

Variabilidad del Crecimiento y Rendimiento del Cultivo de Maíz para Choclo (*Zea mays* L.) como Respuesta a Diferencias en las Propiedades Químicas del Suelo en la Sabana de Bogotá, Colombia

Variability in Growth and Yield of Maize (*Zea mays* L.) in Response to Differences in Soil Chemical Properties in the Bogotá Plateau, Colombia

Jaiver Danilo Sánchez Torres¹; Gustavo Adolfo Ligarreto Moreno² y Fabio Rodrigo Leiva Barón³

Resumen. Se estudió el crecimiento de un cultivo de maíz mediante un red sistemática de 32 puntos donde se recolectaron muestras de suelos para determinar pH, N, Ca, K, Mg, Na, Al, P, Cu, Fe, Mn, Zn y B. Se utilizó el análisis de componentes principales para determinar que variables de suelos incidían sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo. Posteriormente con un análisis de conglomerados se agruparon los sitios homogéneos según estas características químicas. En esos mismos puntos, se tomaron muestras del material vegetal a los 35, 59, 91, 115, 146 y 162 días después de siembra (dds) y se realizó el análisis de crecimiento calculando la tasa de crecimiento de cultivo (TCC), tasa de asimilación neta (TAN) e índice de área foliar (IAF), y a los 162 dds se evaluó la cosecha. Se realizó un análisis del crecimiento del cultivo y para cada zona homogénea se elaboraron las curvas de crecimiento. El crecimiento del cultivo presentó estructura espacial y su variabilidad fue explicada por un grupo de variables químicas relacionadas con la fertilidad del suelo. Las diferencias en las TCC se debieron a la variabilidad de las TAN y los IAF entre los sitios durante el desarrollo del cultivo; la TAN fue diferente entre los sitios de mayor y menor fertilidad en las etapas iniciales de desarrollo del cultivo; entre tanto, el IAF fue superior todo el ciclo del cultivo en los sitios más fértiles.

Palabras clave: Agricultura específica por sitio, manejo de suelos, fisiología de cultivos, zonas homogéneas.

Abstract. Corn growth was studied through a systematic network of 32 points where were collected soil samples to determine pH, N, Ca, K, Mg, Na, Al, P, Cu, Fe, Mn, Zn, and B. We used the method of principal components to determine which soil variables had an effect on growth and crop yield. Subsequently homogeneous sites according to chemical characteristics were grouped using cluster analysis. In the same points, samples were taken from the plant material at 35, 59, 91, 115, 146 and 162 days after sowing (das), and analysis was performed by calculating the crop growth rate (CGR) net assimilation rate (NAR) and leaf area index (LAI), also at 162 das harvest was evaluated. Analysis of crop growth was performed and for each homogeneous cluster were draw growth curves. Crop growth presented a spatial structure which was explained by a group of chemical variables related to soil fertility. Differences in the CGR were due to the variability of NAR and LAI among homogeneous cluster during the growing season, the NAR was different between the homogeneous zones of high and low fertility in the early stages of crop development; meanwhile, LAI was higher throughout the growing season in the most fertile zones.

Key words: Site-specific agriculture, soil management, crop physiology, homogeneous zones.

La acumulación de materia seca por una población de plantas, depende principalmente del total de carbono fijado y obedece a la intercepción de radiación fotosintéticamente activa y su uso eficiente por el dosel del cultivo. La intercepción es determinada en primer lugar por el índice de área foliar (IAF) y por el coeficiente de extinción, un índice de eficiencia de intercepción de la radiación, mientras que la eficiencia fisiológica en el uso de esta radiación puede medirse de manera indirecta a través de la tasa de asimilación neta (TAN) que es la ganancia neta de asimilados por unidad de área foliar en un tiempo determinado. El IAF y la TAN son componentes de la tasa de

crecimiento del cultivo (TCC) que mide la ganancia de materia seca por una población de plantas en una determinada área (Hay y Porter, 2006; Lindquist *et al.*, 2005; Loomis y Amthor, 1999; Sinclair y Muchow, 1999).

