

## Fertilización por sitio específico en un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la Sabana de Bogotá

Site-specific soil fertilization in maize crop (*Zea mays* L.) at Bogotá plateau

Javier Rodríguez<sup>1</sup>, Aura María González<sup>1</sup>, Fabio Rodrigo Leiva<sup>2</sup> y Laureano Guerrero<sup>3</sup>

### RESUMEN

Se realizó un ensayo en el Centro Agropecuario Marengo (CAM), Sabana de Bogotá, para evaluar el manejo de la fertilidad por sitio específico en un cultivo de maíz. Se instaló una cuadrícula regular de 32 puntos (25 m x 25 m) para muestreo de variables del suelo y de desarrollo y rendimiento del cultivo. Mediante análisis de componentes principales de variables químicas del suelo y su humedad y de rendimiento del cultivo inmediatamente anterior, se identificaron dos zonas de manejo de la fertilidad. En cada una se aplicó un tratamiento de fertilización, considerando la variabilidad específica del suelo (AP1 y AP2) y un testigo con fertilización convencional (CAM1 y CAM2). Las variables evaluadas en los 32 puntos fueron: contenido de humedad y densidad aparente, a 2 profundidades, 110 días después de siembra (dds); altura de planta a 55, 90 y 140 dds; índice foliar a 140 dds; análisis foliar a 150 dds; mazorcas cosechadas, hileras por mazorca, granos por hilera, peso mazorca con y sin amero a 160 dds. Para el análisis de datos se usó estadística descriptiva y geoestadística, incluyendo análisis estructural, *kriging* y validación cruzada; igualmente se realizó un análisis de costos y beneficios, mediante presupuestos parciales, comparando AP1 y AP2 con CAM1 y CAM2. La metodología usada permitió identificar posibles distancias de muestreo para manejo de la fertilidad por sitio específico. Los mayores rendimientos y beneficios financieros se obtuvieron en AP1. Este artículo presenta resultados y recomendaciones para el manejo de la fertilidad por sitio específico en maíz para la zona.

**Palabras clave:** agricultura específica por sitio, agricultura de precisión, variabilidad, geoestadística, cultivos tropicales, suelos.

### ABSTRACT

A field test was conducted to assess site-specific fertility management in maize crop (*Zea mays* L.) at Agricultural Center Marengo (CAM), Bogotá plateau. A 32 point grid (25 m x 25 m) was used to measure soil properties, crop development and yield variables. Main component analysis was applied to soil chemical properties, moisture content and variables of development and yield of a previous maize crop and this let to identify two soil fertilization zones. In each one of such zones, two treatments were applied, one according to specific soil variability (AP1, AP2) and a control treatment based on commercial practices (CAM1, CAM2). Soil moisture content and bulk density were measured at two depths at 110 days after sowing (das), plant height at 55, 90 and 140 das, leaf area index at 140 das, leaf analysis at 150 das, and harvested corncobs, rows per corncob, kernels per row and corncob weight with and without husk. Results were assessed using descriptive statistics and geostatistics, including structural analysis, kriging and cross validation. A partial budget was used to compare cost-benefit results from AP1 and AP2 against CAM1 and CAM2. The approach used allowed to identify possible sampling distances in site-specific soil fertility management. The best crop yields and financial benefits were found in AP1. Results and recommendations for site-specific soil fertility for maize are given.

**Key words:** site-specific agriculture, precision agriculture, variability, geostatistics, tropical crops, soils.

### Introducción

Las propiedades del suelo pueden variar considerablemente por factores pedogenéticos (Burrough, 1993) y acción antrópica (Castrignanò *et al.*, 2000). El conocimiento de esta variabilidad permite aplicar los insumos adecuados,

en el sitio preciso y en las cantidades requeridas, según las condiciones particulares de los agroecosistemas (Leiva, 2003). Este manejo se constituye en una alternativa para una gestión precisa del cultivo, que permita aprovechar mejor los recursos existentes, administrar los insumos en el tiempo y en el espacio (Bongiovanni, 2004), incrementar la

Fecha de recepción: octubre 25 de 2007. Aceptado para publicación: julio 10 de 2008

<sup>1</sup> Ingenieros agrónomos, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. javrodri2@gmail.com; amgonzalezs@unal.edu.co

<sup>2</sup> Profesor asociado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. frleivab@unal.edu.co

<sup>3</sup> Profesor asistente, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. lguerreroj@unal.edu.co

productividad (Zhang *et al.*, 2002) y reducir la degradación ambiental (Auernhammer, 2001).

La fertilización por sitio específico consiste en aplicar de manera diferencial los fertilizantes, de acuerdo con el nivel de nutrientes de cada zona homogénea dentro del lote, resultando tantas dosis como áreas significativamente homogéneas existan en éste (Bouma *et al.*, 1999). En esta concepción es común el uso de la geoestadística para: cuantificar y evaluar la variabilidad; caracterizar y cuantificar la dependencia espacial de variables por medio de análisis estructurales, utilizando variogramas y validación cruzada; estimar distancias de muestreo; producir mapas de contorno y estimar valores de una variable en sitios no muestreados por medio de *kriging*; identificar zonas homogéneas de manejo específico en campo y determinar correlaciones espaciales entre variables (Goovaerts, 1999).

Si bien existen importantes ventajas con la agricultura por sitio específico, en el país esta concepción apenas comienza a ser desarrollada (Isaacs *et al.*, 2004; Salamanca *et al.*, 2007; Luengas *et al.*, 2007). En este contexto se planteó la presente investigación con el objeto de evaluar el manejo de la fertilidad por sitio específico en un cultivo comercial de maíz (*Zea mays*), como aporte a su producción sostenible y competitiva en Colombia. Se seleccionó maíz por ser un producto base de la alimentación y un renglón importante de la economía nacional, con una producción para 2004 de 1.398.723 t y un área sembrada de 614.510 ha (Espinal *et al.*, 2005); de estos totales, el departamento de Cundinamarca participó con un estimado de 10.760 ha en el segundo semestre de 2006 (Fenalce, 2007). La metodología descrita es aplicable para cultivos de maíz en cualquier piso térmico, aunque para este ensayo se adaptó a las condiciones de clima frío (Sabana de Bogotá). Este estudio hace parte del proyecto de investigación “Manejo sostenible de suelos en sistemas de cultivos transitorios bajo la concepción de agricultura de precisión”, del grupo de investigación Desarrollo sostenible y gestión ambiental, de la Universidad Nacional de Colombia.

## Materiales y métodos

El ensayo se realizó en el semestre B de 2006 en un cultivo de maíz, en el Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, localizado en Mosquera (Cundinamarca), a 4° 42' latitud norte y 74° 14' longitud oeste y 2.543 msnm. El lote experimental, con un área de 2 ha, corresponde a suelos predominantemente Fluventic Humic Dystrudepts.

Al inicio se definieron zonas de manejo de la fertilidad mediante un análisis de componentes principales (ACP) (Boruvka *et al.*, 2007), usando SPSS versión 15. Con este fin se trabajó con información proveniente de un ensayo de agricultura de precisión realizado en un cultivo de maíz en dicho lote en el primer semestre de 2005, en el que se estableció una cuadrícula regular georreferenciada con 32 puntos de muestreo, distanciados 25 m x 25 m, para el muestreo de variables de suelo y de cultivo por punto. Para el ACP se usaron los resultados de dos análisis completos de suelos a nivel de laboratorio (uno previo al inicio del cultivo de 2005 y otro anterior al presente ensayo), las mediciones de contenido de humedad del suelo (CH), realizadas a partir de la siembra con una frecuencia mensual, y las variables de rendimiento de maíz de 2005. La tabla 1 muestra el análisis de suelos anterior al presente ensayo. Para el análisis de las variables químicas de suelo se realizó una prueba de correlación de Pearson entre éstas y las variables de rendimiento del cultivo, y con aquéllas de mayor correlación se hizo el ACP. Luego, se realizó el ACP para las variables de desarrollo y rendimiento del cultivo, incluyendo días a anthesis masculina (DAM), días a anthesis femenina (DAF), longitud de la planta en centímetros (LP), número de nudos (NN), número de hojas (NH), área foliar de la hoja inferior a la mazorca superior en centímetros cuadrados (AFHIS), área foliar de planta en centímetros cuadrados (AFT), peso seco parte aérea en gramos (PSAF), peso seco de la planta (PSP), diámetro de la mazorca con amero en centímetros (DMA), peso húmedo de la mazorca en gramos (PHM), peso húmedo por metro cuadrado (PHMC), número de mazorcas por metro cuadrado (NM) y rendimiento del cultivo en kilogramos por metro cuadrado (RC).

Luego se usó una prueba de correlación de Pearson para comparar los primeros componentes de variabilidad química y de planta con los valores de contenido de humedad del suelo, y se seleccionaron aquellos contenidos de humedad que presentaron mayor correlación. A estos últimos se les aplicó ACP. Además, se usó una prueba de correlación de Pearson para correlacionar los componentes principales de las variables químicas, de contenido de humedad de suelo y de rendimiento del cultivo. A continuación, se efectuó el análisis estructural para cada uno de los componentes principales de las variables citadas, mediante GS+ versión 7, y se ajustó el semivariograma experimental al modelo teórico con mejor diferencia de cuadrados  $R^2$  y mayor estructura espacial  $C/(C_0+C)$ , donde: C es la meseta y  $C_0$ , la pepita (Cerri *et al.*, 2004). Para visualizar las áreas de manejo de la fertilidad, con esos modelos se utilizó *kriging* para generar mapas, empleando ArcGIS versión 9.1. Para evaluar el grado de bondad del *kriging* se utilizó validación cruzada.

