), apenas el modelo cuadrático fue significativo. Las variables número de frutos (nf), peso del fruto (pf) y sólidos solubles totales fueron significativas para los modelos lineal y producto cruzado (0,05%).

El número de flores femeninas de la palma de coco varió significativamente ( $P \leq 0,001$ ), de acuerdo con las dosis aplicadas de N y K. No se observaron interacciones entre dosis y el modelo cuadrático fue el que mejor ajuste presentó para los datos, como se observa en la figura 1, donde el punto óptimo para la formación de flores femeninas fue de 52,19 por inflorescencia, con dosis de 1,98 kg de N y 2,47 kg/planta-año de K. De la superficie de respuesta obtenida (figura 1) también se observa que, cuando aumenta la concentración de N y disminuye la concentración de K, el número de flores femeninas por inflorescencia disminuye. De acuerdo con FAO (1984) el potasio influye en la formación de flores femeninas de la palma de coco, con lo que se destaca la importancia de este nutriente durante la fase productiva. De acuerdo con este autor, la variedad de coco gigante produce de 20 a 40 flores por inflorescencia en condiciones normales, lo que evidencia un mayor número en la palma de coco variedad Anão. Ferreira Neto (2001) encontró que la producción de flores femeninas en condiciones de salinidad es de 240 flores femeninas por inflorescencia. De acuerdo con Marinho (2002), esta alta producción de

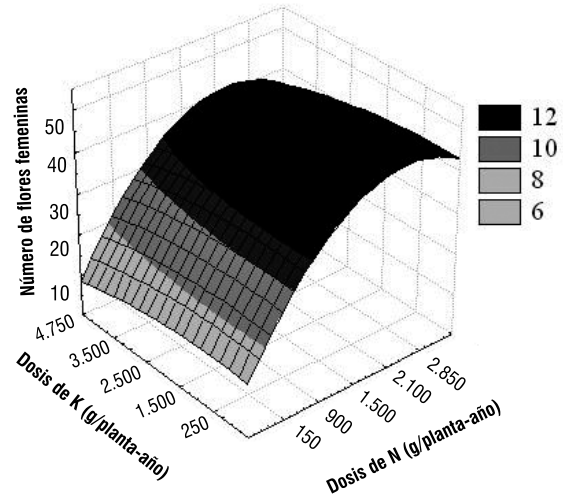
**TABLA 2.** Resultados del análisis estadístico de la superficie de respuesta para las variables estudiadas.

Número de flores femeninas				
Regresión	G.L.	Suma de cuadrados	F	P-valor
Lineal	2	2514.787844	18.54	<.0001 (**)
Cuadrático	2	1041.217906	7.67	0.0018 (**)
Producto cruzado	1	34.249106	0.50	0.4822 (ns)
Total modelo	5	3590.254856	10.59	<.0001 (**)
Número de frutos				
Regresión	G.L.	Suma de cuadrados	F	P-valor
Lineal	2	115.923073	8.80	0.0008 (**)
Cuadrático	2	38.603981	2.93	0.0669 (*)
Producto cruzado	1	0.006887	0.00	0.9744 (ns)
Total modelo	2	154.533941	4.69	0.0023 (**)
Número de racimos				
Regresión	G.L.	Suma de cuadrados	F	P-valor
Lineal	2	0.058807	3.73	0.0344 (*)
Cuadrático	2	0.010023	0.64	0.5359 (ns)
Producto cruzado	1	0.002723	0.35	0.5607 (ns)
Total modelo	5	0.071554	1.81	0.1364 (ns)
Peso del fruto				
Regresión	G.L.	Suma de cuadrados	F	P-valor
Lineal	2	60226	3.33	0.0480 (*)
Cuadrático	2	31367	1.73	0.1922 (ns)
Producto cruzado	1	31501	3.48	0.0708 (***)
Total modelo	5	123093	2.72	0.0359 (*)
Volumen de agua				
Regresión	G.L.	Suma de cuadrados	F	P-valor
Lineal	2	10436	7.37	0.0022 (**)
Cuadrático	2	1765.448404	1.25	0.3003 (**)
Producto cruzado	1	1939.746028	2.74	0.1071 (***)
Total modelo	5	14141	3.99	0.0059 (**)
Sólidos solubles totales				
Regresión	G.L.	Suma de cuadrados	F	P-valor
Lineal	2	0.255453	9.33	0.0006 (**)
Cuadrático	2	0.081279	2.97	0.0647 (*)
Producto cruzado	1	0.041792	3.05	0.0896 (ns)
Total modelo	5	0.378524	5.53	0.0008 (**)

\* = significativo al 5%, \*\* = significativo al 1%, \*\*\* = significativo al 10%, ns = no significativo.

flores no indica necesariamente que la palma de coco irá a producir más frutos por planta. La media de flores obtenida en el estudio realizado por Marinho (2002) fue de 42,54, valor que se considera adecuado. Según Miranda Júnior (1948), la palma de coco presenta una variación de flores femeninas por inflorescencia entre 40 y 60, y las flores femeninas son más inestables que las flores masculinas. Fremond (1966) afirma que esta variación, en el número de flores femeninas en relación con las flores masculinas, está

$$\hat{Y} = 21,3737 + 0,0322(N) - 0,0008(K_2O) - 9,3478E-6(N^2) + 1,9751E-6(N*K_2O) - 6,3813E-7(K_2O^2)$$

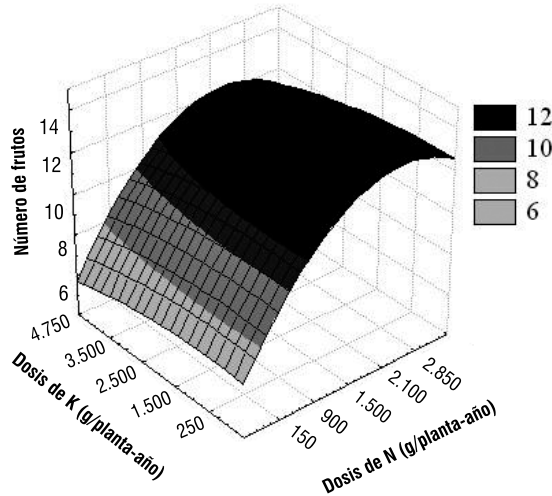


**FIGURA 1.** Superficie de respuesta del número de flores femeninas de la palma de coco variedad Año verde de Jiqui, con 3 años de edad, en función de la dosis de N y K. Significativo al 1%.

ligada a condiciones desfavorables de humedad durante el desarrollo de la inflorescencia, por lo que se evidencia que la palma de coco requiere permanentemente de condiciones óptimas de humedad, una vez que hay emisión constante de inflorescencias en la palma.

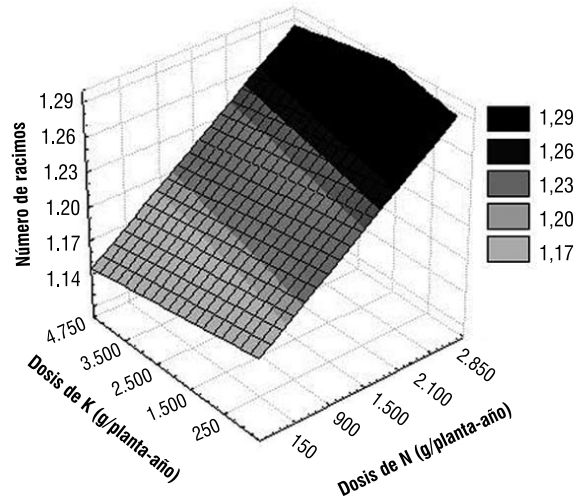
Se presentó influencia significativa ( $P \leq 0,001$ ) para dosis de N y K sobre el número de frutos por planta, ajustándose al modelo cuadrático, (figura 2), donde se alcanza el mayor número de frutos (13,53) con dosis de 2,21 kg de N y de 2,85 kg de K/planta-año. Los valores representados en la figura 2 indican que hubo una variación en el número de frutos por planta de 6 a 12, alcanzando una media de 11,26; valor considerado satisfactorio cuando se compara con los resultados reportados por Miranda *et al.* (1999) quienes obtuvieron 11,20 frutos en la región litoral del Estado de Ceará. Miguel Neto (2005) también estudió la productividad de esta misma variedad de coco, pero en condiciones edafoclimáticas diferentes, y reportó que la dosis para obtención máxima de producción de frutos por planta fue de 2,35 kg de N y de 2,91 kg de K/planta-año, donde la más económica mediante fertirrigación fue de 2,24 kg de N y 2,79 kg de K/planta-año. Con los resultados presentados en la figura 2, se obtiene que el aumento de la dosis de K incrementa la producción, resultado similar encontrado por Manciot *et al.* (1980), Ollagnier y Wahyuni, (1984), Irho (1989) y Lins (2000). Estos autores también afirman que el K afecta la producción de frutos del coco variedad año a partir del cuarto año de establecimiento del cultivo. Por otra parte, Ollagnier y Wahyuni (1984) y Lins (2000),

$$\hat{Y} = 6,6187 + 0,0062(N) - 0,0001(K_2O) - 1,3963E-6(N^2) - 3,0189E-8(N*K_2O) - 6,3897E-8(K_2O^2)$$



**FIGURA 2.** Superficie de respuesta del número de frutos de la palma de coco variedad Anão verde de Jiqui, con 3 años de edad, en función de la dosis de N y K. Significativo al 1%.