Estos componentes fisiológicos (IAF y TAN) son afectados por la absorción de agua y nutrientes por la raíz, y cuando existe estrés por alguno de estos factores; por ejemplo, por deficiencias nutricionales se puede afectar la captura de radiación y su eficiencia en la producción de biomasa (Tollenaar *et al.*, 2006; Maddonni *et al.*, 2006).

¹ Investigador. CENIBANANO-AUGURA. Apartado aéreo 52814, Urbanización Los Almendros, Municipio de Carepa, Antioquia, Colombia. <jsanchez@augura.com.co>

² Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá - Facultad de Agronomía - Departamento de Agronomía. Carrera 45 No. 26-85, Bogotá. Colombia. <galigarretom@unal.edu.co>

³ Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá - Facultad de Agronomía - Departamento de Agronomía. Carrera 45 No. 26-85, Bogotá, Colombia. <frleivab@unal.edu.co>

Recibido: Noviembre 9 de 2011; aceptado: Agosto 06 de 2012.

Dentro de un campo de cultivo con manejo agronómico homogéneo, la variabilidad de las propiedades químicas, biológicas y físicas del suelo usualmente conduce a diferencias en el crecimiento y desarrollo de las plantas, y por ende en el rendimiento del cultivo (Srinivasan, 2006; Rodríguez *et al.*, 2008).

El aumento del tamaño de las áreas de cultivo y el uso intensivo de la mecanización llevó al manejo homogéneo de los campos sin tener en cuenta la variabilidad espacial de los lotes de siembra representada en las diferencias químicas y físicas en el espacio; sin embargo, hoy en día es posible ajustar el manejo entre lotes de cultivo e incluso al interior de estos de acuerdo a la variabilidad físico-química presentada. El manejo específico por sitio de acuerdo a las propiedades físicas y químicas del suelo, tiene en cuenta la variabilidad en los sistemas agrícolas y propende por la optimización de los rendimientos y la calidad de los cultivos, de acuerdo con la capacidad productiva de cada sitio, el mejoramiento del manejo de los recursos y la protección del medio ambiente (Leiva, 2008; Srinivasan, 2006; Zhang *et al.*, 2002).

Para implementar el manejo del cultivo específico por sitio en aspectos como la cantidad y tipo de fertilización se requiere generar un volumen considerable de información que muestre la complejidad del sistema suelo. En sistemas agrícolas por lo general se necesita simplificar esa información, de manera que ese manejo pueda llevarse a la práctica de campo. Con este fin, se ha propuesto la identificación de zonas con características homogéneas a partir de las características del clima, del suelo y/o del rendimiento del cultivo, para mejorar la comprensión de las interacciones clima - suelo - cultivo y establecer manejos específicos por sitio (Williams *et al.*, 2008; Liu y Samal, 2002; Leiva, 2006; Rodríguez *et al.*, 2008; Bakhsh *et al.*, 2007).

La identificación de zonas homogéneas se puede realizar en diferentes escalas y depende del objeto del estudio, ya que sirven como herramienta para tomar decisiones desde política pública o privada para organizar la investigación e inversiones por zonas homogéneas, hasta decisiones a nivel de lote para realizar manejos agronómicos específicos por zonas. (Williams *et al.*, 2008; Liu y Samal, 2002; Bakhsh *et al.*, 2007; Leiva, 2006; Isaacs *et al.*, 2004).

Las zonas homogéneas se pueden delimitar basados en una sola variable, un ejemplo son los mapas de contorno univariados que emplean geoestadística;

o utilizar enfoques multivariados como análisis de conglomerados, análisis de componentes principales, redes neuronales artificiales y lógica difusa (Vásquez *et al.*, 2010; Salski, 2007; Liu y Samal, 2002; Ortega y Santibáñez, 2007; Sánchez, 2008; Bakhsh *et al.*, 2007; Williams *et al.*, 2008; Barreto *et al.*, 2007; Leiva, 2006; Isaacs *et al.*, 2004).