**TABLA 1.** Análisis de suelos (semestre A, 2005) anterior al presente ensayo (semestre B, 2006). Lote de cultivo de maíz (*Zea mays*), Centro Agropecuario Marengo, Universidad Nacional de Colombia, Mosquera (Cundinamarca).

| Punto | CE                 |     | CO   |      | N     |      | Ca   | K    | Mg                      |                         |                         | Na   | Al   | H   | CIC   | P     | Cu   | Fe   | Mn    | Zn | B | CH | DA |
|-------|--------------------|-----|------|------|-------|------|------|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------|------|-----|-------|-------|------|------|-------|----|---|----|----|
|       | dS·m <sup>-1</sup> | pH  | %    | %    | %     | %    |      |      | meq·100 g <sup>-1</sup> | meq·100 g <sup>-1</sup> | meq·100 g <sup>-1</sup> |      |      |     |       |       |      |      |       |    |   |    |    |
| P1    | 0,98               | 4,9 | 3,21 | 0,28 | 8,33  | 0,62 | 2,72 | 0,78 | 0,3                     | 0,18                    | 22,74                   | >140 | 2,19 | 359 | 11,08 | 3,70  | 0,34 | 34,0 | 1,097 |    |   |    |    |
| P2    | 0,87               | 4,8 | 3,09 | 0,27 | 7,92  | 0,66 | 2,47 | 0,60 | 0,52                    | 0,29                    | 23,75                   | 92   | 1,93 | 371 | 4,51  | 0,43  | 0,28 | 32,7 | 1,178 |    |   |    |    |
| P3    | 0,34               | 4,9 | 3,43 | 0,30 | 8,19  | 0,48 | 2,58 | 0,50 | 0,64                    | 0,35                    | 25,41                   | 122  | 1,85 | 364 | 3,70  | 4,54  | 0,30 | 38,7 | 1,094 |    |   |    |    |
| P4    | 0,98               | 4,9 | 3,65 | 0,31 | 8,54  | 0,94 | 2,89 | 0,70 | 0,52                    | 0,20                    | 25,55                   | 138  | 2,39 | 339 | 11,07 | 2,29  | 0,19 | 39,1 | 1,045 |    |   |    |    |
| P5    | 0,62               | 5,0 | 3,17 | 0,27 | 8,39  | 0,51 | 2,72 | 0,67 | 0,39                    | 0,15                    | 22,80                   | 132  | 2,49 | 330 | 8,30  | 17,71 | 0,23 | 42,6 | 1,077 |    |   |    |    |
| P6    | 1,60               | 4,7 | 4,26 | 0,37 | 8,11  | 0,56 | 2,93 | 1,09 | 0,55                    | 0,29                    | 23,34                   | 77   | 0,84 | 404 | 2,48  | 9,61  | 0,24 | 39,6 | 1,120 |    |   |    |    |
| P7    | 1,55               | 4,7 | 3,98 | 0,34 | 8,67  | 0,73 | 2,76 | 1,08 | 0,46                    | 0,23                    | 23,28                   | 80   | 0,63 | 412 | 2,24  | 8,52  | 0,26 | 48,2 | 0,978 |    |   |    |    |
| P8    | 1,65               | 4,8 | 4,27 | 0,37 | 9,09  | 0,54 | 3,09 | 1,76 | 0,50                    | 0,32                    | 26,91                   | 86   | 0,66 | 386 | 1,91  | 7,38  | 0,29 | 39,2 | 1,139 |    |   |    |    |
| P9    | 1,55               | 4,8 | 3,89 | 0,34 | 8,46  | 1,17 | 3,09 | 1,27 | 0,50                    | 0,28                    | 24,48                   | 89   | 0,82 | 402 | 1,84  | 8,54  | 0,25 | 30,0 | 1,105 |    |   |    |    |
| P10   | 1,62               | 4,7 | 4,15 | 0,36 | 10,34 | 0,65 | 3,44 | 1,15 | 0,43                    | 0,23                    | 26,31                   | 131  | 0,63 | 410 | 3,76  | 8,16  | 0,33 | 36,8 | 0,944 |    |   |    |    |
| P11   | 1,95               | 4,7 | 3,57 | 0,31 | 7,97  | 0,40 | 3,16 | 1,20 | 0,42                    | 0,24                    | 22,19                   | 68   | 0,75 | 437 | 2,38  | 9,29  | 0,42 | 38,7 | 1,169 |    |   |    |    |
| P12   | 2,16               | 4,9 | 3,43 | 0,30 | 9,29  | 0,54 | 3,14 | 1,26 | 0,25                    | 0,15                    | 23,44                   | 65   | 1,35 | 412 | 2,33  | 9,56  | 0,39 | 38,6 | 1,181 |    |   |    |    |
| P13   | 1,46               | 4,9 | 3,39 | 0,29 | 8,44  | 0,50 | 2,95 | 1,18 | 0,47                    | 0,17                    | 24,00                   | 107  | 0,82 | 413 | 1,55  | 7,04  | 0,69 | 39,6 | 1,181 |    |   |    |    |
| P14   | 1,43               | 4,8 | 2,86 | 0,25 | 8,65  | 1,33 | 2,75 | 1,23 | 0,33                    | 0,17                    | 23,75                   | 120  | 0,74 | 426 | 1,56  | 6,07  | 0,60 | 40,2 | 1,161 |    |   |    |    |
| P15   | 1,28               | 5,0 | 3,22 | 0,28 | 9,24  | 0,67 | 2,90 | 0,97 | 0,21                    | 0,13                    | 22,23                   | 126  | 1,66 | 438 | 3,82  | 17,29 | 0,56 | 37,1 | 1,132 |    |   |    |    |
| P16   | 1,50               | 4,9 | 3,12 | 0,27 | 8,67  | 0,43 | 2,73 | 1,12 | 0,42                    | 0,27                    | 23,55                   | 85   | 0,94 | 407 | 1,88  | 8,37  | 0,48 | 30,7 | 1,038 |    |   |    |    |
| P17   | 1,43               | 5,0 | 2,82 | 0,24 | 10,03 | 0,67 | 3,11 | 0,95 | 0,19                    | 0,16                    | 23,94                   | 128  | 1,62 | 428 | 2,69  | 14,51 | 0,51 | 41,5 | 1,014 |    |   |    |    |
| P18   | 1,26               | 4,9 | 3,35 | 0,29 | 9,37  | 0,59 | 2,91 | 0,90 | 0,37                    | 0,10                    | 23,71                   | 84   | 1,28 | 419 | 2,55  | 11,66 | 0,73 | 32,6 | 1,107 |    |   |    |    |
| P19   | 2,60               | 4,8 | 3,12 | 0,27 | 9,63  | 0,43 | 3,03 | 1,45 | 0,27                    | 0,13                    | 23,28                   | 83   | 1,24 | 428 | 2,56  | 12,04 | 0,36 | 36,0 | 1,183 |    |   |    |    |
| P20   | 3,18               | 4,8 | 3,15 | 0,27 | 9,89  | 0,84 | 3,18 | 1,66 | 0,25                    | 0,14                    | 22,80                   | 89   | 1,21 | 421 | 2,93  | 12,39 | 0,42 | 32,1 | 1,165 |    |   |    |    |
| P21   | 2,50               | 4,8 | 2,94 | 0,25 | 9,56  | 0,38 | 3,09 | 1,44 | 0,20                    | 0,13                    | 23,69                   | 63   | 1,13 | 418 | 2,17  | 10,08 | 0,43 | 36,9 | 1,224 |    |   |    |    |
| P22   | 2,10               | 4,9 | 3,31 | 0,29 | 10,15 | 0,76 | 3,37 | 1,22 | 0,16                    | 0,12                    | 24,93                   | 79   | 0,93 | 439 | 1,82  | 11,70 | 0,57 | 35,9 | 1,176 |    |   |    |    |
| P23   | 2,25               | 4,9 | 4,25 | 0,37 | 12,34 | 0,68 | 3,82 | 2,07 | 0,18                    | 0,17                    | 30,28                   | 115  | 0,68 | 414 | 2,35  | 6,26  | 0,82 | 39,0 | 1,099 |    |   |    |    |
| P24   | 3,35               | 4,9 | 3,55 | 0,31 | 9,80  | 0,60 | 3,51 | 1,91 | 0,15                    | 0,15                    | 24,35                   | 76   | 1,00 | 420 | 1,48  | 9,74  | 0,67 | 33,5 | 1,132 |    |   |    |    |
| P25   | 4,60               | 4,7 | 3,19 | 0,27 | 10,01 | 0,45 | 3,72 | 2,27 | 0,17                    | 0,15                    | 25,05                   | 77   | 1,04 | 429 | 3,11  | 11,68 | 0,41 | 32,2 | 1,174 |    |   |    |    |
| P26   | 2,80               | 4,8 | 4,10 | 0,35 | 10,88 | 0,43 | 4,04 | 1,94 | 0,23                    | 0,19                    | 28,81                   | 80   | 0,6  | 408 | 2,14  | 5,56  | 0,52 | 28,2 | 1,096 |    |   |    |    |
| P27   | 3,90               | 4,8 | 3,32 | 0,29 | 9,99  | 0,49 | 3,51 | 1,98 | 0,12                    | 0,16                    | 23,55                   | 81   | 1,08 | 429 | 3,67  | 12,13 | 0,64 | 29,1 | 1,238 |    |   |    |    |
| P28   | 3,00               | 4,9 | 3,32 | 0,29 | 9,74  | 0,52 | 3,20 | 1,83 | 0,14                    | 0,15                    | 23,42                   | 81   | 1,12 | 440 | 2,61  | 12,39 | 0,48 | 34,8 | 1,194 |    |   |    |    |
| P29   | 3,55               | 4,8 | 3,09 | 0,27 | 10,21 | 0,48 | 3,22 | 2,09 | 0,24                    | 0,12                    | 25,41                   | 106  | 0,97 | 416 | 3,55  | 9,57  | 0,71 | 33,3 | 1,141 |    |   |    |    |
| P30   | 2,45               | 4,9 | 3,42 | 0,29 | 10,40 | 0,46 | 3,08 | 1,72 | 0,19                    | 0,13                    | 26,02                   | 79   | 0,96 | 417 | 1,91  | 7,96  | 0,45 | 33,2 | 1,201 |    |   |    |    |
| P31   | 1,65               | 5,0 | 3,32 | 0,29 | 9,30  | 0,45 | 2,85 | 1,40 | 0,29                    | 0,16                    | 25,30                   | 70   | 1,00 | 433 | 1,87  | 9,53  | 0,61 | 34,5 | 1,188 |    |   |    |    |
| P32   | 2,35               | 4,9 | 3,42 | 0,29 | 10,44 | 0,45 | 3,04 | 1,85 | 0,16                    | 0,14                    | 26,77                   | 112  | 1,12 | 426 | 4,30  | 13,65 | 0,44 | 35,0 | 1,173 |    |   |    |    |

CE, conductividad eléctrica; CO, carbono orgánico; CIC, capacidad de intercambio catiónico; CH, contenido de humedad y DA, densidad aparente.