$$\hat{Y} = 1,1722 + 4,6538E-5(N) - 5,4984E-6(K_2O^2)$$



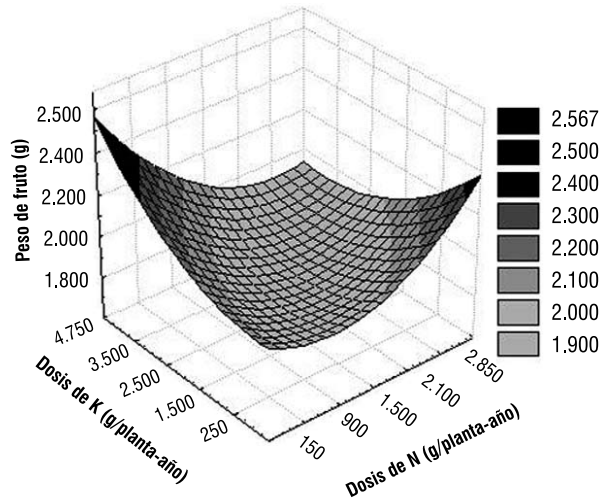
**FIGURA 3.** Superficie de respuesta del número de racimos de la palma de coco variedad Anão verde de Jiqui, con 3 años de edad, en función de la dosis de N y K. Significativo al 1%.

al trabajar con palmas de coco híbridas durante 10 años y evaluar diferentes dosis de N, observaron que no hubo influencia de este nutriente en la producción de coco. En otro estudio realizado por Bezerra (2002), en condiciones similares al presente estudio, bajo irrigación, obtuvo una media de 270 frutos/planta en el tercer año de producción, usando dosis de 2,0 kg de N y 3,3 kg de K/planta-año.

El número de racimos de coco aumentó linealmente con las dosis de N y K, donde el N fue responsable del mayor incremento (figura 3). El número de racimos obtenidos con las dosis de N y K varió de 1 a 1,5, obteniéndose una media de 1,23. Se observó que el tratamiento 6 (2,85 kg de N y 3,50 kg de K/planta-año) presentó un aumento más significativo, alcanzando una media máxima de 1,27 racimos/planta, siendo que los menores valores obtenidos se presentaron con el tratamiento 5 (0,15 kg de N y 1,50 kg de K/planta-año), indicando que el K interviene en la formación de racimos en la planta. Los valores medios obtenidos en este estudio fueron considerados satisfactorios al compararlos con los obtenidos por Miranda *et al.* (1999), que obtuvieron 1,35 racimos/planta, en condiciones similares.

La superficie de respuesta para al variable peso del fruto mostró que hubo efecto significativo ( $P \leq 0,001$ ) cuando el modelo cuadrático fue adoptado. El peso del fruto alcanzó el punto máximo de respuesta con dosis de 1,85 kg de N y 2,81 kg de K/planta-año, con un valor de 1,86 kg/fruto. El valor medio encontrado en este estudio fue de 1,94 kg/fruto. Este valor está de acuerdo con el observado por Miranda *et*

$$\hat{Y} = 2038,6418 - 0,1755(N) - 0,0134(K_2O) + 9,6814E-5(N^2) - 6,5113E-8(N*K_2O) + 2,3856E-5(K_2O^2)$$



**FIGURA 4.** Superficie de respuesta del peso del fruto de la palma de coco variedad Anão verde de Jiqui, con 3 años de edad, en función de la dosis de N y K. Significativo al 1%.

*al.* (1999) que reportan un valor 1,88 kg/fruto para el coco variedad año verde del Jiqui en el Estado de Ceará.

El volumen de agua del coco fue influenciado significativamente ( $P \leq 0,001$ ) con el incremento de las dosis (figura 5), donde los datos se ajustaron al modelo cuadrático. El valor máximo del volumen de agua del coco fue de 409,90 mL/fruto, valor significativo para esta variable en las condiciones del experimento, el cual se alcanzó con dosis

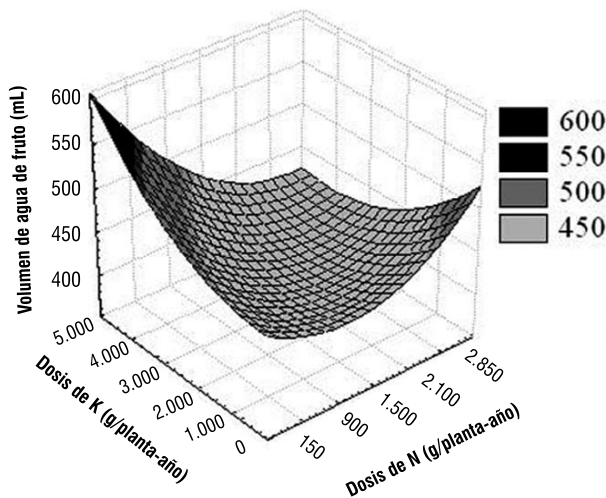
de 2,13 kg de N y de 3,00 kg de K/planta-año. También se observó que los valores medios variaron de 420 a 500 mL/fruto, valores superiores a los reportados por Aragão *et al.* (2001), Emparn (2001) y Camboim Neto (2002), de 394,65; 258,00 y 384,26 mL/fruto, respectivamente, en un estudio similar a este.

Hubo efecto significativo ( $P \leq 0,001$ ) para la variable SST ( $^{\circ}$ Brix), donde los datos se ajustaron a un modelo cuadrático. Los SST presentaron valores entre 5,81 y 6,05  $^{\circ}$ Brix, con una media de 5,91  $^{\circ}$ Brix (figura 6). Estos valores coinciden con los encontrados por Tavares *et al.* (1998) y Silva *et al.* (2006), quienes obtuvieron una variación de 5,2 a 8,9  $^{\circ}$ Brix y de 5,64 a 5,88  $^{\circ}$ Brix, respectivamente. La superficie de respuesta para esta variable fue obtenida con las cantidades de nutrientes de 1,93 kg de N y de 2,48 kg de K/planta-año alcanzando un valor máximo de 6,02  $^{\circ}$ Brix (figura 6). De acuerdo con Miguel Neto (2005), valores superiores a 6,0  $^{\circ}$ Brix proporcionan un sabor más agradable y una mayor aceptación del consumidor. Los mayores valores de SST fueron encontrados en el tratamiento 4 (dosis de 2,10 kg de N y 3,50 kg de K/planta-año), con un valor máximo de 6,05  $^{\circ}$ Brix. Este mismo valor fue encontrado por Miranda *et al.* (1999) que estudiaron la palma de coco bajo riego en el Estado de Ceará.

## Conclusiones

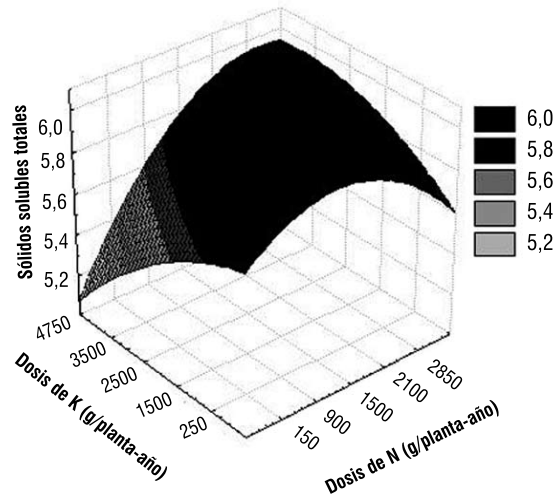
- Aplicaciones de N y K afectan positivamente, al alcanzarse valores óptimos de respuestas de las variables estudiadas, a excepción del número de racimos de coco por planta.

$$\hat{Y} = 467,3318 - 0,0512(N) - 0,002(K_2O) + 2,3412E-5(N^2) - 1,6149E-8(N*K_2O) + 6,0596E-6(K_2O^2)$$



**FIGURA 5.** Superficie de respuesta del volumen de agua de la palma de coco variedad Jiqui, con 3 años de edad, en función de la dosis de N y K. Significativo al 1%.

$$\hat{Y} = 5,7819 + 0,0003(N) - 5,0711E-5(K_2O) - 1,2142E-7(N^2) + 6,9605E-8(N*K_2O) - 1,8171E-8(K_2O^2)$$



**FIGURA 6.** Superficie de respuesta de los sólidos solubles totales ( $^{\circ}$ Brix) de la palma de coco variedad Jiqui, con 3 años de edad, en función de la dosis de N y K. Significativo al 1%.

- El tratamiento con 2,10 kg de N y 3,50 kg de K/planta-año en plantas con cuatro años de edad, fue el que presentó cantidades de nutrientes más próximas a las ideales, para obtener la máxima eficiencia de respuesta de las variables, número de flores femeninas, número de frutos, peso del fruto, volumen de agua del coco y sólidos solubles totales.

## Literatura citada

- Aragão, W.M., J.M. Resende, E.M. Cruz de O., C. Reis dos S., O.J. Saggin Júnior, J.A. Alencar, W.A. Moreira, F.R. de Paula y J.M.P. Lima Filho. 2002. Fruto do coqueiro para consumo natural. pp. 19-25. En: Aragão, W.M. (ed.). Coco pós-colheita. Cap. 3. Embrapa-CTATC, Brasília.
- Aragão, W.M., E.M.O. Cruz y J.S. Hevlécio. 2001. Caracterização morfológica do fruto e química da água de coco em cultivares de coqueiro anão (*Coco nucifera* L. var. Nana). Revista Agrotropica 13(1), 56-70.
- Araújo, R. da Costa. 2001. Produção, qualidade de frutos e teores foliares de nutrientes no maracujazeiro amarelo em resposta à adubação potássica. 2001. 103f. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Bezerra, J.W.T. 2002. Efeito da frequência de irrigação no desenvolvimento radicular e produção do coqueiro anão. Fortaleza, 2002. 64 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará.
- Camboim Neto, L. de F. 2002. Coqueiro anão verde: influencia de diferentes lâminas de irrigação e de porcentagens de área molhada no desenvolvimento, na produção e nos parâmetros físico-químicos do fruto. Viçosa, 2002. 121 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará.