El estudio tuvo como objetivo caracterizar la variabilidad espacial y temporal del crecimiento y rendimiento del cultivo del maíz para choclo (*Zea mays*) a partir de las diferencias específicas por sitio en las propiedades químicas de un lote de cultivo en la Sabana de Bogotá y agrupar los sitios por zonas homogéneas de manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el lote siete en una siembra comercial de dos hectáreas en el Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, ubicado en el municipio de Mosquera, Cundinamarca (Colombia), coordenadas 4° 42" de latitud norte y a 74° 12" longitud oeste, a 20 km de Bogotá D.C. La altitud es de 2.547 msnm, la temperatura promedio anual de 12,9 °C, la precipitación promedio de 820 mm año, la humedad relativa media de 78% y el brillo solar de 4,8 horas diarias. El suelo fue clasificado como Fluventic Humic Dystrudepts a partir del estudio de suelos de Cundinamarca elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2000).

La información de la radiación diaria del sitio del estudio se obtuvo a través del Atmosphere Ocean Model, en <http://aom.giss.nasa.gov/srlocat.html>; esta es una medida flujo de energía del solar ($W m^{-2}$) recibida en una ubicación particular por encima de la atmósfera de la tierra. Los datos de precipitación se obtuvieron de la visualización interactiva en línea GES-DISC y de la infraestructura de análisis (Giovanni) como parte del Centro Goddard de Ciencias de la Tierra y el Centro de Información (DISC) que son parte de la NASA <http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/help.precip.shtml#credits>. En la Figura 1 se presenta la información de dichas variables durante el desarrollo del estudio.

Para determinar el estado de las propiedades químicas del suelo en el área de cultivo de maíz, se conformó una cuadrícula (grilla) regular de 25 x 25 m, con puntos de muestreo referenciados mediante coordenadas cartesianas (X - Y). En esta grilla se realizó de manera sistemática el muestreo tanto del suelo para análisis químico como del material

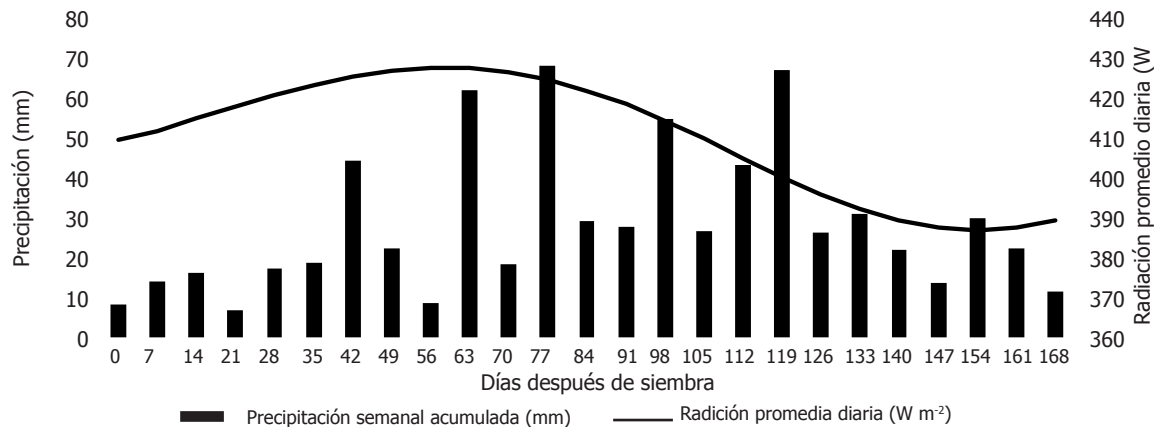


Figura 1. Variabilidad de la radiación diaria y la precipitación semanal acumulada durante el estudio en el Centro Agropecuario Marengo, Mosquera, Colombia.

vegetal para el análisis de crecimiento y rendimiento. En total se tomaron 32 puntos, evitando los efectos de bordes del lote. Se estableció el cultivo de maíz para choclo utilizando la variedad ICA V-508 de clima frío, de granos harinosos, de color amarillo y carmelito (tipo cacao) (Moreno, 1984). Se utilizó el manejo tecnológico de siembra comercial que usan los productores de choclo en la zona, aplicándolo de manera homogénea en todo el lote que consistió en: distancia de siembra de 0,80 m entre surcos y 0,25 m entre plantas, para una densidad de 50.000 plantas/ha; aplicación de Nitrógeno 25 kg ha⁻¹, 25 kg ha⁻¹ de P y 25 kg ha⁻¹ de K, utilizando el fertilizante compuesto 15-15-15.