El análisis mencionado condujo a establecer dos zonas de manejo de la fertilidad para el presente ensayo (figura 1). La zona 1 presentó valores ligeramente superiores de P y Mn, mientras que la zona 2 presentó valores superiores de conductividad eléctrica (CE), Ca y Na. Con el fin de evaluar la fertilización a partir de la variabilidad específica del suelo, en cada zona se aplicaron dos tratamientos de fertilización: uno que corresponde a dicha variabilidad (AP) y el otro con la fertilización convencional para maíz que se usa para ese lote del CAM (testigo CAM) (tabla 2); así, cada zona quedó subdividida en dos subzonas.

La fertilización se realizó manualmente. La aplicación de la urea se fraccionó: 50% a los 23 dds y el resto a los 53 dds. Los otros fertilizantes se aplicaron en una sola dosis con la primera dosis de urea. El manejo agronómico posterior fue homogéneo para todo el cultivo. La variedad de maíz que se utilizó fue la ICA V-508 tipo sogamoseño y la siembra se hizo mecanizada, con distancias entre plantas de 0,25 m y entre surcos de 0,83 m. Durante el ensayo se usó la cuadrícula regular de 32 puntos, como referente para hacer seguimiento por sitio de las características físicas del suelo y de las variables de desarrollo y rendimiento del cultivo. El semestre atípicamente lluvioso y el drenaje deficiente del lote afectaron el cultivo en las partes más bajas, particularmente en algunos puntos de las subzonas CAM1 y AP2.

Teniendo en cuenta que las zonas de manejo de la fertilidad fueron definidas en función de los análisis químicos, los CH y la respuesta del cultivo anterior, se consideró importante evaluar en el presente ensayo el CH, así como la densidad aparente (DA) a los 110 dds, a dos rangos de profundidad del suelo, 0-0,20 m y 0,20-0,40 m. Para esto, se tomaron muestras con anillos de volumen conocido en cada uno de los puntos de la cuadrícula mencionada, para cada profundidad. Luego, en el laboratorio se determinó el CH por el método de la estufa a 105 °C durante 24 h y la DA mediante el método de volumen conocido.

Para el cultivo se evaluaron, alrededor de cada punto de la cuadrícula, las variables que se mencionan a continuación: altura de planta (ALP), en 3 estados de desarrollo, a los 55 (ALP<sub>I</sub>), 90 (ALP<sub>II</sub>) y 140 dds (ALP<sub>III</sub>), desde el suelo hasta la hoja superior; el índice foliar (IF), a los 140 dds, mediante el método de Montgomery (1911), con tres repeticiones por sitio; el análisis foliar a los 150 dds, determinando N total por el método micro-Kjeldahl y valoración volumétrica; el P y el B por calcinación y valoración colorimétrica y Ca, K, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn mediante calcinación y valoración por espectrofotometría de absorción atómica. Además, se evaluaron las variables de rendimiento, incluyendo: número de mazorcas cosechadas (MC); número de hileras de grano por mazorca (NHM); número de granos por hilera (GHM); peso de mazorca con amero (PA) y peso sin amero (PSA), a los 160 dds. Las tres primeras se determinaron por conteo directo y los pesos, con una balanza de precisión.

El análisis de datos incluyó tanto estadística descriptiva como geoestadística. Para la primera se usó el software SPSS. Para la segunda, se efectuó el análisis estructural con GS+ para ajustar el semivariograma experimental a un modelo teórico, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Entonces, a las variables que presentaron distribución espacial definida se les aplicó *kriging* para generar mapas de contorno, usando ArcGIS versión 9.1. La bondad del *kriging* se evaluó mediante validación cruzada.

Un aspecto crítico del manejo específico por sitio es el relacionado con su rentabilidad y la manera de justificar los costos de su implementación, frente a posibles ahorros de insumos o mejoras en el rendimiento del cultivo (Adrian *et al.*, 2005; Leiva *et al.*, 1997). Por tal razón, se realizó un análisis de presupuestos parciales, con el fin de evaluar los cambios en el beneficio financiero a causa del manejo por sitio específico, mediante comparación con el manejo convencional en el CAM (testigo comercial). El costo del fertilizante para cada subzona se calculó multiplicando la

**TABLA 2.** Dosis de fertilizantes aplicados por zonas y subzonas en lote de maíz. Centro Agropecuario Marengo, Universidad Nacional de Colombia, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006.

| Insumo                                           | Zonas para manejo específico por sitio |                 | Zonas de manejo convencional        |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
|                                                  | Subzona 1 (AP1)                        | Subzona 2 (AP2) | Subzona 1 y subzona 2 (CAM1 y CAM2) |
| Urea (kg·ha <sup>-1</sup> )                      | 239,9                                  | 217,9           | 130,0                               |
| Superfosfato triple (SPT) (kg·ha <sup>-1</sup> ) | 132,6                                  | 132,6           | 109,0                               |
| Sulfato de potasio (kg·ha <sup>-1</sup> )        | 56,0                                   | 112,0           | 170,0                               |
| Agrimins (kg·ha <sup>-1</sup> )                  | 46,0                                   | 46,0            | 46,0                                |

cantidad utilizada de kilos de cada fertilizante por su precio comercial de compra. Por su parte, los ingresos para cada subzona se determinaron multiplicando la cantidad de bultos cosechados por su precio comercial de venta.

## Resultados y discusión

Para la definición de zonas de manejo de la fertilidad, el ACP correspondiente a las variables químicas de suelo mostró que los dos primeros componentes explicaron el 84,8% de la varianza (tabla 3a) y las variables de mayor peso fueron sodio (Na1) y magnesio (Mg1), del análisis previo al inicio del cultivo en 2005, y conductividad eléctrica

**TABLA 3.** Análisis de componentes principales para la definición de zonas de manejo de fertilidad. Componentes escogidos: a) química de suelos; b) variables de rendimiento y c) contenido de humedad (CH). Cultivo de lote de maíz, Centro Agropecuario Marengo, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006.

| a. Química de suelos |                   |               |             |
|----------------------|-------------------|---------------|-------------|
| Componente           | Valores iniciales |               |             |
|                      | Total             | % de varianza | % acumulado |
| 1                    | 4,854             | 69,346        | 69,346      |
| 2                    | 1,081             | 15,437        | 84,784      |
| 3                    | 0,413             | 5,894         | 90,678      |
| 4                    | 0,326             | 4,655         | 95,333      |
| 5                    | 0,203             | 2,899         | 98,231      |
| 6                    | 0,082             | 1,176         | 99,407      |
| 7                    | 0,041             | 0,593         | 100,000     |

| b. Variables de rendimiento |                   |               |             |
|-----------------------------|-------------------|---------------|-------------|
| Componente                  | Valores iniciales |               |             |
|                             | Total             | % de varianza | % acumulado |
| 1                           | 5,093             | 63,659        | 63,659      |
| 2                           | 1,022             | 12,772        | 76,431      |
| 3                           | 0,691             | 8,642         | 85,073      |
| 4                           | 0,614             | 7,681         | 92,753      |
| 5                           | 0,464             | 5,806         | 98,559      |
| 6                           | 0,110             | 1,371         | 99,930      |
| 7                           | 0,006             | 0,070         | 100,000     |
| 8                           | 3,15E-016         | 3,93E-015     | 100,000     |

| c. Contenido de humedad (CH) |                   |               |             |
|------------------------------|-------------------|---------------|-------------|
| Componente                   | Valores iniciales |               |             |
|                              | Total             | % de varianza | % acumulado |
| 1                            | 2,4364            | 81,21         | 81,21       |
| 2                            | 0,4497            | 14,99         | 96,20       |
| 3                            | 0,1139            | 3,80          | 100,00      |

(CE2), hierro (Fe2), magnesio (Mg2), manganeso (Mn2) y sodio (Na2), del análisis anterior al presente ensayo (tabla 4a). Por su parte, el ACP correspondiente a las variables de rendimiento del cultivo mostró que los dos primeros componentes explicaron 76,4% de la varianza (tabla 3b) y las variables de mayor peso fueron AFHIS, PSP, DMA, RC, PHM, NM, LP y DAF (tabla 4b). De otro lado, el ACP en el caso de la variable CH mostró que el primer componente

**TABLA 4.** Matriz de componentes del análisis de componentes principales par ala definición de zonas de manejo de fertilidad: a) química de suelos; b) variables de rendimiento y c) contenido de humedad (CH). Cultivo de lote de maíz, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006.

| a. Química de suelos  |            |        |
|-----------------------|------------|--------|
| Variable <sup>†</sup> | Componente |        |
|                       | 1          | 2      |
| Mg1                   | 0,930      | 0,199  |
| Na1                   | 0,868      | -0,023 |
| Mg2                   | 0,846      | 0,367  |
| Na2                   | 0,914      | 0,197  |
| Mn2                   | -0,618     | 0,721  |
| Fe2                   | 0,736      | -0,546 |
| CE2                   | 0,872      | 0,220  |

CE, conductividad eléctrica

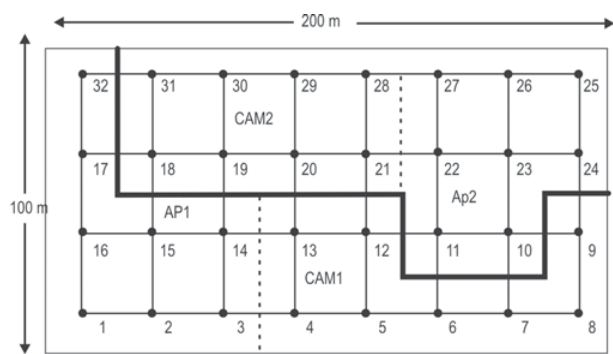
<sup>†</sup> Los elementos seguidos por (1) corresponden a un análisis anterior al cultivo (2005-B) y por (2), al realizado a su inicio (2006-B).