- Censo Agropecuário. 1996. Instituto Brasileiro de Geografia. En: [http:// www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br); consulta: 15 de octubre de.2004.
- Embrapa. 1999. Sistema de Classificação de Solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro. 412 p.
- Emparn. 2001. Característica física do fruto e composição química da água de coco de cultivares anão verde do Jiqui, anão amarelo e híbridos PB 121 aos 5, 6, 7, 8 e 9 meses de idade. En: Semana Internacional da Fruticultura, Floricultura e Agroindústria.
- FAO. 1984. Coconut tree of life. Plant production and protection, paper 57. FAO, Roma. 446 p.
- Ferreira Neto, M. 2001. Desenvolvimento e produção do coqueiro sob diferentes salinidades de água de irrigação. Dissertação (Mestrado). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 88 p.
- Ferreira Neto, M. 2005. Doses de N e K aplicadas via fertirrigação na cultura do coqueiro-anão (*Cocos nucifera* L.) anão. 2005. 119 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Fortaleza. 2001. O cultivo do coqueiro "Mini-curso". 102 p.
- Fremond, Y., R. Ziller y M.N. Lamothe. 1966. El cocotero: técnicas agrícolas y producciones tropicales. Editorial Blume, Barcelona. 236 p.
- Leite, R. A. 1984. Uso de matrizes experimentais e de modelos estatísticos no estudo de equilíbrio fósforo-enxofre na cultura da soja em amostras de dois Latossolos de Minas Gerais. Tese Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. 87 p.
- Irho. Rapport d'activité. 1989. Oléagineux 44(4), 1-22.
- Lins, P.M.P. 2000. Reposta do coqueiro (*Cocos nucifera* L.) à aplicação de N, P, K e Mg nas condições edafoclimáticas de Moju-PA. Belém 81p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciência Agrária do Pará.
- Malavolta, E., G.C. Vitti y S.A. de Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas. Potafos, Piracicaba. 319 p.
- Manciot, R., M. Ollagnier y R. Ochs. 1980. Nutricion mineral y fertilizacion del cocotero em la mundo. Oléagineux 35(1), 13-27.
- Marinho, F.J.L. 2002. Germinação, crescimento e desenvolvimento do coqueiro anão verde sob estresse salino. Tese (Doutorado). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 196 p.
- Miguel Neto, F. 2005. Doses de N e K aplicadas via fertirrigação na cultura do coqueiro (*Cocos nucifera* L.) anão. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 119 p.
- Miranda Júnior, J.P. 1948. Coqueiro anão. Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro. 57 p.
- Miranda, F.R., V.H. Oliveira y A.A.T. Montenegro, 1999. Desenvolvimento e precocidade de produção do coqueiro anão (*Cocos nucifera* L.) sob diferentes frequências de irrigação. Agrotrópica 11(2), 71-76.
- Montgomery, D.C. 1991. Designs and analysis of experiments. 3<sup>rd</sup> edition. John Wiley, Nueva York. 649 p.
- Ollagnier, M. y M. Wahyuni. 1984. Mineral nutrition and fertilization of the Malayan Dwarf x west African Tall (PB-121-MAWA) hybrid coconut. Oléagineux 39, 8-9.
- Silva, R.A.L. da, L.F. Cavalcante, J.S. Holanda, W.E. Pereira, M.F. Moura y F. Miguel Neto. 2006. Qualidade de frutos do coqueiro-anão verde fertirrigado com nitrogênio e potássio. Revista Brasileira de Fruticultura 28(2), 310-313.
- Sobral, L.F. 1997. Nutrição e adubação do coqueiro. En: Ferreira, J.M.S., D.R.N. Warwick y L.A. Siqueira (eds.). A Cultura do coqueiro no Brasil. pp. 129-154. 2 ed., ver. ampl. Embrapa-SPI, Brasília y Embrapa-CPATC, Aracaju.
- Tavares, M. 1998. Estudo da composição química da água de coco anão verde em diferentes estágios de maturação. pp. 1262-1265. En: Anais Congresso Brasileiro de Ciencia e Tecnologia de Alimentos, Rio de Janeiro. SBCTA 2.
- Tubelis, A. y F.J.L. Nascimento. 1980. Meteorologia descritiva. Editora Nobel, São Paulo. 374 p.

# Caracterización física de los suelos sulfatados ácidos del Distrito de Riego del Alto Chicamocha (Boyacá) y su aplicación al manejo\*

Physical characterization of acid sulfate soils from the irrigation district of Alto Chicamocha (Boyaca) and its application to soil management

Álvaro H. Rincón<sup>1</sup>, Hugo E. Castro<sup>2</sup> y Manuel I. Gómez<sup>3</sup>

## RESUMEN

Se evaluaron las propiedades físicas de los Suelos Sulfatados Ácidos (SSA) del Distrito de Riego del Alto Chicamocha, con el fin de determinar sus limitantes de tipo físico, su relación con las propiedades químicas y, con base en su identificación, establecer el tipo de manejo adecuado en riego, drenaje y labranza. Para lograrlo, el Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales (GISSAT), de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, realizó un levantamiento de suelos en el que identificó, describió y clasificó sistemáticamente cinco perfiles modales de SSA, en los cuales determinó la densidad real y aparente, porosidad, textura, estabilidad estructural, consistencia, módulo de ruptura, constantes de humedad y conductividad hidráulica para sus dos primeros horizontes. Los resultados más relevantes indican que los SSA se encuentran limitados por alta plasticidad, moderada a baja estabilidad estructural en horizontes orgánicos; altos contenidos de arcillas en horizontes minerales, que en conjunto afectan la distribución de poros, retención de humedad y capacidad de aireación, sumado a una profundidad efectiva limitada por la presencia de horizontes sulfúricos y nivel freático fluctuante, situación que permite deducir las prácticas de manejo del medio físico de los SSA para su recuperación y explotación sostenible.

**Palabras clave:** suelos ácidos, limitantes físicas de suelos.

## ABSTRACT

The physical properties of Acid Sulfate Soils (ASS) from the irrigation district of Alto Chicamocha were evaluated in order to determine soil physical limitants, their relationship with chemical properties and, when being identified, establish the proper management for irrigation, drainage, and tillage. In order to achieve this goal, an Interinstitutional Group for Investigation on ASS (GISSAT) of the Pedagogical and Technological University of Colombia conducted a soil survey to identify, describe, and classify systematically five soil profiles by determining real and bulk densities, porosity, particle size distribution, structural stability, consistency, rupture module, moisture constants, and hydraulic conductivity in the upper horizons. The most relevant results show that ASS are limited by high plasticity, moderate or low structural stability in organic horizons, high clay contents in mineral horizons, which as a whole influence the pore distribution, moisture retention, and soil aeration. Furthermore these soils present shallow rooting depths due to the presence of sulfuric horizons and high water tables, the situation that allows establishing practices of physical management of ASS in order to recuperate them and obtain a sustainable usage.

**Key words:** acid soils, soil physical limitants.

## Introducción

El Distrito de Riego del Alto Chicamocha es actualmente uno de los más importantes del oriente colombiano; cuenta con 11.300 ha, de las cuales, según el Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales (GISSAT, 2005), 2.756 ha se encuentran bajo la influencia de Suelos Sulfatados Ácidos (SSA), algunos de ellos con presencia de sales y sodio. El manejo de estos suelos se ve afectado por los altos costos que demanda su recuperación y el desconocimiento general que de sus pro-

piedades tienen tanto los productores como los asistentes técnicos de la zona.

A partir del año 2003, el GISSAT ha venido desarrollando una importante labor dirigida al conocimiento, recuperación y manejo de este tipo de suelos. Parte de estas investigaciones ha sido encaminada hacia el estudio de sus propiedades físicas con el fin de buscar el mejoramiento de prácticas de labranza, riego y drenaje, principalmente. Los SSA están constituidos por materiales ricos en sulfuros, cuya aireación produce el descenso del pH hasta niveles

Fecha de recepción: agosto 3 de 2007. Aceptado para publicación: abril 9 de 2008

\* Contribución del Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales, categoría B Colciencias. gissat@tunja.uptc.edu.co

<sup>1</sup> Ingeniero agrónomo, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. alher\_1@msn.com

<sup>2</sup> Profesor asociado, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica Tecnológica de Colombia, Tunja. hcastrofranco@yahoo.com.mx

<sup>3</sup> Director de Investigación Microfertilisa W.F., Bogotá. migomez@microfertilisa



no tolerables por las plantas. La extrema acidez generada en estos medios tiene implicaciones determinantes en la fertilidad de los suelos y afecta de manera directa sus propiedades físicas.

La presente investigación compila los procedimientos, resultados e interpretación analítica de la caracterización de las propiedades físicas de SSA, realizada sistemáticamente a perfiles modales georreferenciados en el estudio semidetallado de SSA del Distrito de Riego del Alto Chicamocha (GISSAT, 2005). Los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento e identificación de las limitaciones físicas más relevantes de los SSA para la producción agrícola en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha y aporta criterios de interpretación para el mejor entendimiento de las labores técnicas involucradas en su recuperación y manejo.