En cada punto referenciado se tomaron muestras para análisis químico y de textura del suelo a los 60 días después de siembra (dds) del maíz; esto es, 40 días después de la única fertilización realizada en el cultivo. De otro lado, se determinó el contenido foliar de nutrientes cuando el 50% de la población se encontraba en floración (90 dds), los respectivos análisis se realizaron en el Laboratorio de Química de Suelos en la Facultad de Agronomía, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Para evaluar el rendimiento del cultivo, a los 162 dds se delimitó un área de 9 m² alrededor de cada punto de la grilla, todas las plantas dentro de esta área fueron cosechadas y su rendimiento medido mediante pesaje de la mazorca para choclo, como se comercializa en el mercado de Bogotá.

Con la información de las variables químicas de cada punto, se realizó un análisis de componentes principales utilizando en software SPSS 12,0 (2006)

lo que permitió agrupar variables de mayor variación entre cada componente y determinar la relación entre las mismas. Luego, se realizó un análisis de correlación entre las puntuaciones factoriales de los componentes principales obtenidos y el rendimiento de cada sitio para determinar qué grupo de variables tenía relación con el rendimiento. Utilizando las puntuaciones factoriales de la componente relacionada con el rendimiento se realizó el agrupamiento de los sitios, utilizando el método de K-medias del análisis de conglomerados (SPSS, 2006; Díaz, 2002; Hidalgo, 2003).

Se analizó el crecimiento del cultivo del maíz en cada uno de los 32 sitios, usando la TCC y sus componentes el IAF y la TAN (Hunt, 2003; Gardner *et al.*, 1985). Los muestreos se realizaron a los 21, 35, 59, 91, 115, 146 y 162 dds. La materia seca producida por el cultivo se determinó llevando cada estructura de la planta, excepto las raíces, hasta peso constante en una estufa de ventilación forzada a 80 °C durante 72 h.

Para el cálculo de la TCC se aplicó la siguiente ecuación (Fageria *et al.*, 2006; Gardner *et al.*, 1985).

$$TCC(g \times d^{-1} \times m^{-2}) = \frac{W_2(g) - W_1(g)}{t_2(d) - t_1(d)} \times \frac{1}{AS(m^2)}$$

Donde W₂= Peso al final del periodo evaluado, W₁= Peso al inicio del periodo evaluado, t₂= Tiempo final, t₁= Tiempo inicial y AS= Área de suelo.

Para la determinación del IAF se contó el número de hojas que visualmente presentaban más del 50% de color verde como indicativo de presencia de clorofila

y de actividad fotosintética y se calculó el área foliar mediante la función $AF = \text{Largo} \times \text{ancho} \times 0,75$, que se utiliza comúnmente en la mayoría de trabajos en maíz (Maddonni y Otegui, 1996). El IAF se determinó con la siguiente ecuación:

$$IAF = \frac{AF (m^2) \times \text{No. plantas}}{AS (m^2)}$$

Donde:

AF = Área foliar por planta,

No. Plantas = Número de plantas por área sembrada

AS = Área del suelo.

La TAN se calculó de la siguiente manera:

$$TAN (g \times m^{-2} \times d^{-1}) = \frac{LnAF_2 - LnAF_1}{AF_2 (m^2) - AF_1 (m^2)} \times \frac{W_2 (g) - W_1 (g)}{t_2 (d) - t_1 (d)}$$

Donde

Ln = Logaritmo natural,

AF₁ = Área foliar en el tiempo inicial,

AF₂ = Área foliar en el tiempo final.