| b. Variables de rendimiento |            |        |
|-----------------------------|------------|--------|
| Variable                    | Componente |        |
|                             | 1          | 2      |
| AFHIS                       | 0,820      | -0,079 |
| PSP                         | 0,615      | 0,023  |
| DMA                         | 0,870      | 0,471  |
| RC                          | 0,942      | 0,107  |
| PHM                         | 0,870      | 0,471  |
| NM                          | 0,610      | -0,575 |
| LP                          | 0,864      | -0,266 |
| DAF                         | -0,723     | 0,399  |

AFHIS, área foliar de la hoja inferior a la mazorca superior; PSP, peso seco de la planta; DMA, diámetro de la mazorca con amero; RC, rendimiento del cultivo; PHM, peso húmedo de la mazorca; NM, número de mazorcas; LP, longitud de la planta; DAF, días a anthesis femenina.

| c. Contenido de humedad (CH) |              |
|------------------------------|--------------|
| Muestras*                    | Componente 1 |
| CH2                          | 0,82         |
| CH6                          | 0,94         |
| CH7                          | 0,94         |

\* Tomadas 2, 6 y 7 meses después de la siembra, respectivamente.



**FIGURA 1.** Distribución de zonas de manejo de la fertilidad en un lote de maíz, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006. Los números corresponden a los puntos de muestreo en la cuadrícula trazada en el lote. AP1 y AP2 son subzonas para manejo específico por sitio y CAM1 y CAM2, subzonas de manejo convencional.

explicó 81,2% (tabla 3c) y las mediciones que tuvieron mayor peso fueron: CH2, 2 meses después de la siembra; CH6, 6 meses después de la siembra y CH7, 7 meses después de la siembra (tabla 4c). Mediante el análisis estructural y *kriging* se generaron mapas de contorno (resultados no mostrados en este artículo), que conllevaron al mapa de zonas de la fertilidad (figura 1).

Los resultados con respecto al análisis de estadística descriptiva mostraron variabilidad media, esto es entre 12% y 60% (Warrick y Nielsen, 1980) para el CH, para el análisis foliar y la mayoría de variables de desarrollo y rendimiento del cultivo. En cuanto a las variables de suelo, el CH presentó más variabilidad en la segunda profundidad. De otro lado, la DA mostró variabilidad baja (<12%), con una mayor variabilidad para la segunda profundidad (tabla 5), lo que es concordante con lo hallado con el CH.

Con respecto a las variables de desarrollo y de rendimiento del cultivo, se encontró mayor variación para ALP<sub>I</sub>, ALP<sub>II</sub>, IF, MC, GHM, PA y PSA, efecto asociado al exceso de humedad del lote y su repercusión sobre el desarrollo del cultivo, particularmente en algunos puntos de las subzonas CAM1 y AP2. La menor variación para altura de planta ocurrida en ALP<sub>III</sub> sugiere que a esa fecha (140 dds) la mayoría de las plantas había alcanzado su altura total. El análisis foliar mostró valores dentro de los rangos normales para todas las variables, exceptuando el Mg, que resultó bajo; de otro lado, las mayores variaciones ocurrieron con N, P, Cu, Fe, Mn, Zn y B. La baja variación del número de hileras por mazorca indica que es una característica genética de la variedad (Fao, 1993).

De acuerdo al resultado de la prueba estadística Shapiro-Wilk (tabla 6), las variables CH2, DA2, ALP<sub>I</sub>, ALP<sub>II</sub>, Mg, Fe, MC y GHM no presentaron distribución normal. Al no darse normalidad en estas variables, se procedió a realizar transformaciones logarítmicas (ln y log<sub>10</sub>) y raíz cuadrada, obteniéndose ajustes a distribución normal únicamente con ALP<sub>I</sub>, Mg y Fe. Para efectos del análisis geoestadístico, con éstas últimas variables se continuó trabajando con los datos transformados (tabla 7), mientras que con las demás se hizo con los datos originales.

Las pruebas de Pearson mostraron correlación positiva de IF con ALP<sub>III</sub>, indicando la relación entre tamaño de planta y área foliar (tabla 8). De otro lado, CHI se correlacionó negativamente con IF, evidenciando el efecto negativo del exceso de humedad sobre el desarrollo del cultivo, particularmente en algunos puntos de las subzonas CAM1 y AP2. Por su parte, las tres ALP se correlacionaron positivamente con el número de plantas por metro cuadrado (PLA), indicando que el mejor desarrollo vegetativo ocurrió donde hubo mayor población de plantas. La importancia de los nutrientes N y P se deduce de la correlación positiva de éstos con las ALP, PLA y PA. En el caso de N, estos resultados coinciden con lo encontrado por otros autores (Sinclair y Horie, 1989), que plantean que el N es definitivo para la eficiencia fotosintética del cultivo y que a niveles subóptimos de abastecimiento esta eficiencia se afecta seriamente. Por otra parte, el K mostró correlaciones negativas con la mayoría de las variables de rendimiento y desarrollo, contrario a lo reportado en la literatura (Ospina, 1999).

Con relación al análisis estructural, se pudieron ajustar semivariogramas a la mayoría de variables, excepto para DA1, Mg, NHM, GHM, PA y PSA, que no presentaron dependencia espacial (tabla 9). Los valores de estructura espacial (C/(Co+C)) resultaron altos para las variables que mostraron dependencia espacial, lo mismo que los valores de  $r^2$ , excepto para DA2, Zn, PLA y MC, presentando confiabilidad para el resto de variables. Según Kerry y Oliver (2004), las distancias de muestreo deben ser equivalentes a la mitad del rango de dependencia espacial. A partir de este criterio, y exceptuando a CH2, DA2, Ca, Cu, Zn y MC, los resultados sugieren que las demás variables que presentaron dependencia espacial se pueden muestrear a distancias mayores a la empleada en la presente investigación (25 m).

Con respecto a rendimientos del cultivo de maíz, el mapa de MC muestra que la subzona AP1 tuvo el mejor comportamiento, seguido por la zona CAM 2 (figura 2a). Las otras subzonas AP2 y CAM1 presentaron bajos rendimientos,

**TABLA 5.** Análisis estadístico descriptivo de variables de suelo, desarrollo y rendimiento del cultivo de lote de maíz. Centro Agropecuario Marengo, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006.

| Variable                                                     | Media    | Mediana  | Asimetría | Curtosis | Mínimo | Máximo   | Varianza    | CV (%) |
|--------------------------------------------------------------|----------|----------|-----------|----------|--------|----------|-------------|--------|
| <b>Variables de suelo</b>                                    |          |          |           |          |        |          |             |        |
| Contenido de humedad 1 (CH1) <sup>†</sup> (%)                | 36,43    | 36,78    | 0,485     | -0,551   | 26,71  | 50,31    | 39,389      | 17,22  |
| Contenido de humedad 2 (CH2) <sup>†</sup> (%)                | 41,49    | 40,07    | 2,732     | 8,714    | 30,83  | 90,61    | 153,509     | 29,90  |
| Densidad aparente 1 (DA1) <sup>†</sup> (g·cm <sup>-3</sup> ) | 1,08     | 1,09     | -0,214    | -0,811   | 0,89   | 1,22     | 0,008       | 8,09   |
| Densidad aparente 2 (DA2) <sup>†</sup> (g·cm <sup>-3</sup> ) | 1,13     | 1,17     | -1,017    | 1,249    | 0,86   | 1,30     | 0,009       | 8,31   |
| <b>Variables de desarrollo del cultivo</b>                   |          |          |           |          |        |          |             |        |
| Altura planta I (ALP <sub>I</sub> ) <sup>††</sup> (cm)       | 32,55    | 31,00    | 1,509     | 4,726    | 23,00  | 57,70    | 46,506      | 20,95  |
| Altura planta II (ALP <sub>II</sub> ) <sup>††</sup> (cm)     | 64,48    | 65,33    | 0,139     | -1,319   | 42,30  | 93,30    | 253,362     | 24,68  |
| Altura planta III (ALP <sub>III</sub> ) <sup>††</sup> (cm)   | 180,10   | 180,33   | 0,356     | 0,059    | 137,00 | 235,00   | 501,061     | 12,42  |
| Índice foliar (IF) (cm <sup>2</sup> )                        | 1.625,13 | 1.485,43 | 0,546     | -0,420   | 839,00 | 2.786,60 | 251.422,980 | 30,85  |
| <b>Variables según resultado del análisis foliar</b>         |          |          |           |          |        |          |             |        |
| N (%)                                                        | 2,80     | 2,89     | -0,42     | -0,94    | 1,53   | 3,78     | 0,37        | 21,42  |
| P (%)                                                        | 0,28     | 0,28     | 0,42      | -0,54    | 0,19   | 0,43     | 0,004       | 21,42  |
| Ca (%)                                                       | 0,39     | 0,39     | -0,36     | -0,31    | 0,28   | 0,48     | 0,002       | 12,60  |
| K (%)                                                        | 2,10     | 2,11     | -0,41     | -0,38    | 1,54   | 2,49     | 0,06        | 11,57  |
| Mg (%)                                                       | 0,13     | 0,12     | 0,65      | -0,64    | 0,09   | 0,18     | 0,001       | 17,96  |
| Cu (mg·kg <sup>-1</sup> )                                    | 6,35     | 6,25     | 0,17      | -0,45    | 3,70   | 10,00    | 2,65        | 25,51  |
| Fe (mg·kg <sup>-1</sup> )                                    | 173,90   | 160,00   | 1,01      | 0,74     | 114,00 | 302,00   | 2.087,05    | 26,26  |
| Mn (mg·kg <sup>-1</sup> )                                    | 49,96    | 48,00    | 0,36      | -0,86    | 26,00  | 79,00    | 209,96      | 29,00  |
| Zn (mg·kg <sup>-1</sup> )                                    | 38,55    | 36,15    | 0,918     | 0,68     | 22,90  | 66,50    | 97,29       | 25,57  |
| B (mg·kg <sup>-1</sup> )                                     | 12,03    | 11,95    | 0,44      | -0,26    | 6,90   | 18,20    | 8,31        | 23,94  |
| <b>Variables de rendimiento del cultivo</b>                  |          |          |           |          |        |          |             |        |
| Plantas/m <sup>2</sup> (PLA)                                 | 3,79     | 3,80     | -0,27     | -0,73    | 0,70   | 6,20     | 1,92        | 36,52  |
| Mazorcas cosechadas/m <sup>2</sup> (MC)                      | 1,50     | 1,10     | 1,09      | 0,93     | 0,00   | 5,10     | 1,97        | 93,47  |
| Hileras por mazorca (NHM)                                    | 3,96     | 3,90     | 0,34      | 0,07     | 3,30   | 4,80     | 0,12        | 8,89   |
| Granos por hilera de mazorca (GHM)                           | 5,86     | 6,30     | -0,68     | -0,60    | 3,80   | 7,30     | 0,97        | 16,75  |
| Peso con amero (PA) (g)                                      | 85,72    | 85,60    | 0,09      | -1,07    | 51,50  | 115,10   | 339,53      | 21,49  |
| Peso sin amero (PSA) (g)                                     | 55,60    | 53,20    | 0,37      | -1,16    | 36,20  | 81,90    | 183,62      | 24,37  |