## Materiales y métodos

El estudio fue realizado durante el periodo 2004-2005 en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha, localizado en el área de influencia de los municipios de Paipa, Duitama, Santa Rosa de Viterbo, Tibasosa, Nobsa y Sogamoso, en la zona central del departamento de Boyacá, a una altura promedio de 2.500 msnm. El Distrito de Riego del Alto Chicamocha posee un área total de 11.300 ha, con una superficie neta cultivable de 7.335 ha, beneficiadas con obras de adecuación de tierras. El área de estudio consta de 2.756 ha, dentro de las cuales se encuentran los suelos con características sulfatadas ácidas, distribuidos en las unidades de riego Vargas, Duitama, Ayalas, San Rafael, Cuche, Las Vueltas, Tibasosa y Moniquirá (GISSAT, 2004 y 2006).

Se realizó la caracterización física en los dos primeros horizontes de cinco perfiles modales de SSA, identificados en el levantamiento de suelos escala 1:25.000 realizado por el GISSAT en el 2005, y clasificados taxonómicamente (Keys to Soil Taxonomy, 2006) como *Sulfic Endoaquepts*, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica (fase moderadamente profunda); *Typic Sulfaquepts*, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica (fase superficial); *Terric Sulfosaprists*, familia ferrihúmica, dística, isomésica, micro (fase ultra ácida, ligeramente salina); *Typic Sulfohemists*, familia ferrihúmica, dística isomésica, micro (fase ultra ácida, encharcable) y *Typic Sulfihemists*, familia dística, isomésica, shallow (fase salino sódica). Los dos primeros taxones corresponden a SSA de origen mineral y los tres últimos a SSA de origen orgánico.

Se tomaron muestras sin disturbar en bloques de aproximadamente 1 kg, en cada horizonte, las cuales se empacaron

herméticamente en papel aluminio y plástico con el fin de no alterar durante el transporte su estructura original.

Las pruebas realizadas a los dos primeros horizontes de los perfiles modales antes descritos fueron: distribución de tamaño de agregados por tamizado en seco y estabilidad de agregados en húmedo, en tamices de 6,3 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm y 0,5 mm de apertura de malla; textura y granulometría por el método de la pipeta; consistencia por determinación de los límites de Atterberg; densidad aparente y real por el método del terrón parafinado y del picnómetro, respectivamente; porosidad, por curvas características de humedad; módulo de ruptura, por medio del aparato de ruptura; conductividad hidráulica saturada, por permeámetro de carga constante, teniendo en cuenta las metodologías del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2006) y Amézquita *et al.* (1993). Adicionalmente, se evaluó el comportamiento de la humedad del suelo para hallar capacidad de campo a nivel de campo, por el método de las curvas de humedecimiento (Castro, 1998), y se determinó el punto de marchitez permanente por el método del girasol para el primer horizonte de cada perfil, descrito por el IGAC (2006).

## Resultados y discusión

### Densidad aparente, real y porosidad

Teniendo en cuenta los contenidos de materia orgánica, su grado de descomposición, los contenidos de arcilla y de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, la densidad aparente en los SSA objeto de estudio fluctuó entre 0,18 y 1,29 g·cm<sup>-3</sup>. Las densidades aparentes más bajas se encontraron en los horizontes orgánicos y las más altas en los horizontes minerales de textura fina con mal drenaje e influenciadas por óxidos e hidróxidos de hierro. La densidad real varió entre 1,6 y 2,5 g·cm<sup>-3</sup> siendo baja en los horizontes orgánicos y más alta en los horizontes minerales con influencia de óxidos de hierro y aluminio. La porosidad total osciló entre 45% en horizontes minerales y más del 80% en horizontes orgánicos.

Con respecto a la porosidad total, se encontró que sus valores están alrededor del 50% en los perfiles *Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts*, y valores mayores al 60% en los demás perfiles.

En general, los contenidos de macroporos en los SSA son adecuados para permitir el paso rápido del agua a través del perfil, condición importante en SSA para las labores de drenaje, ya que estos suelos se encuentran en las áreas planas del Distrito de Riego influenciadas por la presencia de un nivel freático fluctuante.

**TABLA 1.** Valores de densidad aparente, densidad real y porosidad en SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (taxonomía)	Horizonte		Da (g·cm <sup>-3</sup> )	Dr (g·cm <sup>-3</sup> )	Pt (%)	Macroporos (%)	Microporos (%)
	Nom.	Espesor (cm)					
Sulfic Endoaquepts (Cód.: PSMi -05)	Ap	0-10	1,01	2,07	51,20	17,31	33,88
	Bwg	10-55	1,20	2,39	49,77	21,21	28,65
Typic Sulfaquepts (Cód.: PSDu -01)	Ap	0-12	1,07	2,28	52,81	27,33	25,83
	Bwg	12-32	1,25	2,39	47,46	11,52	36,25
Terric Sulfosaprists (Cód.: PSVu -03)	Aj	0-15	1,18	2,28	48,04	14,68	33,67
	Oaj	15-35	0,67	2,03	67,00	14,71	52,29
Typic Sulfohemists (Cód.: PSVa -02)	Aj	0-10	0,82	2,15	61,86	16,15	45,71
	Oaj	10-37	0,36	1,65	78,16	20,24	57,93
Typic Sulfihemists (Cód.: PSVu -04)	Oay	0-25	0,23	1,9	87,80	24,26	63,53
	Oey	25-70	0,21	1,83	88,37	24,30	64,07

Da: densidad aparente; Dr: densidad real; Pt: porcentaje de poros totales. Cód.: código del perfil georreferenciado en estudio semidetallado de suelos (GISSAT, 2005).

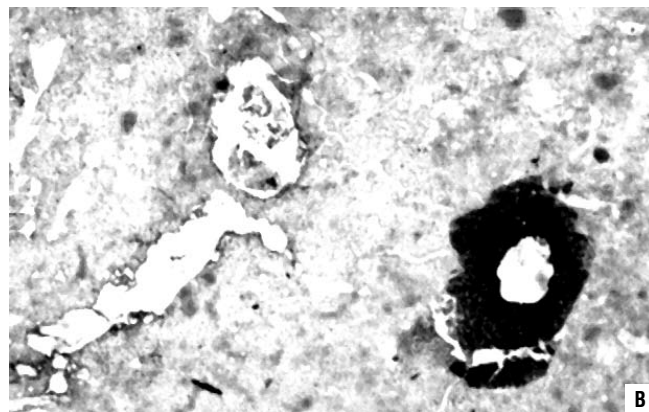
La microporosidad adquiere su importancia en la relación que guardan los fenómenos de capilaridad en este tipo de suelos. De esta manera, se observa que los SSA presentan contenidos de microporos altos, los cuales favorecen la conducción de agua capilar desde el nivel freático hasta la superficie. Esto es importante, porque cuando el agua freática asciende a los horizontes superficiales, ocupa la mayor parte del espacio poroso, manteniendo el suelo con altos contenidos de humedad durante las épocas secas y favoreciendo su saturación y encharcamiento con pocas precipitaciones en las épocas húmedas del año.

Otra condición notable en la porosidad del suelo es la registrada en los análisis de sección delgada (Gómez, 2006), en los cuales se observa la acumulación de óxidos e hidróxidos de hierro y jarosita en los poros de los agregados y en los canales de las raíces (figura 1), causando el taponamiento de los poros intraagregado y limitando su macroporosidad a los canales existentes entre las caras de los pedis.

En conclusión, la porosidad en los SSA aunque es adecuada para permitir una buena relación entre capacidad de aireación y retención de humedad en la zona de raíces, es también afectada por la influencia del nivel freático salino ácido a poca profundidad, que influye en la disolución de óxidos de hierro y su precipitación en las cavidades y poros intra e interagregados, además de determinar sus condiciones actuales de drenaje lento y encharcamientos ocasionales durante el año.

#### Distribución de tamaño de agregados

De acuerdo con la figura 2, para los SSA la distribución por tamaño de agregados muestra que en condiciones de suelo seco, los mayores porcentajes de participación en el suelo corresponden a agregados con diámetro superior a 2 mm. Esto se explica porque la zona ha sido muy poco utilizada en labores agrícolas intensivas, siendo áreas dedicadas a pastoreo, razón por la cual el manejo físico no ha tenido repercusiones importantes en degradación de la estructura.



**FIGURA 1.** Precipitados de óxidos de hierro y jarosita en los poros de los SSA *Typic Sulfaquepts* y *Sulfic Endoaquepts*. Microfotografías de sección delgada a) Horizonte Bgj en *Sulfic Endoaquepts* b) Horizonte Bwg en *Typic Sulfaquepts* (GISSAT, 2005).

Si se tiene en cuenta la participación de agregados, los D50 se encuentran alrededor de los 2 y 5 mm de diámetro. Al tomar los parámetros de distribución de agregados en húmedo (figura 3), la distribución cambia, ya que en los agregados, las partículas pierden su cohesión al ser humedecidas. Los valores de D50 disminuyen, presentándose agregados con diámetros menores a 0,5 mm, evidenciando la pobre estabilidad de los agregados en los suelos orgánicos

con influencia salina. El comportamiento de la distribución de agregados en húmedo y su comparación con los agregados en seco, muestra en los suelos *Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts* un comportamiento similar, dando a entender una mejor condición estructural de estos dos suelos y una mayor resistencia de los agregados del suelo a la acción de agentes dispersivos externos.