Para determinar si la TCC, el IAF y la TAN tenían estructura de autocorrelación espacial en los muestreos a los 35 dds, 59 dds, 91, 115, 146 y 162 dds, se realizó el análisis estructural por medio del semivariograma experimental y ajustando a modelos teóricos según Leiva (2006). De acuerdo con los agrupamientos de sitios obtenidos mediante K-medias, se realizaron las curvas de TCC, IAF y TAN para cada zona homogénea, según promedio de los datos correspondiente a las grillas de cada zona homogénea, ya que, incluso cuando hay cierta

homogeneidad espacial por zona, no todo el suelo es igual y por ende los rendimientos varían con el ambiente de cada sitio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sánchez (2008) determinó que las variables químicas de suelo del lote bajo estudio presentaban diferentes comportamientos espaciales. A partir de esta información, con el propósito de agrupar las variables y reducir la complejidad del sistema, en este estudio se realizó un análisis factorial con método de extracción de componentes principales encontrando que cuatro componentes explicaban el 79,2% de la variabilidad (Tabla 1). Con las puntuaciones factoriales por sitio de cada componente se realizó el análisis espacial y se estableció que cada componente principal presentaba un comportamiento espacial diferente.

Utilizando las puntuaciones factoriales de cada sitio por componente, se realizaron las correlaciones con el rendimiento del cultivo (Tabla 1). El componente I fue el único que correlacionó significativamente con el rendimiento y lo hizo de manera positiva. Por esta razón, para la determinación de zonas homogéneas por características de suelo que influyeran sobre el rendimiento del cultivo del maíz, se utilizaron estas puntuaciones factoriales. Para esto se utilizó el análisis de conglomerados K-medias, definiendo cuatro zonas de manejo homogéneo. Para cada una se presentan los valores promedios de rendimiento, del contenido de elementos en el suelo y del contenido foliar de nutrientes a floración (Tabla 2), así como la distribución espacial del rendimiento por zonas homogéneas (Figura 2).

Tabla 1. Varianza explicada por cada componente principal, análisis de estructura espacial de los componentes y su correlación con el rendimiento de un cultivo de maíz. Mosquera, Colombia.

Componente	Valores propios de los componentes			Análisis espacial de los componentes					Correlación de los componentes con el rendimiento	
	Total	Varianza (%)	Varianza acumulada (%)	Modelo	Pepita	Meseta	Rango*	R ² **	Coefficiente	Probabilidad
1,00	6,317	39,480	39,480	Esférico	0,01	1,22	135,90	0,99	0,72	0,00
2,00	3,378	21,113	60,593	Exponencial	0,46	1,27	157,20	0,98	-0,32	0,08
3,00	1,797	11,229	71,821	Esférico	0,05	1,00	54,80	0,99	-0,07	0,72
4,00	1,187	7,418	79,239	Exponencial	0,00	0,94	46,20	0,18	-0,01	0,96

* Rango efectivo del modelo. ** R² del semivariograma.

Tabla 2. Resultados en términos de rendimiento y de características químicas de los suelos por grupos definidos mediante el algoritmo K-medias en un cultivo de maíz. Sabana de Bogotá. Mosquera, Colombia.

Época	Nodo		Z1	Z2	Z3	Z4
Cosecha	Rendimiento	kg m ⁻²	1,06	0,90	0,38	0,46
	CE	Ds m ⁻¹	1,57	1,24	1,07	1,23
	pH		5,14	5,12	5,32	5,08
	CO		4,06	3,41	2,68	2,59
	N	%	0,35	0,29	0,23	0,22
Análisis de suelos	Ca	cmol kg ⁻¹	12,81	10,74	10,04	8,65
	Mg		3,60	3,01	2,76	2,64
	Na		1,65	0,96	1,01	1,00
	K		2,02	0,92	0,67	0,52
	Al		0,05	0,14	0,12	0,33
	H	mg kg ⁻¹	0,17	0,11	0,10	0,14
	CIC		28,23	24,67	22,60	22,33
	P		140,00	138,59	111,91	97,90
	Mn		5,66	5,07	6,25	3,51
	Zn		23,79	13,56	11,79	6,57
	Fe		449,50	438,94	427,14	418,67
	Cu	%	1,24	0,95	0,81	0,53
	B		0,75	0,56	0,46	0,47
	Ar		40,88	39,11	35,43	36,47
	L		30,50	29,66	30,97	32,80
	A		28,63	31,24	33,60	30,73
Análisis foliar	N	%	3,28	3,17	2,42	2,80
	P		0,46	0,41	0,26	0,27
	Ca		0,61	0,54	0,39	0,37
	K		1,93	2,08	2,52	2,24
	Mg		0,18	0,13	0,09	0,09
	Cu	mg kg ⁻¹	4,50	5,60	6,20	6,80
	Fe		136,30	140,40	159,60	158,70
	Mn		94,80	79,60	40,60	59,30
	Zn		95,30	80,20	44,40	49,30
	B		13,30	15,30	16,10	14,50