CV, coeficiente de variación

<sup>†</sup> Muestras tomadas a: 1) 0-0,20 m de profundidad; 2) 0,20-0,40 m de profundidad

<sup>††</sup> Medida a: (I) 55 días después de la siembra (dds); (II) 90 dds y (III) 140 dds

en parte debido al exceso de humedad (figura 2a-c). Este resultado confirma las ventajas de la fertilización por sitio específico, siempre y cuando se controlen otros factores que puedan afectar negativamente el cultivo. El efecto positivo del N y del P sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo se evidencia al comparar las figuras 2a, 2d, 3a y 3b. El análisis de suelos anterior al presente ensayo indica que estos dos nutrientes se encontraban en valores intermedios (tabla 1). De otro lado, la situación ya planteada con el K se reafirma al contrastar las figuras 2a y 2d con la figura 3c. Esto ocurrió a pesar de que este nutriente presentó valores altos en el análisis mencionado.

En el análisis de costos se encontró que el mayor valor por concepto de los fertilizantes ocurrió en la subzona AP2, seguido por CAM1 y CAM2 (tabla 10). En el presupuesto parcial no se tuvieron en cuenta los costos de mano de obra para la aplicación ni aquellos para el muestreo en el suelo y el cultivo, puesto que fueron prácticamente iguales en todos los tratamientos. Los costos de análisis de laboratorio, iguales para cada subzona y que ascendieron a \$2'240.000 para los 32 puntos, tampoco fueron tenidos en cuenta. Este costo es un aspecto crítico en la fertilización por sitio específico, por lo que es necesario investigar métodos alternativo de campo y laboratorio a fin de reducir

**TABLA 6.** Resultados de las pruebas de normalidad para las variables de suelo, desarrollo y rendimiento del cultivo usando la prueba estadística Shapiro-Wilk. Lote de maíz, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006.

| Variables                                             | Statistic | Sig.* |
|-------------------------------------------------------|-----------|-------|
| <b>VARIABLES DE SUELO Y DESARROLLO DEL CULTIVO</b>    |           |       |
| Contenido de humedad 1 (CH1) <sup>†</sup>             | 0,956     | 0,216 |
| Contenido de humedad 2 (CH2) <sup>†</sup>             | 0,693     | 0,000 |
| Densidad aparente 1 (DA1) <sup>†</sup>                | 0,969     | 0,465 |
| Densidad aparente 2 (DA2) <sup>†</sup>                | 0,928     | 0,035 |
| Altura planta I (ALP <sub>I</sub> ) <sup>††</sup>     | 0,852     | 0,000 |
| Altura planta II (ALP <sub>II</sub> ) <sup>††</sup>   | 0,923     | 0,025 |
| Altura planta III (ALP <sub>III</sub> ) <sup>††</sup> | 0,984     | 0,907 |
| Índice foliar (IF)                                    | 0,943     | 0,091 |
| <b>VARIABLES SEGÚN RESULTADO DEL ANÁLISIS FOLIAR</b>  |           |       |
| Nitrógeno (N)                                         | 0,944     | 0,097 |
| Fósforo (P)                                           | 0,958     | 0,247 |
| Calcio (Ca)                                           | 0,973     | 0,597 |
| Potasio (K)                                           | 0,960     | 0,281 |
| Magnésio (Mg)                                         | 0,908     | 0,010 |
| Cobre (Cu)                                            | 0,972     | 0,566 |
| Hierro (Fe)                                           | 0,922     | 0,023 |
| Manganeso (Mn)                                        | 0,958     | 0,239 |
| Zinc (Zn)                                             | 0,936     | 0,057 |
| Boro (B)                                              | 0,968     | 0,440 |
| <b>VARIABLES DE RENDIMIENTO DEL CULTIVO</b>           |           |       |
| Plantas/m <sup>2</sup> (PLA)                          | 0,968     | 0,447 |
| Mazorcas cosechadas/m <sup>2</sup> (MC)               | 0,883     | 0,002 |
| Hileras por mazorca (NHM)                             | 0,962     | 0,448 |
| Granos por hilera de mazorca (GHM)                    | 0,915     | 0,038 |
| Peso con amero (PA)                                   | 0,956     | 0,334 |
| Peso sin amero (PSA)                                  | 0,923     | 0,059 |

<sup>†</sup> Muestras tomadas a: 1) 0-0,20 m de profundidad; 2) 0,20-0,40 m de profundidad  
<sup>††</sup> Medida a: (I) 55 días después de la siembra (dds); (II) 90 dds y (III) 140 dds  
\* Cuando sig < 0,05, se considera que la variable no tiene comportamiento normal.

su impacto en la rentabilidad de cultivos comerciales bajo esta concepción (Leiva, 2006).

Al comparar los rendimientos entre las diferentes subzonas, se encuentra que AP1 fue superior en 71% a CAM1 y en 40% a CAM2. Sin embargo, esta última subzona tuvo un rendimiento 31% mayor que AP2 (tabla 11). De otro lado, la diferencia en ingreso neto indica que la subzona AP1, donde se aplicó la mayor dosis de fertilizante nitrogenado, proporcionó mayor beneficio económico. No obstante

**TABLA 7.** Resultados de las prueba de normalidad Shapiro-Wilk, transformando las variables que no presentaron comportamiento normal. Cultivo de lote de maíz, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006.

| Variables*                                           | Shapiro-Wilk |
|------------------------------------------------------|--------------|
| <b>VARIABLES DE SUELO Y DESARROLLO DEL CULTIVO</b>   |              |
| In CH2                                               | 0,000        |
| log <sub>10</sub> CH2                                | 0,000        |
| Raíz cuadrada CH2                                    | 0,000        |
| In DA2                                               | 0,006        |
| log <sub>10</sub> DA2                                | 0,006        |
| Raíz cuadrada DA2                                    | 0,015        |
| In ALP <sub>I</sub>                                  | 0,177        |
| log <sub>10</sub> ALP <sub>I</sub>                   | 0,184        |
| Raíz cuadrada ALP <sub>I</sub>                       | 0,034        |
| In ALP <sub>II</sub>                                 | 0,028        |
| log <sub>10</sub> ALP <sub>II</sub>                  | 0,021        |
| Raíz cuadrada ALP <sub>II</sub>                      | 0,036        |
| <b>VARIABLES SEGÚN RESULTADO DEL ANÁLISIS FOLIAR</b> |              |
| In Mg                                                | 0,086        |
| log <sub>10</sub> Mg                                 | 0,086        |
| Raíz cuadrada Mg                                     | 0,046        |
| In Fe                                                | 0,435        |
| log <sub>10</sub> Fe                                 | 0,435        |
| Raíz cuadrada Fe                                     | 0,133        |
| <b>VARIABLES DE RENDIMIENTO DEL CULTIVO</b>          |              |
| Raíz cuadrada MC                                     | 0,029        |
| In GHM                                               | 0,007        |
| log <sub>10</sub> GHM                                | 0,007        |
| Raíz cuadrada GHM                                    | 0,015        |

In, logaritmo natural; log<sub>10</sub>, logaritmo en base 10; CH2, contenido de humedad a 0,20-0,40 cm de profundidad; DA2, densidad aparente a 0,20-0,40 cm de profundidad; ALP<sub>I</sub>, altura de la planta 55 días después de la siembra (dds) y ALP<sub>II</sub>, altura de la planta 90 dds; MC, mazorcas cosechadas/m<sup>2</sup> y GHM, gramos por hilera de mazorca.  
\* Para la variable se obtuvo 0 en algunos puntos de la grilla, por lo que la única transformación posible fue la de raíz cuadrada; sin embargo, los datos siguieron siendo no normales. Para las siguientes pruebas se usó la transformación logaritmo natural (ln) para las variables ALP<sub>I</sub>, Mg y Fe.

que el rendimiento estuvo afectado por el régimen atípico excesivo de lluvias ocurrido durante el ciclo de cultivo, en particular en algunos puntos de las subzonas CAM1 y AP2, el análisis financiero corrobora las bondades del manejo por sitio específico.