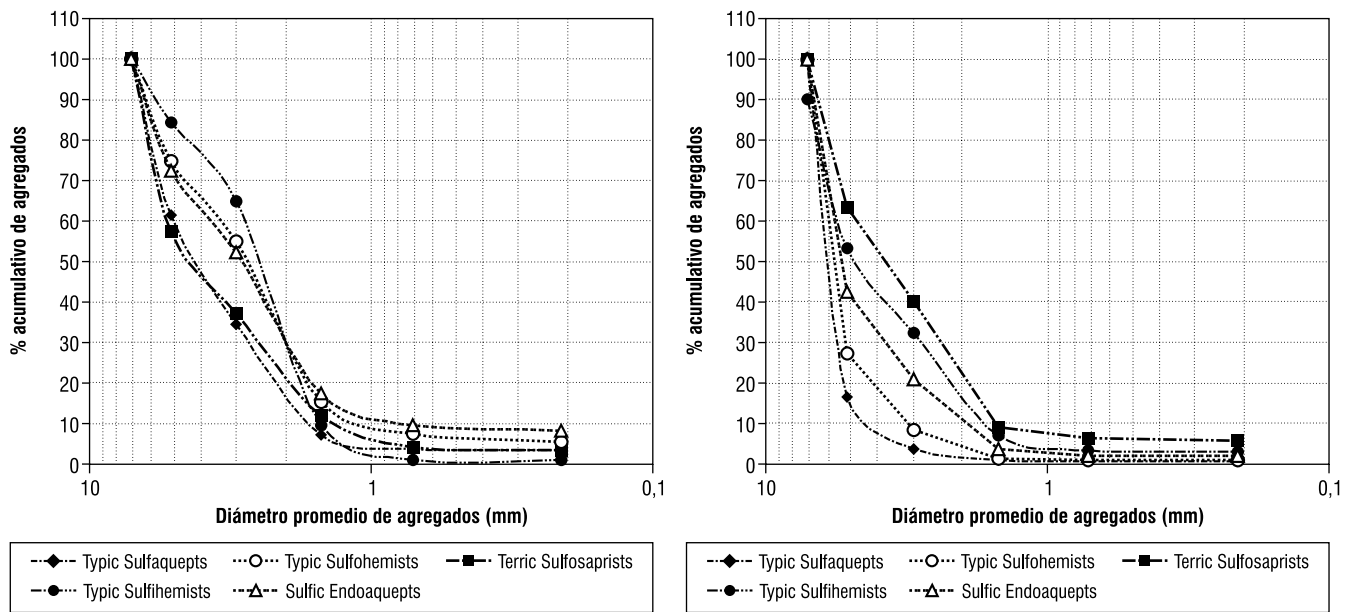


FIGURA 2. Distribución de agregados en seco para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha. a) Horizontes superficiales. b) Horizontes sub-superficiales.

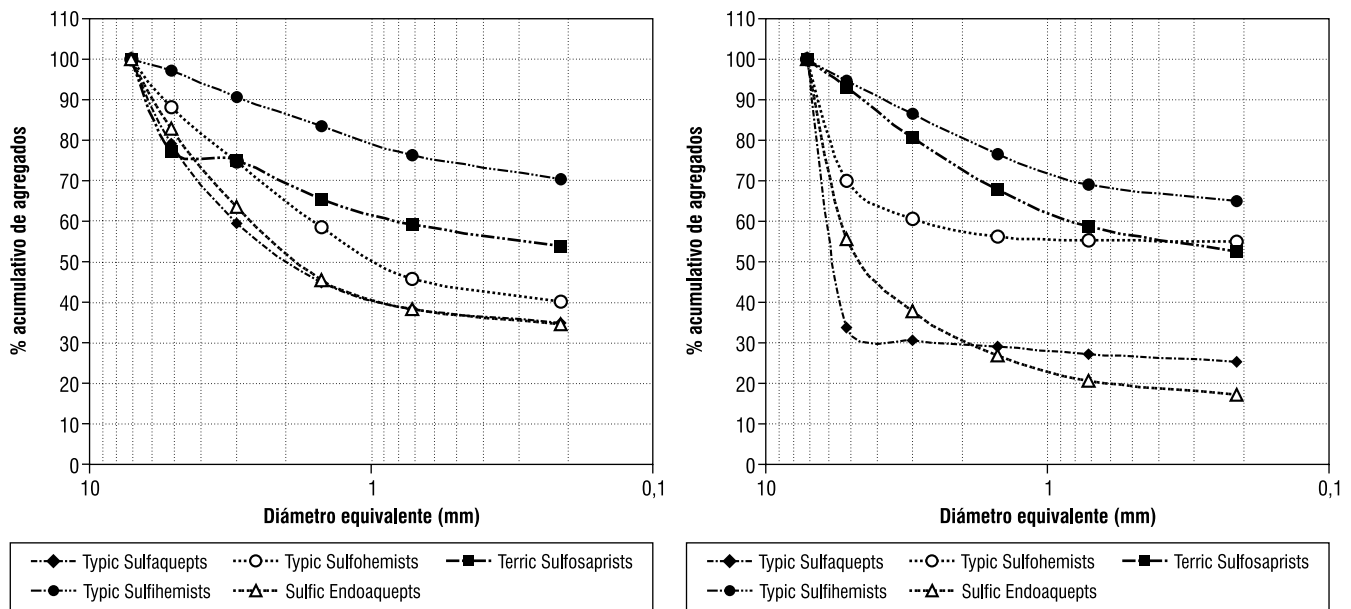


FIGURA 3. Distribución de agregados en húmedo para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha. a) Horizontes superficiales. b) Horizontes sub-superficiales.

### Estabilidad de agregados en húmedo

La calificación de la estabilidad estructural se realizó teniendo en cuenta el diámetro ponderado medio de agregados (DPM) en mm. La tabla 2 resume el comportamiento de la estabilidad de los agregados en SSA.

De acuerdo al DPM de agregados en húmedo, la estabilidad estructural fluctúa entre ligeramente estable y muy estable, según los parámetros de interpretación definidos por el IGAC (2006). El suelo con mayor estabilidad estructural es el *Typic Sulfaquepts*, que presentó los mayores DPM, seguido por el perfil *Sulfic Endoaquepts*. La estabilidad estructural en estos dos perfiles se debe a los altos contenidos de arcilla y a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, que precipitan en los canales dejados por las raíces y en las grietas interagregado, actuando como cementantes en los agregados del suelo, debido a su composición estable a la acción del agua (Christopher, 1996).

Los perfiles *Terric Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists* poseen estructura moderadamente estable en agua debido a sus contenidos altos de sales, evidente en superficie cuando los suelos disturbados se secan, además de la influencia del nivel freático de aguas salino ácidas. Aunque los contenidos de aluminio intercambiable en estos suelos son muy altos, los efectos de este elemento sobre la estructura son limitados debido a la influencia de la materia orgánica.

El suelo *Typic Sulfihemists* presentó ligera estabilidad estructural influida por el ascenso del nivel freático y sus altos porcentajes de sodio intercambiable. Las sales de sodio contribuyen a la dispersión de la estructura y ocasionan su degradación.

### Textura y distribución de partículas por tamaño

Zinck (1954, citado por Montenegro, 1995) afirma que la elaboración de curvas acumulativas de granulometría permiten inferir acerca de la génesis de los suelos. Con los promedios de datos obtenidos de la granulometría de los SSA en sus primeros horizontes, se realizaron las curvas donde se representa el porcentaje acumulado de las partículas. Para el caso de los cinco perfiles modales descritos, se obtuvieron curvas de tipo sigmoideal en los perfiles *Sulfic Endoaquepts*, *Typic Sulfaquepts*, *Typic Sulfohemists* y *Terric Sulfosaprists*, y logarítmica en el perfil *Typic Sulfihemists* (figura 4). En el primer caso, la curva caracteriza

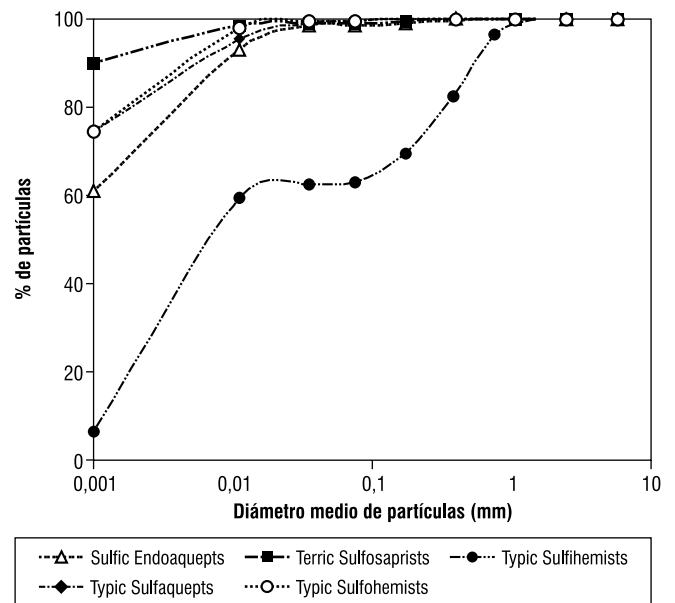


FIGURA 4. Curvas acumulativas de granulometría para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

TABLA 2. Estabilidad estructural por el método de Yoder para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (taxonomía)	Horizonte		DPM (mm)	EA %	Interpretación
	Nom.	Espesor (cm)			
Sulfic Endoaquepts (Cód.: PSMi -05)	Ap	0-10	2,97	65,27	Moderadamente estable
	Bwg	10-55	4,57	82,78	Estable
Typic Sulfaquepts (Cód.: PSDu -01)	Ap	0-12	3,14	65,17	Estable
	Bwg	12-32	5,04	74,77	Muy estable
Terric Sulfosaprists (Cód.: PSVu -03)	Aj	0-15	2,27	46,15	Moderadamente estable
	Oaj	15-35	1,82	47,65	Moderadamente estable
Typic Sulfohemists (Cód.: PSVa -02)	Aj	0-10	2,34	59,68	Moderadamente estable
	Oaj	10-37	2,89	44,98	Moderadamente estable
Typic Sulfihemists (Cód.: PSVu -04)	Oay	0-25	1,05	29,71	Ligeramente estable
	Oey	25-70	1,37	35,14	Ligeramente estable

DPM: diámetro ponderado medio; EA%: estado de agregación. Cód.: código del perfil georreferenciado en estudio semidetallado de suelos (GISSAT, 2005)

procesos de acumulación libre, en los cuales los depósitos son altamente seleccionados. Este tipo de distribución de partículas es característico de zonas de decantación, en las cuales las partículas gruesas se sedimentan primero, luego los limos y por último las partículas más finas. Por esta razón, el mayor porcentaje de materiales se encuentra en una fracción granulométrica estrecha, dominada por las arcillas.