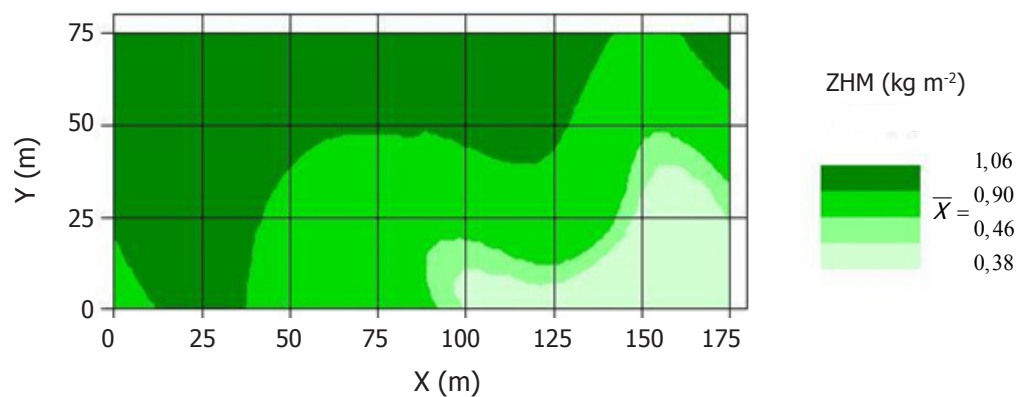


Figura 2. Zonas homogéneas (ZHM) delimitadas según el nivel de rendimiento obtenido en cada uno de los grupos definidos mediante el análisis de conglomerados K-medias en un cultivo de maíz, Sabana de Bogotá. Mosquera, Colombia.

En la Figura 2, las zonas 1 y 2 corresponden a los rendimientos más altos y a los mayores contenidos en el suelo de Ca, Mg, K, N, P, Zn, Fe, B y Cu; así como de CIC, CE y contenido de arcilla (Tabla 2). De igual manera, en estas zonas se encontraron los más altos contenidos foliares de N, P, Ca, Mg, Mn, Zn, pero los menores contenidos foliares de K, Fe y Cu. En la zona 3 de menor rendimiento del maíz se presentaron niveles foliares inferiores de N y superiores de K a los rangos establecidos para maíz (García, 2002). En todas las zonas el Mg foliar estuvo por debajo de los niveles adecuados. Las zonas 1 y 2 mostraron niveles foliares superiores al rango para el Zn y por debajo del rango para Cu, mientras que la zona 1 presentó dato superior al rango óptimo para P del suelo y foliar. Todas estas variables estuvieron relacionadas con una mayor fertilidad del suelo, comportamiento que fue un factor determinante en el mayor o menor rendimiento del cultivo.

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta que el potencial del grano como vertedero, su crecimiento y por lo tanto el rendimiento final del cultivo están relacionados con la disponibilidad de nutrientes (Rengel, 2003; Banziger *et al.*, 2002; Tian *et al.*, 2006; Melchiori y Caviglia, 2008; Moser *et al.*, 2006). Las zonas que presentaron mayores rendimientos fueron las que tuvieron un mayor contenido de nutrientes y un mejor balance entre estos; sin embargo, el Mg fue

un nutriente limitante en todas las zonas, sugiriendo que probablemente el potencial productivo del cultivo no se expresó en ninguno de las zonas.