## Conclusiones y recomendaciones

El análisis realizado mediante pruebas de correlación de Pearson y ACP permitió identificar zonas para manejo

**TABLA 8.** Coeficientes de correlación de Pearson\* para las variables de suelo, desarrollo y rendimiento de un cultivo de lote de maíz. Centro Agropecuario Marengo, Universidad Nacional de Colombia, Mosquera (Cundinamarca), Semestre B, 2006.

|                     | In ALP <sub>I</sub> | ALP <sub>I</sub> | ALP <sub>III</sub> | IF    | CH1   | CH2   | DA1   | DA2   | N     | P     | Ca    | K     | In Mg | Cu    | In Fe | Mn    | Zn    | B     | PLA   | MC    | NHM   | GHM   | PA    | PSA   |
|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| In ALP <sub>I</sub> | 1                   | ,619             | ,997               | ,451  | -,323 | -,247 | ,092  | ,154  | ,515  | ,609  | ,046  | -,290 | -,097 | ,268  | -,461 | ,456  | ,258  | ,257  | ,255  | ,401  | ,201  | -,056 | ,201  | ,217  |
| ALP <sub>I</sub>    | ,619                | 1                | ,622               | -,073 | -,179 | -,328 | -,184 | ,206  | ,661  | ,688  | ,366  | -,446 | -,093 | ,288  | -,644 | ,544  | ,241  | -,285 | ,515  | ,482  | ,193  | ,228  | ,341  | ,358  |
| ALP <sub>III</sub>  | ,997                | ,622             | 1                  | ,454  | -,326 | -,256 | ,119  | ,174  | ,512  | ,605  | ,039  | -,293 | -,114 | ,276  | -,441 | ,464  | ,275  | ,266  | ,269  | ,409  | ,211  | -,053 | ,216  | ,236  |
| IF                  | ,451                | -,073            | ,454               | 1     | -,389 | -,144 | ,382  | ,237  | -,067 | ,096  | -,154 | ,017  | -,087 | -,060 | ,039  | ,054  | ,297  | ,439  | -,190 | -,077 | -,069 | -,266 | -,212 | -,107 |
| CH1                 | -,323               | -,179            | -,326              | -,389 | 1     | ,685  | ,007  | -,496 | -,168 | -,349 | -,277 | ,188  | ,156  | ,012  | ,203  | -,341 | -,458 | -,270 | -,026 | -,323 | -,008 | ,058  | -,036 | -,109 |
| CH2                 | -,247               | -,328            | -,256              | -,144 | ,685  | 1     | ,097  | -,784 | -,026 | -,205 | -,251 | ,102  | ,242  | -,010 | ,108  | -,219 | -,353 | -,047 | -,117 | -,226 | -,058 | -,050 | ,133  | ,008  |
| DA1                 | ,092                | -,184            | ,119               | ,382  | ,007  | ,097  | 1     | ,210  | -,159 | -,187 | -,382 | ,095  | ,008  | -,215 | ,090  | -,272 | -,044 | ,382  | ,153  | ,107  | ,223  | -,110 | ,213  | ,303  |
| DA2                 | ,154                | ,206             | ,174               | ,237  | -,496 | -,784 | ,210  | 1     | -,078 | ,087  | ,165  | -,116 | -,010 | -,239 | -,054 | ,094  | ,361  | ,088  | ,045  | ,145  | -,007 | -,054 | -,175 | -,046 |
| N                   | ,515                | ,661             | ,512               | -,067 | -,168 | -,026 | -,159 | -,078 | 1     | ,833  | ,348  | -,632 | ,142  | ,472  | -,465 | ,684  | ,411  | -,276 | ,132  | ,363  | ,181  | ,319  | ,482  | ,480  |
| P                   | ,609                | ,688             | ,605               | ,096  | -,349 | -,205 | -,187 | ,087  | ,833  | 1     | ,243  | -,702 | -,015 | ,286  | -,617 | ,830  | ,533  | -,109 | ,149  | ,416  | -,162 | ,385  | ,363  | ,388  |
| Ca                  | ,046                | ,366             | ,039               | -,154 | -,277 | -,251 | -,382 | ,165  | ,348  | ,243  | 1     | ,067  | ,415  | ,239  | -,035 | ,385  | ,352  | -,109 | -,038 | ,224  | ,246  | ,033  | -,022 | -,057 |
| K                   | -,290               | -,446            | -,293              | ,017  | ,188  | ,102  | ,095  | -,116 | -,632 | -,702 | ,067  | 1     | ,035  | ,054  | ,454  | -,488 | -,271 | ,199  | -,131 | -,124 | ,261  | -,462 | -,366 | -,454 |
| In Mg               | -,097               | -,093            | -,114              | -,087 | ,156  | ,242  | ,008  | -,010 | ,142  | -,015 | ,415  | ,035  | 1     | -,154 | ,071  | ,092  | ,206  | -,026 | -,120 | ,132  | ,136  | -,059 | ,099  | ,047  |
| Cu                  | ,268                | ,288             | ,276               | -,060 | ,012  | -,010 | -,215 | -,239 | ,472  | ,286  | ,239  | ,054  | -,154 | 1     | ,020  | ,108  | ,076  | -,333 | -,076 | ,057  | ,267  | -,150 | -,097 | -,077 |
| In Fe               | -,461               | -,644            | -,441              | ,039  | ,203  | ,108  | ,090  | -,054 | -,465 | -,617 | -,035 | ,454  | ,071  | ,020  | 1     | -,360 | ,039  | ,236  | -,329 | -,417 | -,066 | -,254 | -,345 | -,345 |
| Mn                  | ,456                | ,544             | ,464               | ,054  | -,341 | -,219 | -,272 | ,094  | ,684  | ,830  | ,385  | -,488 | ,092  | ,108  | -,360 | 1     | ,669  | ,029  | ,141  | ,40   | -,114 | ,348  | ,363  | ,293  |
| Zn                  | ,258                | ,241             | ,275               | ,297  | -,458 | -,353 | -,044 | ,361  | ,411  | ,533  | ,352  | -,271 | ,206  | ,076  | ,039  | ,669  | 1     | ,139  | -,117 | ,291  | -,239 | ,052  | ,099  | ,114  |
| B                   | ,257                | -,285            | ,266               | ,439  | -,270 | -,047 | ,382  | ,088  | -,276 | -,109 | -,109 | ,199  | -,026 | -,333 | ,236  | ,029  | ,139  | 1     | -,035 | ,059  | -,041 | ,122  | ,278  | ,267  |
| PLA                 | ,255                | ,515             | ,269               | -,190 | -,026 | -,117 | ,153  | ,045  | ,132  | ,149  | -,038 | -,131 | -,120 | -,076 | -,329 | ,141  | -,117 | -,035 | 1     | ,492  | ,223  | ,348  | ,568  | ,564  |
| MC                  | ,401                | ,482             | ,409               | -,077 | -,323 | -,226 | ,107  | ,145  | ,363  | ,416  | ,224  | -,124 | ,132  | ,057  | -,417 | ,400  | ,291  | ,059  | ,492  | 1     | ,037  | ,224  | ,257  | ,241  |
| NHM                 | ,201                | ,193             | ,211               | -,069 | -,008 | -,058 | ,223  | -,007 | ,181  | -,162 | ,246  | ,261  | ,136  | ,267  | -,066 | -,114 | -,239 | -,041 | ,223  | ,037  | 1     | -,186 | ,300  | ,283  |
| GHM                 | -,056               | ,228             | -,053              | -,266 | ,058  | -,050 | -,110 | -,054 | ,319  | ,385  | ,033  | -,462 | -,059 | -,150 | -,254 | ,348  | ,052  | ,122  | ,348  | ,224  | -,186 | 1     | ,579  | ,627  |
| PA                  | ,201                | ,341             | ,216               | -,212 | -,036 | ,133  | ,213  | -,175 | ,482  | ,363  | -,022 | -,366 | ,099  | -,097 | -,345 | ,363  | ,099  | ,278  | ,568  | ,257  | ,300  | ,579  | 1     | ,954  |
| PSA                 | ,217                | ,358             | ,236               | -,107 | -,109 | ,008  | ,303  | -,046 | ,480  | ,388  | -,067 | -,454 | ,047  | -,077 | -,345 | ,293  | ,114  | ,267  | ,564  | ,241  | ,283  | ,627  | ,954  | 1     |

\* Los coeficientes de correlación mayores a 0,40 se consideraron significativos.

In, logaritmo natural; ALP<sub>I</sub>, altura de la planta 55 días después de la siembra (dds); ALP<sub>III</sub>, altura de la planta 90 dds; IF, índice foliar; CH1, contenido de humedad a 0-0,20 cm de profundidad; CH2, contenido de humedad a 0,20-0,40 cm de profundidad; DA1, densidad aparente a 0-0,20 cm de profundidad; DA2, densidad aparente a 0,20-0,40 cm de profundidad; PLA, planta/m<sup>2</sup>; MC, mazorcas cosechadas; NHM, hileras de grano por mazorca; GHM, granos por hileras; PA, peso de mazorca con amero y PSA, sin amero.

**TABLA 9.** Análisis estructural de variables de suelo, desarrollo y rendimiento del cultivo de lote de maíz. Centro Agropecuario Marengo, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006.