En la curva de tipo logarítmico se observa un aumento en la proporción de limos y arenas, en detrimento de las arcillas. Este tipo de curva se relaciona con áreas de desborde y depósitos de limos acumulados en zonas de depresión dentro de zonas de bacín o cubeta.

Como resultado del tipo de acumulación de las partículas en las zonas de SSA, se obtiene el predominio de texturas fi-

nas, con alto contenido de arcillas en las áreas depresionales del Distrito de Riego, tal y como se aprecia en la tabla 3.

### Consistencia

De acuerdo con la tabla 4, en general, los suelos presentaron altos valores de índices de plasticidad, condición que representa un limitante para su mecanización. Por tal razón es conveniente analizar por separado los valores de los límites plásticos, ya que este es el valor máximo al cual se debe mecanizar un suelo sin generar problemas en la estructura.

La tendencia del límite plástico en SSA indica que los valores más bajos corresponden a los horizontes minerales con menores contenidos de materia orgánica. A mayor contenido de materia orgánica, el límite plástico se alcanza a humedad gravimétrica más alta debido a que los materiales

**TABLA 3.** Texturas en perfiles modales de SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (taxonomía)	Horizonte		Arcilla (%)	Limos (%)	Arenas (%)	Textura
	Nom.	Espesor (cm)				
Sulfic Endoaquepts (Cód.: PSMi -05)	Ap	0-10	32,70	16,4	51	FArA
	Bwg	10-55	66,25	32,02	1,73	Ar
Typic Sulfaquepts (Cód.: PSDu -01)	Ap	0-12	76,9	22,06	1,04	Ar
	Bwg	12-32	68,6	30,1	1,3	Ar
Terric Sulfosaprists (Cód.: PSVu -03)	Aj	0-15	87,33	10,89	1,78	Ar
	Oaj	15-35	43,1	21,5	35,4	Ar
Typic Sulfohemists (Cód.: PSVa -02)	Aj	0-10	74,3	25,31	0,39	Ar
	Oaj	10-37	20,2	13,5	66,3	FArA
Typic Sulfihemists (Cód.: PSVu -04)	Oay	0-25	6,62	56,02	37,36	FL
	Oey	25-70	24,7	18,5	56,9	FArA

Cód.: código del perfil georreferenciado en estudio semidetallado de suelos (GISSAT,

**TABLA 4.** Límites de Atterberg e índices de plasticidad para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (taxonomía)	Horizonte		LL	LP	IP	Interpretación
	Nom.	Espesor (cm)				
Sulfic Endoaquepts (Cód.: PSMi -05)	Ap	0-10	82	57	25	Muy plástico
	Bwg	10-55	58	28	30	Muy plástico
Typic Sulfaquepts (Cód.: PSDu -01)	Ap	0-12	96	73	23	Muy plástico
	Bwg	12-32	70	39	31	Muy plástico
Terric Sulfosaprists (Cód.: PSVu -03)	Aj	0-15	66	41	25	Muy plástico
	Oaj	15-35	135	90	45	Muy plástico
Typic Sulfohemists (Cód.: PSVa -02)	Aj	0-10	104	74	30	Muy plástico
	Oaj	10-37	212	106	106	Muy plástico
Typic Sulfihemists (Cód.: PSVu -04)	Oay	0-25	103	77	26	Muy plástico
	Oey	25-70	98	77	21	Muy plástico

LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad. Cód.: código del perfil georreferenciado en estudio semidetallado de suelos (GISSAT, 2005).

orgánicos deben absorber más agua que los minerales antes de formar películas de agua entre sus partículas (Baver et al., 1974). La formación de películas de agua es necesaria para permitir el deslizamiento de las partículas sólidas entre sí, y por consiguiente la adquisición de la condición plástica del suelo.

El aprovechamiento de estas condiciones de los suelos orgánicos permite tener un mayor rango de humedad para realizar prácticas de laboreo sin llegar al amasamiento del suelo, y por consiguiente evitar en mayor medida la pérdida de estructura y la compactación. Por el contrario, el límite plástico a menores contenidos de humedad en los suelos minerales *Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts* representa un problema para la labranza, debido a la poca cantidad de agua que se requiere para producir moldeamiento del suelo por acción del arado.

### Módulo de ruptura

El módulo de ruptura corresponde a la fuerza máxima para romper un molde de suelo de determinado tamaño (Pinzón, 2003). El módulo de ruptura determina la susceptibilidad al encostramiento de los suelos. Los valores varían para los diferentes perfiles como se expresa en la tabla 5.

Los perfiles *Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts* presentaron los más altos valores de módulo de ruptura, dado que, por sus altos contenidos de arcilla, las partículas en el suelo seco tienen alta cohesión. En los suelos *Terric Sulfosaprists*, *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfihemists*, los valores de módulo de ruptura son muy bajos, lo cual indica una menor resistencia de las costras a la emergencia

de plántulas, aunque los altos contenidos de sales y sodio intercambiable influyan en su formación. En general, el módulo de ruptura indica que las condiciones de encostramiento en SSA no representan una limitación importante para la emergencia de las plántulas. Este parámetro es particularmente importante en el área del Distrito de Riego debido a la trascendencia que en él tienen los cultivos hortícolas, en los cuales la preparación del suelo se realiza con implementos que contribuyen a su pulverización y la degradación estructural en el afán de proporcionar una cama uniforme para las plantas.

### Constantes de humedad

Los puntos de humedad se determinan para saber cuál es la proporción de agua utilizable por los cultivos, así como para estimar las proporciones de macro y microporos presentes en el suelo (Barrera, 1998).

### Constantes de humedad en laboratorio

La expresión de las constantes de humedad en SSA manifiesta el comportamiento de su sistema poroso y de sus materiales constituyentes. Es así como se observa (tabla 6) que los mayores contenidos de humedad con base en peso seco para las diferentes constantes de humedad se dan en los suelos *Terric Sulfosaprists*, *Typic Sulfihemists* y *Typic Sulfohemists*, debido a su génesis y composición a partir de materiales orgánicos, que confieren al suelo alta capacidad de absorción y retención de humedad; contrario a lo sucedido en los perfiles *Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts*, cuyos materiales constitutivos son en su mayoría partículas minerales finas, que deben su capacidad de retención de humedad a su asociación, superficie específica y formación de microporos.

### Constantes de humedad en campo e invernadero

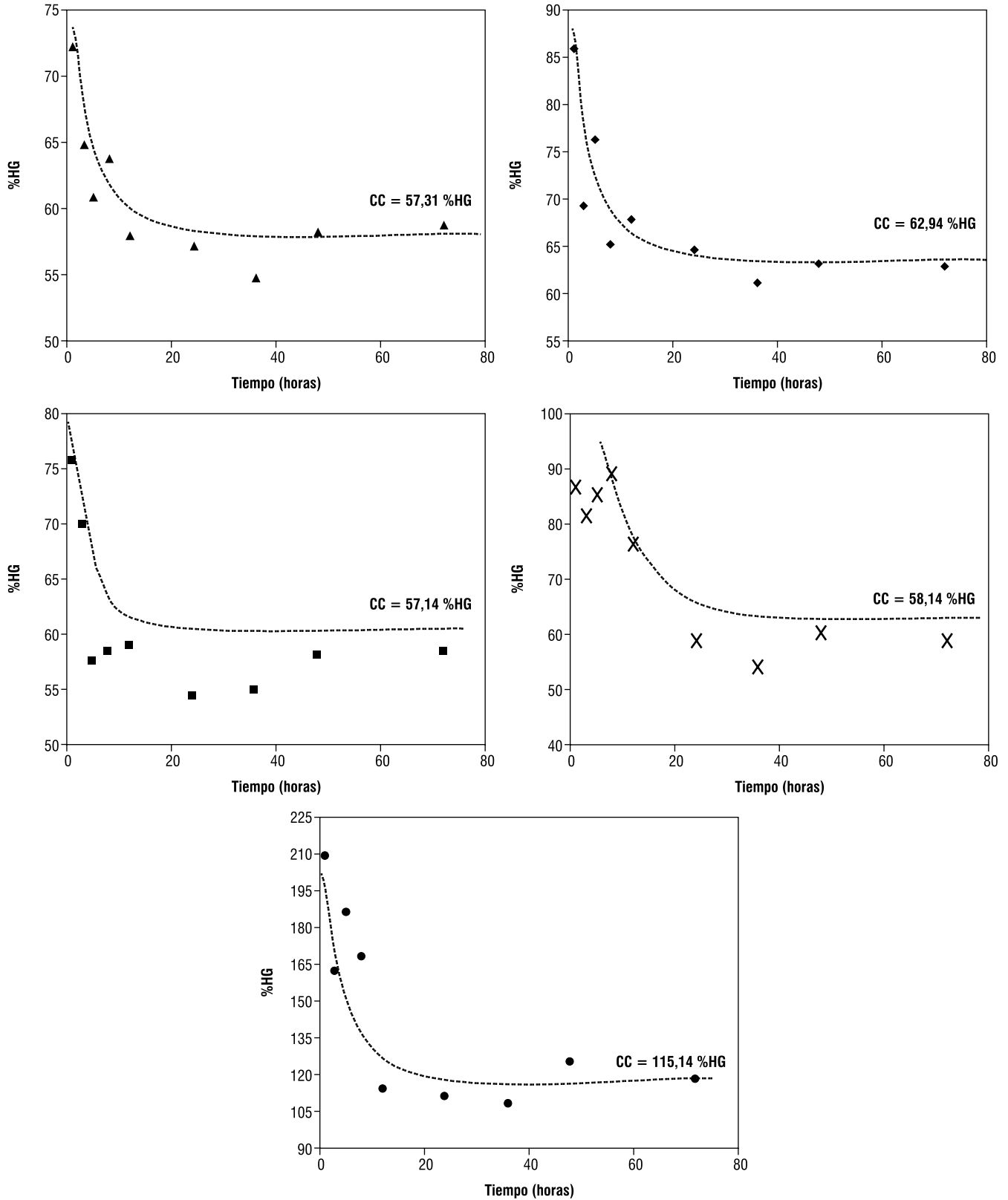
Los resultados de las constantes de humedad obtenidas en campo e invernadero presentaron variaciones importantes con respecto al laboratorio. La capacidad de campo obtenida en campo osciló entre 57 y 115% de humedad gravimétrica (figura 5), rangos de humedad más amplios que los hallados en laboratorio (tabla 6), debido a que a nivel de campo existe la influencia de factores del suelo, tales como la profundidad del nivel freático y la presencia de plantas, que afectan las mediciones e influyen directamente en la expresión de los puntos de humedad. Sin embargo, esto no resta validez a las determinaciones de campo, ya que ellas sirven para expresar la realidad del comportamiento y dinámica del suelo en condiciones más cercanas a la realidad.

Los contenidos de humedad gravimétrica a punto de marchitez permanente obtenidos en invernadero oscilaron

**TABLA 5.** Módulo de ruptura para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (taxonomía)	Horizonte		MR (kPa)	Interpretación
	Nom.	Espesor (cm)		
Sulfic Endoaquepts (Cód.: PSMi -05)	Ap	0-10	17,97	Moderadamente baja
	Bwg	10-55	20,58	Media
Typic Sulfaquepts (Cód.: PSDu -01)	Ap	0-12	1,30	Muy baja
	Bwg	12-32	30,06	Muy alta
Terric Sulfosaprists (Cód.: PSVu -03)	Aj	0-15	3,59	Muy baja
	Oaj	15-35	0,98	Muy baja
Typic Sulfohemists (Cód.: PSVa -02)	Aj	0-10	1,63	Muy baja
	Oaj	10-37	0,98	Muy baja
Typic Sulfihemists (Cód.: PSVu -04)	Oay	0-25	1,96	Muy baja
	Oey	25-70	0,78	Muy baja

MR: módulo de ruptura. Cód.: código del perfil georreferenciado en estudio semidetallado de suelos (GISSAT, 2005).



**FIGURA 5.** Determinación de la capacidad de campo en horizontes superficiales por estabilización del contenido de humedad (método de campo utilizando curvas de humedecimiento). Suelos Sulfatados Ácidos, Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

**TABLA 6.** Constantes de humedad determinadas en condiciones de laboratorio para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (Taxonomía)	Horizonte		Constantes de humedad en laboratorio (% HG)					% HV Agua aprovechable
	Nom.	Espesor (cm)	Saturación (0,01 atm)	CC (0,3 atm)	PMP (15 atm)	(CC - PMP)	Da (g·cm <sup>-3</sup> )	
Sulfic Endoaquepts (Cód.: PSMi -05)	Ap	0-10	103,15	68,27	44,96	23,31	1,01	23,54
	Bwg	10-55	53,72	30,87	22,51	8,36	1,20	10,03
Typic Sulfaquepts (Cód.: PSDu -01)	Ap	0-12	142,82	69,40	44,64	24,76	1,07	26,49
	Bwg	12-32	54,65	41,47	31,54	9,93	1,25	12,41
Terric Sulfosaprists (Cód.: PSVu -03)	Aj	0-15	83,44	58,11	39,18	18,93	1,18	22,33
	Oaj	15-35	128,13	100,00	58,93	41,07	0,67	27,51
Typic Sulfohemists (Cód.: PSVa -02)	Aj	0-10	101,70	75,15	36,24	38,91	0,82	31,90
	Oaj	10-37	220,31	163,27	103,17	60,10	0,36	21,63
Typic Sulfihemists (Cód.: PSVu -04)	Oay	0-25	110,42	79,91	60,94	18,97	0,23	4,36
	Oey	25-70	166,80	120,94	66,85	54,09	0,21	11,35

CC: capacidad de campo; Da: densidad aparente; PMP: punto de marchites permanente; %HG: porcentaje de humedad gravimétrica; %HV: porcentaje de humedad volumétrica. Cód.: código del perfil georreferenciado en estudio semidetallado de suelos (GISSAT, 2005).

entre el 22 y 34%, valores significativamente inferiores a los registrados en laboratorio (tablas 6 y 7). Este comportamiento está dado porque en la utilización de plantas como indicadores, el punto de marchitez permanente depende no solo del potencial de succión, sino del potencial de transpiración de las plantas empleadas, así como de su capacidad de expansión radical y la conductividad hidráulica del suelo. De acuerdo con estas características, cada cultivo tiene un potencial diferente que lo hace más o menos resistente a condiciones de estrés hídrico.

Lo enunciado tiene repercusiones en los contenidos de humedad aprovechable para las plantas. Como se observa en los resultados, estos contenidos son menores en las determinaciones de laboratorio, lo que significa que no toda el agua que se encuentra entre CC y PMP es aprovechable por las plantas, sino que depende de diferentes factores fisiológicos de la planta cultivada y de condiciones especiales implícitas en la estructura y la porosidad del suelo; el PMP se puede alcanzar por debajo o por encima de las 15 atmósferas, constituyendo un rango de humedad amplio en el cual las plantas pueden verse afectadas por escasez de agua.

### Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada en los SSA estudiados varió entre moderadamente lenta y rápida para los dos primeros horizontes de cada perfil (tabla 8).

Estas variaciones están influenciadas por la constitución de cada horizonte (materiales minerales u orgánicos), presencia de raíces, continuidad del sistema poroso en el perfil,

condición estructural y la presencia de raíces, principalmente. Teniendo en cuenta esto, se observa que en los suelos *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfihemists* la conductividad hidráulica es moderadamente rápida y moderada, respectivamente, para los dos horizontes evaluados, indicando una continuidad de su espacio poroso en profundidad, debida en gran parte a la uniformidad de sus materiales constituyentes de un horizonte a otro y favorecida por la alta presencia de raíces en el perfil *Typic Sulfihemists*. Situación contraria se presentó en el perfil *Terric Sulfosaprists*, en el que los materiales minerales están intercalados con los orgánicos debido al carácter policíclico de su formación, lo cual repercute en la variación de la conductividad hidráulica de un horizonte a otro.

En los perfiles *Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts* se presentó un aumento de esta propiedad en los horizontes subsuperficiales (Bwg), debido a la presencia de poros tubulares dejados por raíces muertas, y a las grietas existentes entre los agregados del suelo.

### Manejo físico de los suelos sulfatados ácidos

Los SSA son suelos jóvenes, con características especiales de acidez, conductividad eléctrica, potencial redox y contenidos de azufre, hierro y aluminio. Debido al dinamismo químico de estos suelos y a la estrecha relación entre sus propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas, es conveniente advertir que su manejo debe ser cuidadoso por la alta susceptibilidad de ser degradados en corto tiempo con prácticas mecánicas que no corresponden a la interpretación y conocimiento de sus propiedades.



**TABLA 7.** Constantes de humedad determinadas en campo e invernadero para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (taxonomía)	Horizonte		% HG Constantes de humedad			DA (g·cm <sup>-3</sup> )	% HV Agua aprovechable
	Nom.	Espesor (cm)	CC Campo	PMP Invernadero	(CC – PMP)		
Sulfic Endoaquepts (Cód.: PSMi -05)	Ap	0-10	57,31	22,13	35,18	1,01	35,53
Typic Sulfaquepts (Cód.: PSDu -01)	Ap	0-12	62,94	27,10	35,84	1,07	38,34
Terric Sulfosapristis (Cód.: PSVu -03)	Aj	0-15	57,14	30,74	26,4	1,18	31,152
Typic Sulfohemists (Cód.: PSVa -02)	Aj	0-10	58,14	27,98	30,16	0,82	24,73
Typic Sulfihemists (Cód.: PSVu -04)	Oay	0-25	115,14	34,05	81,09	0,23	18,65

CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchites permanente; Da: densidad aparente; HV: humedad volumétrica. Cód.: código del perfil georreferenciado en estudio semidetallado de suelos (GISSAT, 2005).

El carácter atípico de estos suelos, por combinar sedimentos minerales y materiales orgánicos sulfatados ácidos dentro del perfil, hace necesario considerar los resultados de esta investigación para dirigir labores técnicamente adecuadas que contribuyan a su recuperación química, orientando estratégicamente su manejo en labranza, riego y drenaje.