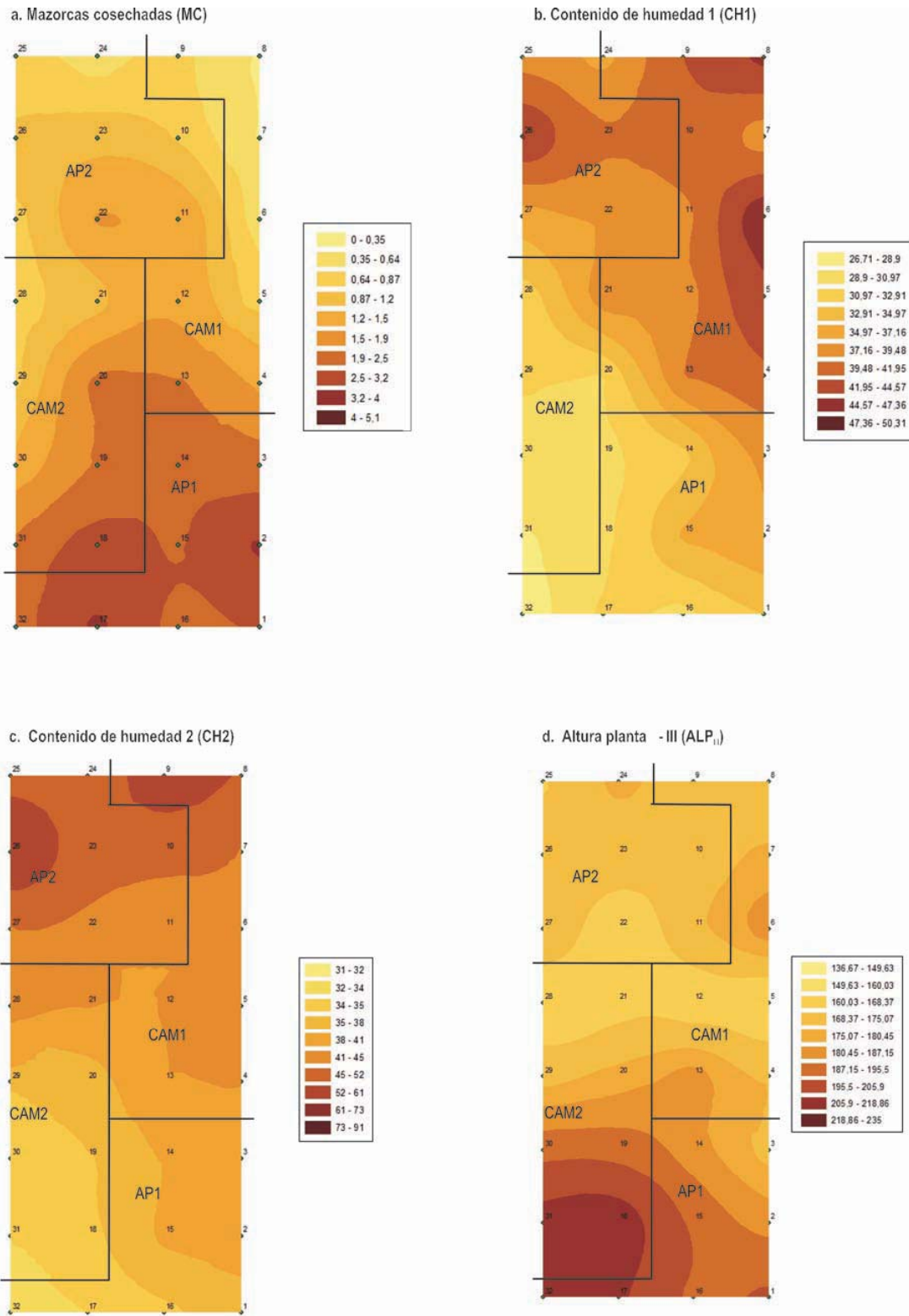
| Variable                                             | Modelo      | Co        | Co+C        | Rango efectivo (m) del modelo | $R_a^2$ | $R_b^2$ | C/(C+Co) |
|------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------|-------------------------------|---------|---------|----------|
| <b>Variables de suelo y desarrollo del cultivo</b>   |             |           |             |                               |         |         |          |
| Contenido de humedad 1 (CH1)                         | Gaussiano   | 16,200    | 63,400      | 167,140                       | 0,970   | 0,404   | 0,744    |
| Contenido de humedad 2 (CH2)                         | Estérico    | 0,100     | 116,800     | 29,600                        | 0,000   | 0,000   | 0,999    |
| Densidad aparente 1 (DA1)                            | EPP         | 0,00751   | 0,00751     | –                             | 0,000   | –       | 0,000    |
| Densidad aparente 2 (DA2)                            | Exponencial | 0,00001   | 0,00839     | 30,600                        | 0,220   | 0,043   | 0,999    |
| ln (ALP <sub>i</sub> )                               | Estérico    | 0,0068    | 0,024       | 193,900                       | 0,870   | 0,162   | 0,717    |
| Altura planta-II (ALP <sub>ii</sub> )                | Exponencial | 18,000    | 346,900     | 210,900                       | 0,859   | 0,490   | 0,948    |
| Altura planta-III (ALP <sub>iii</sub> )              | Exponencial | 191,000   | 792,900     | 279,900                       | 0,833   | 0,185   | 0,759    |
| Índice foliar (IF)                                   | Gaussiano   | 167.000,0 | 484.500,000 | 192,770                       | 0,996   | 0,183   | 0,655    |
| <b>Variables según resultado del análisis foliar</b> |             |           |             |                               |         |         |          |
| N                                                    | Estérico    | 0,037     | 0,384       | 61,700                        | 1,000   | 0,401   | 0,904    |
| P                                                    | Gaussiano   | 0,00171   | 0,00471     | 130,760                       | 0,999   | 0,376   | 0,637    |
| Ca                                                   | Gaussiano   | 0,00004   | 0,0021      | 8,310                         | 0,000   | 0,000   | 0,979    |
| K                                                    | Exponencial | 0,007     | 0,0613      | 74,700                        | 1,000   | 0,071   | 0,886    |
| ln Mg                                                | EPP         | 0,03343   | 0,03343     | –                             | 0,000   | –       | 0,000    |
| Cu                                                   | Estérico    | 0,132     | 2,765       | 45,200                        | 0,819   | 0,150   | 0,952    |
| ln Fe                                                | Exponencial | 0,03240   | 0,1677      | 632,700                       | 0,809   | 0,055   | 0,807    |
| Mn                                                   | Gaussiano   | 101,800   | 210,000     | 99,930                        | 1,000   | 0,311   | 0,515    |
| Zn                                                   | Exponencial | 0,100     | 87,870      | 37,800                        | 0,161   | 0,091   | 0,999    |
| B                                                    | Gaussiano   | 0,650     | 12,110      | 63,040                        | 1,000   | 0,525   | 0,946    |
| <b>Variables de rendimiento del cultivo</b>          |             |           |             |                               |         |         |          |
| Plantas/m <sup>2</sup> (PLA)                         | Exponencial | 1,287     | 3,294       | 589,200                       | 0,472   | 0,072   | 0,609    |
| Mazorcas cosechadas/m <sup>2</sup> (MC)              | Exponencial | 0,001     | 1,618       | 26,400                        | 0,017   | 0,180   | 0,999    |
| Hileras por mazorca (NHM)                            | EPP         | 0,13455   | 0,13455     | –                             | 0,000   | –       | 0,000    |
| Granos por hilera de mazorca (GHM)                   | EPP         | 0,88380   | 0,8838      | –                             | 0,000   | –       | 0,000    |
| Peso con amero (PA)                                  | EPP         | 320,31971 | 320,31971   | –                             | 0,000   | –       | 0,000    |
| Peso sin amero (PSA)                                 | EPP         | 173,94948 | 173,94948   | –                             | 0,000   | –       | 0,000    |

EPP, efecto pepita puro; Co, pepita, C, meseta;  $R_a^2$ ,  $R^2$  de variograma;  $R_b^2$ ,  $R^2$  de validación cruzada.

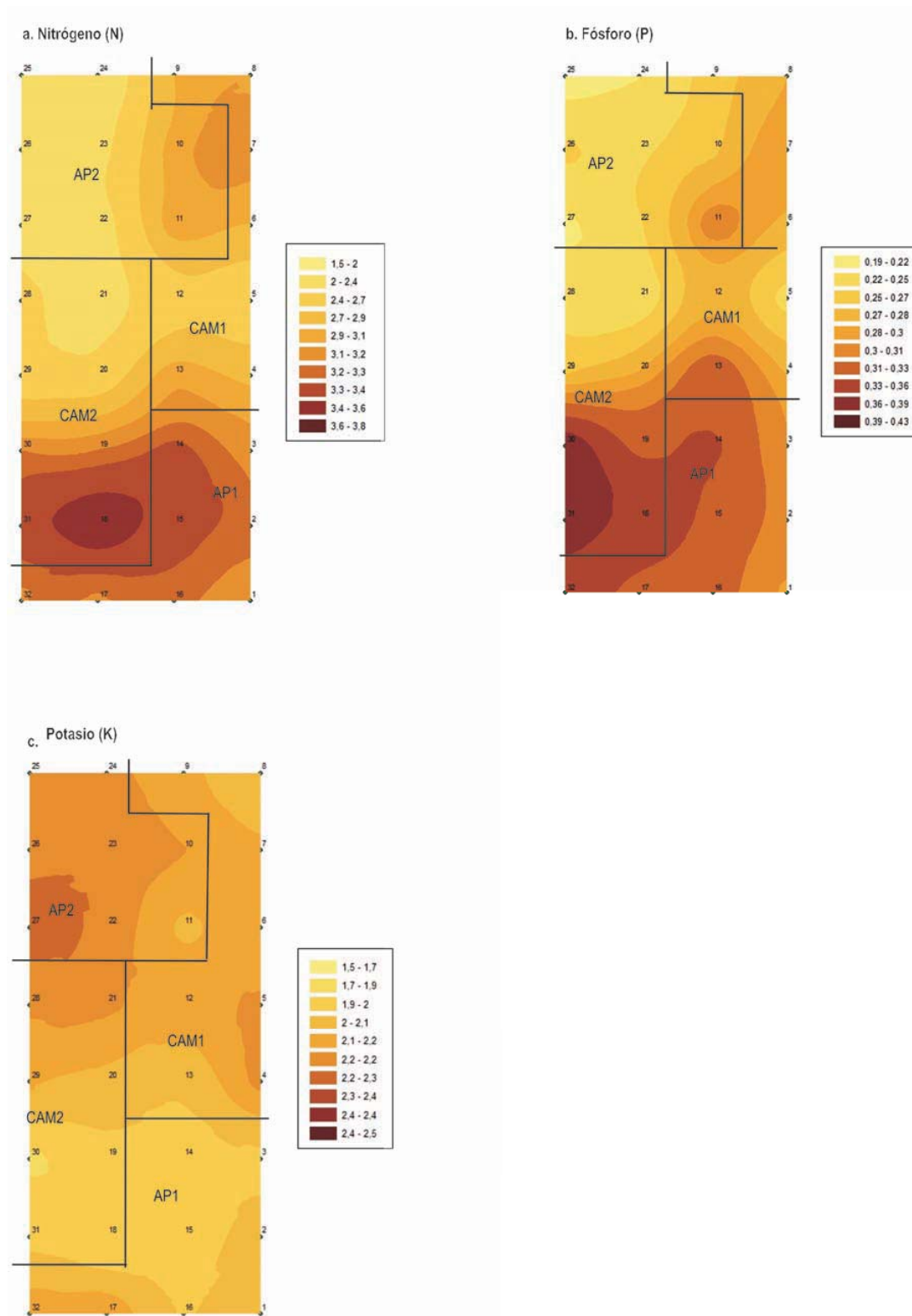
de la fertilidad por sitio específico y establecer dosis requeridas de fertilizantes para cada una de ellas. Igualmente, se encontraron otros factores limitantes de la producción, tal como ocurrió con el exceso de humedad durante el ciclo del cultivo, que afectó el rendimiento en algunas partes del lote. La metodología usada, con base en estadística descriptiva y geoestadística, mostró ser

adecuada para la gestión de los datos y la toma de decisiones sobre fertilización.