### Labranza

El ascenso capilar de aguas freáticas generalmente ácido salinas, los altos contenidos de arcilla en horizontes minerales del perfil y la ocurrencia de horizontes sulfúricos subsuperficiales representan las mayores limitaciones para abordar la labranza en SSA. Debido a estas condiciones, la profundidad efectiva radical disponible para el establecimiento de cultivos se ve afectada y resulta ser una característica determinante para definir el sistema de labranza más apropiado. Un aspecto trascendental en la mecanización de SSA consiste en no exponer a la superficie horizontes sulfúricos subsuperficiales por acción del arado para evitar el descenso significativo del pH por oxidación de materiales sulfúricos. En este sentido es recomendable realizar un tipo de labranza vertical con implementos como la cavadora de azadones o cinceles vibratorios sin llegar a perturbar los horizontes sulfúricos, acción que se debe complementar con una labranza secundaria que garantice un perfil de desterronamiento superficial adecuado para siembra. Por la baja estabilidad estructural de los SSA de origen orgánico, no es conveniente la utilización de implementos que causen la pulverización del suelo, como el arado rotativo.

La profundidad efectiva varía para los SSA del Distrito de Riego desde superficial (<10 cm) hasta moderadamente profunda (>50 cm). En los SSA que presentan horizontes extremadamente ácidos en superficie (pH<4), la corrección

**TABLA 8.** Conductividad hidráulica saturada para los SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (taxonomía)	Horizonte		Ksat (cm·h <sup>-1</sup> )	Interpretación
	Nom.	Espesor (cm)		
Sulfic Endoa- quepts (Cód.: PSMi -05)	Ap	0-10	1,53	Moderadamente lenta
	Bwg	10-55	7,84	Moderadamente rápida
Typic Sulfaquepts (Cód.: PSDu -01)	Ap	0-12	7,33	Moderadamente rápida
	Bwg	12-32	14,1	Rápida
Terric Sulfo- saprists (Cód.: PSVu -03)	Aj	0-15	0,84	Moderadamente lenta
	Oaj	15-35	1,81	Moderada
Typic Sulfohemists (Cód.: PSVa -02)	Aj	0-10	6,09	Moderadamente rápida
	Oaj	10-37	5,47	Moderadamente rápida
Typic Sulfihemists (Cód.: PSVu -04)	Oay	0-25	4,56	Moderada
	Oey	25-70	3,46	Moderada

Ksat: conductividad hidráulica saturada. Cód.: código del perfil georreferenciado en estudio semidetallado de suelos (GISSAT, 2005).

química con materiales enclantes y su incorporación con los implementos mencionados anteriormente, combinados con una buena adecuación del sistema de drenaje, resultan apropiados en la adecuación de estos suelos para actividades agrícolas.

### Riego

El riego es una aplicación controlada y uniforme de agua al suelo para suministrar de manera equitativa, oportuna y eficiente el agua a las plantas para su normal desarrollo (Barrera, 1998). En este aspecto las necesidades de riego dependen de las características físicas del suelo, y de manera especial, de la porosidad, contenidos de humedad a capacidad de campo y marchitez permanente, así como

del movimiento del agua en el suelo, teniendo en cuenta además las condiciones fisiológicas del cultivo, el régimen de lluvias y la evapotranspiración.

Para los SSA, la aplicación de riego debe estar sujeta al contenido de humedad aprovechable y a la profundidad efectiva radical del cultivo. Las condiciones estructurales del suelo, sus contenidos de materia orgánica y textura condicionan la frecuencia, tiempo y selección de implementos para el riego. Interrelacionando los resultados, se puede concluir que en los SSA de origen mineral (*Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts*), con los más altos contenidos de arcilla y mayor estabilidad estructural, la frecuencia de riegos debe ser amplia y los riegos moderadamente intensos hasta llegar a capacidad de campo, con el fin de aprovechar al máximo su retención de humedad y evitar encharcamientos por sobresaturación del suelo. Aunque su mayor estabilidad estructural permite la aplicación de riego con las características enunciadas, la distribución del sistema poroso y las condiciones texturales de estos suelos demandan una duración del riego baja con implementos de diámetro de gota fina y caudales adecuados que mejoren la eficiencia del sistema con respecto a la infiltración y movimiento del agua en el suelo.

En el caso de los SSA de origen orgánico (*Terric Sulfosapristis*, *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfihemists*), por la presencia de sales y contenidos altos de materia orgánica, los riegos deben ser aplicados con alta frecuencia, para evitar su secamiento, condición en la cual se tornan hidrofóbicos (condición de repelencia al agua), afectando sus propiedades hidráulicas y haciendo más dispendioso el regadío. Además, el humedecimiento continuo evita los afloramientos y concentraciones de sales en la superficie. Es recomendable que se utilicen implementos de bajo caudal y diámetro de gota fina, para evitar que el impacto de la gota de lluvia destruya fácilmente la estructura y promueva el encostramiento superficial, lo cual es de particular importancia en estos suelos debido a su baja estabilidad estructural.

### **Drenaje**

El drenaje tiene como función eliminar los sobrantes de agua en el suelo, con el fin de mantener las condiciones necesarias de aireación y actividad biológica del mismo para permitir a las plantas el adecuado desarrollo de su sistema radical y por ende, de su parte aérea (Barrera, 1998).

En los SSA la labor de drenaje es un poco más compleja como consecuencia de las implicaciones generadas por sus propiedades químicas. Un drenaje excesivo de los SSA implica un descenso dramático en el pH, debido a la pro-

ducción de ácido sulfúrico por oxidación de los materiales ricos en sulfuro. En segundo lugar, el drenaje de los suelos orgánicos produce subsidencia, es decir, una reducción en el espesor de un suelo hidromórfico. El amplio espacio poroso se llena de aire, se favorecen los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica, que finalmente ocasiona la pérdida de espesor, liberación de CO<sub>2</sub> y aumento en el flujo de nutrientes (SSDS, 1993).

De acuerdo con lo anterior, se debe lograr un equilibrio entre el manejo del suelo con fines agrícolas y la sostenibilidad del recurso. Si se realizan prácticas agrícolas, es conveniente que el drenaje sea suficiente para permitir el desarrollo adecuado de los cultivos sin ocasionar pérdidas en las condiciones naturales del suelo.

La práctica recomendable en SSA consiste en realizar drenajes hasta la profundidad del nivel freático o de los horizontes sulfúricos, con el fin de mantener la lámina de agua a una profundidad que no afecte el suministro de oxígeno a las raíces y para evitar que la acidez de estratos inferiores ascienda a la zona de raíces, manteniendo al mismo tiempo un contenido de humedad adecuado para evitar la acidificación excesiva del suelo y contrarrestar la subsidencia. También es favorable tener en cuenta la conductividad hidráulica como un parámetro útil en la definición de obras de drenaje, ya que permite conocer la capacidad de evacuación de agua de la capa arable, situación que conlleva a la definición de un espaciamiento óptimo entre los canales. Adicionalmente, es indispensable que las aguas de drenaje no sean utilizadas para riego, comúnmente realizado por los usuarios en épocas secas, debido a que se puede causar quemazón en los cultivos promovida por la carga de sulfatos existente en aguas freáticas y de drenaje que corren por canales.

El manejo adecuado del medio físico de los SSA contribuye al mejoramiento del drenaje y a la reducción de la salinidad, aspectos que hacen más eficientes los procesos de control de acidez y recuperación del balance químico al que deben llegar estos suelos para superar sus mayores limitaciones.

### **Agradecimientos**

Los autores expresan su agradecimiento a los integrantes del Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por su cooperación en las pruebas de campo y laboratorio, a Colciencias y a la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego del Alto Chicamocha por su apoyo técnico y logístico en el desarrollo del trabajo.

## Literatura citada

- Amézquita, E. y J. Navas. 1993. Métodos para la determinación de algunas propiedades físicas de los suelos. pp. 103-134. En: Rojas, L. (ed.). Manual de análisis de suelos plantas y aguas para riego. Produmedios, Bogotá. 236 p.
- Barrera, R. 1998. Riegos y drenajes. Ediciones USTA, Bogotá. 326 p.
- Baver, L.D., W.H. Gardner y W.R. Gardner. 1974. Física de suelos. Uteha, México D.F. 529 p.
- Castro, H. 1998. Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas. Instituto Universitario Juan de Castellanos, Tunja. 360 p.
- Christopher, T.B.S. 1996. Aggregate stability of different aggregate sizes. En: [www.agri.Upm. Edu.My/jst/resources/as/om\\_toc.html](http://www.agri.Upm.Edu.My/jst/resources/as/om_toc.html); consulta: 15 de abril de 2005.
- Gómez, I. 2006. Génesis de suelos sulfatados ácidos y su relación con el manejo agrícola. Distrito de riego del alto Chicamocha. Tesis de maestría en ciencias agrarias con énfasis en suelos y aguas. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 211 p.
- Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales–GISSAT. 2006. Informe final Colciencias Proyecto UPTC-Colciencias-Usocicamocha “Caracterización de la problemática de los suelos sulfatados ácidos improductivos y evaluación del manejo para su habilitación agrícola. Distrito de Riego del Alto Chicamocha-Boyacá”. 220 p.
- Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales (GISSAT), 2005. Estudio semidetallado de suelos sulfatados ácidos del Distrito de riego del alto Chicamocha, Proyecto UPTC–Colciencias–Usocicamocha. 80 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. 6 ed. IGAC, Bogotá. 513 p.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2006. Keys to soil taxonomy. Natural Resource Conservation Service. 328 p.
- Montenegro, H. 1995. Interpretación de las propiedades físicas del suelo. pp. 96-126. En: Silva, F. (ed.). Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá. 323 p.
- Pinzón, A. 2003. Análisis e interpretación de propiedades físicas determinadas en el laboratorio. pp. 63-71. En: Silva, F. (ed.). Manejo integral de la fertilidad del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Editora Guadalupe, Bogotá. 224 p.
- Soil Survey Division Staff (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D.C. 437 p.