El análisis de los semivariogramas permitió identificar posibles distancias de muestreo con fines de manejo específico por sitio para los suelos analizados. Sin embargo, se recomienda mayor investigación para adaptar la metodología



**FIGURA 2.** Mapas de MC, CH1, CH2 y ALP<sub>III</sub> en un lote de maíz. Centro Agropecuario Marengo, Universidad Nacional de Colombia, Mosquera. Semestre B, 2006. AP1 y AP2 son subzonas para manejo específico por sitio y CAM1 y CAM2, subzonas de manejo convencional.



**FIGURA 3.** Mapas de N, P y K en un lote de maíz. Centro Agropecuario Marengo, Universidad Nacional de Colombia, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006. AP1 y AP2 son subzonas para manejo específico por sitio y CAM1 y CAM2, subzonas de manejo convencional.

**TABLA 10.** Costos de fertilizantes empleados en el lote 8 de maíz, Centro Agropecuario Marengo, Universidad Nacional de Colombia, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006.

| Insumo                     | Precio (\$/kg)* | Cantidad utilizada en zonas para manejo específico por sitio (kg·ha <sup>-1</sup> ) |                 | Cantidad utilizada en zonas de manejo convencional (kg·ha <sup>-1</sup> ) | Costo fertilizantes AP1 (\$) | Costo fertilizantes AP2 (\$) | Costo fertilizantes CAM1 y CAM2 (\$) |
|----------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
|                            |                 | Subzona 1 (AP1)                                                                     | Subzona 2 (AP2) | Subzonas 1 y 2 (CAM1 y CAM2)                                              |                              |                              |                                      |
| Urea                       | 926             | 239,9                                                                               | 217,9           | 130,0                                                                     | 222,147                      | 201,775                      | 120,380                              |
| Super fosfato triple (SPT) | 790             | 132,6                                                                               | 132,6           | 109,0                                                                     | 104,754                      | 104,754                      | 86,110                               |
| Sulfato de potasio         | 1315            | 56                                                                                  | 112             | 170,0                                                                     | 73,640                       | 147,280                      | 223,550                              |
| Agrimins                   | 1322            | 46                                                                                  | 46              | 46,0                                                                      | 60,812                       | 60,812                       | 60,812                               |
| Totales                    |                 |                                                                                     |                 |                                                                           | 461,353                      | 514,621                      | 490,852                              |

\* Fuente: Boletín Sipsa 5(9), septiembre de 2006

**TABLA 11.** Rendimiento en bultos/ha y comparación de costos e ingresos para las subzonas AP1, AP2, CAM1 y CAM2. Cultivo de lote de maíz, Centro Agropecuario Marengo, Mosquera (Cundinamarca). Semestre B, 2006.

| Subzonas | Rendimiento (bultos/ha) | Ingresos* (\$/ha) | Diferencia en costos frente a CAM1 (\$/ha) | Diferencia en ingresos frente a CAM1 (\$/ha) | Diferencia en ingreso neto frente a CAM1 (\$/ha) |
|----------|-------------------------|-------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| AP1      | 93,1                    | 3'258.500         | -29.499                                    | 2'327.000                                    | 2'356.499                                        |
| AP2      | 38,1                    | 1'334.200         | 23.769                                     | 403.200                                      | 379.431                                          |
| CAM1     | 26,6                    | 931.000           | –                                          | –                                            | –                                                |
| CAM2     | 55,4                    | 1'939.000         | –                                          | 1'008.000                                    | 1'008.000                                        |

AP1 y AP2, subzonas para manejo específico por sitio; CAM1 y CAM2, subzonas de manejo convencional  
\* \$35.000 por bulto de 50 kg de mazorca para el 10 de julio de 2007

de la fertilidad por sitio específico y establecer dosis requeridas de fertilizantes para cada una de ellas. Igualmente, se encontraron otros factores limitantes de la producción, tal como ocurrió con el exceso de humedad durante el ciclo del cultivo, que afectó el rendimiento en algunas partes del lote. La metodología usada, con base en estadística descriptiva y geoestadística, mostró ser adecuada para la gestión de los datos y la toma de decisiones sobre fertilización.

El análisis de los semivariogramas permitió identificar posibles distancias de muestreo con fines de manejo específico por sitio para los suelos analizados. Sin embargo, se recomienda mayor investigación para adaptar la metodología internacional utilizada a las condiciones particulares de los suelos agrícolas del país.

El análisis del beneficio financiero, realizado mediante presupuestos parciales, muestra mejores resultados con la fertilización específica por sitio, al compararla con el manejo convencional. No obstante, se requiere mayor investigación en métodos económicos de muestreo de suelos, con el fin de reducir los costos para implementar el manejo por sitio específico de la fertilidad.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas (Colciencias) y a la Universidad Nacional de Colombia, por la financiación de este proyecto de investigación.

## Literatura citada

- Adrian, A.M., S.H. Norwood y P.L. Mask. 2005. Producer's perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies. *Computers and Electronics in Agriculture* 48, 256-271.
- Auernhammer, H. 2001. Precision farming: the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture* 30, 31-43.
- Bongiovanni, R. 2004. La agricultura de precisión en la cosecha. IDIA XXI Revista de Información sobre Investigación y Desarrollo Agropecuario 6, 85-90
- Boruvka, L., M. Lenka, V. Penizek, O. Drabek y R. Vasat. 2007. Forest soil acidification assessment using principal component analysis and geostatistics. *Geoderma* 140, 374-380.
- Bouma, J., J. Stoorvogel, B.J. Van Alphen y H.W.G. Booltink. 1999. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 63, 1763-1768.
- Burrough, P.A., 1993. Soil variability: a late 20<sup>th</sup> Century view. *Soils and Fertilizers* 56, 529-562.
- Castrignanò, A., L. Giugliarini, R. Risaliti y N. Martinelli. 2000. Study of spatial relationships among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics. *Geoderma* 97, 39-60.
- Cerri, C.E.P., M. Bernouxb, V. Chaplotb, B. Volkoffb, R.L. Victoria, J.M. Melillo, K. Paustiand y C.C. Cerri. 2004. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. *Geoderma* 123, 51-68.
- Espinal, F., H. Martínez y X. Acevedo. 2005. La cadena de cereales, alimentos balanceados para animales, avicultura y porcicultura en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica. 1991-2005. En: Observatorio de agrocadenas. <http://www.agrocadenas.gov.co>; consulta: mayo de 2007.
- FAO. 1993. Capítulo 1: Introducción. En: FAO. El maíz en la nutrición humana. Colección FAO Alimentación y nutrición, N° 25.
- Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas (Fenalce). 2007. En: Indicadores cerealistas. <http://www.fenalce.org/archivos/Indicadores.pdf>; consulta: octubre de 2007.
- Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89, 1-45.
- Isaacs, C.H., V. Carrillo, E. Anderson, J. Carbonell y B.V. Ortíz. 2004. Desarrollo de un sistema interactivo de información en web con el enfoque de agricultura específica por sitio. Serie Técnica N° 34. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña), Cali (Colombia).
- Kerry, R. y M. Oliver. 2004. Average variograms to guide soil sampling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5, 307-325.
- Leiva, F.R. 2003. La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista. En: Memorias VIII Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos, julio 2-5 de 2003, Bogotá.
- Leiva, F.R. 2006. Aproximación metodológica al manejo por sitio específico del suelo para la sostenibilidad y competitividad de cultivos transitorios en Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 36(2), 49-56.
- Leiva, F.R., J. Morris y S. Blackmore. 1997. Precision farming techniques for sustainable agriculture. pp. 957-965. En: Statford, J.V. (ed.). Precision agriculture '97. Vol. I. Spatial variability in soil and crop. BIOS/SCI, Reino Unido.
- Luengas, C.A., J.H. Camacho-Tamayo y F.R. Leiva. 2007. Comportamiento de la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y su relación con el contenido de carbono orgánico. pp. 61-68. En: Memorias III Encuentro de Agricultura de Conservación, junio 6-8 de 2007, Villavicencio (Colombia).
- Montgomery, E.G. 1911. Correlation studies of corn. *Nebraska Agricultural Station Annual Report* 24, 108-159.
- Ospina, J.G. 1999. Tecnología del cultivo del maíz. 1ª ed. Produmedios, Bogotá. 335 p.
- Salamanca, C., F.R. Leiva y L. Guerrero, L. 2007. Evaluación del manejo de la fertilidad del suelo por sitio específico en un cultivo comercial de arveja (*Pisum sativum* L.) en la Sabana de Bogotá. 2007. pp. 30-45. En: Memorias III Encuentro de Agricultura de Conservación, junio 6-8 de 2007, Villavicencio (Colombia).
- Sinclair, T.R. y T. Horie. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Sci.* 29, 90-98.
- Warrick, A. y D. Nielsen. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. pp. 319-344. En: Hillel, D. (ed.). Applications of soil physics. Academic Press, Nueva York.
- Zhang, N., W. Mahoua y N. Wang. 2002. Precision agriculture, a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture* 36, 113-132.