En el análisis de la variabilidad del crecimiento de maíz se tiene que el comportamiento promedio de la TCC presentó una tendencia similar a través del tiempo en las cuatro zonas homogéneas, siendo más baja en los estados iniciales de crecimiento y aumentando hacia la época de floración del cultivo (90 dds), época crítica de desarrollo del cultivo, con un leve descenso después de floración y presentando los mayores valores durante la etapa de llenado del grano (Figura 3). Comportamiento favorable para el crecimiento del cultivo, resultados que coinciden con lo indicado por Otegui y Bonhomme (1998), quienes demostraron que durante el periodo de expansión en el crecimiento de la mazorca que inicia 227 días (con temperatura base de 8 °C) antes de floración y continua hasta 100 días después de floración, aproximadamente 40% de la longitud de la mazorca se alcanza antes de la floración y el restante 40%, después. Por lo tanto, restricciones en la disponibilidad de nutrientes y factores climáticos adversos durante esta ventana crítica pueden reducir fuertemente el número de granos por planta y por lo tanto el rendimiento final del maíz (Uribelarrea *et al.*, 2008; Ritchie y Alagarswamy, 2003; D'andrea *et al.*, 2008; Maddonni *et al.*, 2006).

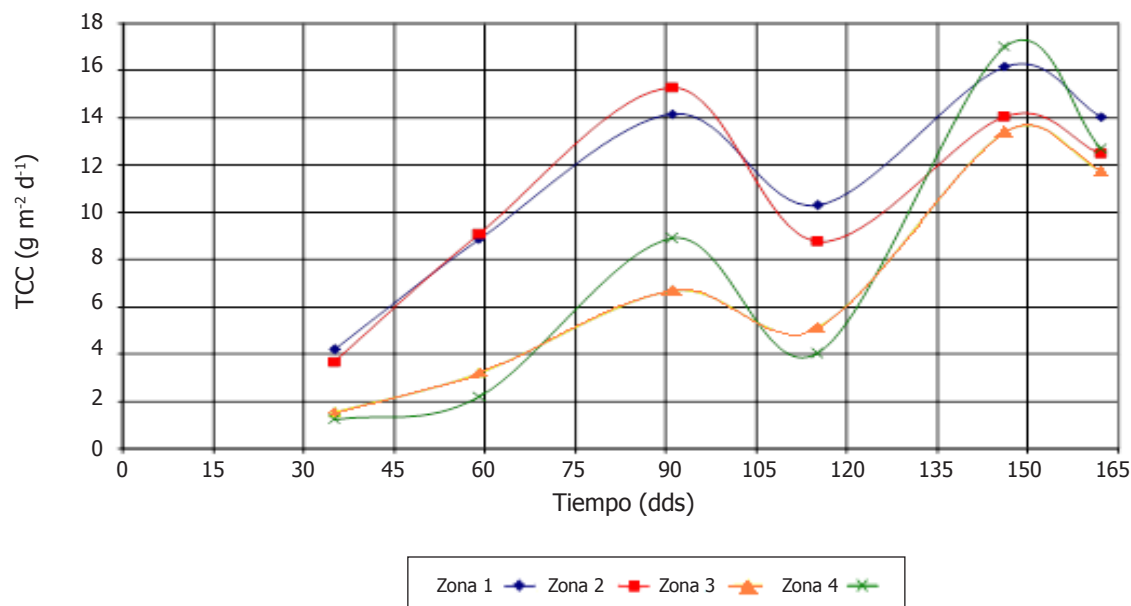


Figura 3. Comportamiento de la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) por grupo de suelos, en un lote de maíz, Sabana de Bogotá. Mosquera, Colombia.

Los valores de la TCC fueron superiores en las zonas 1 y 2, corroborando el porqué de las diferencias encontradas en el rendimiento del cultivo. Las TCC promedias durante el desarrollo del maíz para choclo fueron de 2,20; 2,07; 1,32 y 1,49 g m² d⁻¹ en las zonas 1, 2, 3 y 4, respectivamente, valores inferiores a los 2,5 g m² d⁻¹, reportados por el CIMMYT para el maíz tropical cuando se encuentra cultivado entre el rango de 20 a 40 °C, pero las temperaturas fuera de este rango de adaptación y los días cortos pueden reducir la TCC (Lafitte, 2002). La falta de conocimiento apriori sobre la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en el lote de cultivo y el hecho de realizar una aplicación homogénea de una fuente de NPK, contribuyen a la generación de una TCC baja en el cultivo.

Las características del suelo fueron determinantes en el comportamiento de la TCC, al afectar sus componentes, el IAF y la TAN. El IAF fue mayor en las zonas uno y dos en comparación con las tres y cuatro durante todo el ciclo del cultivo. Al momento de floración los IAF fueron 4,33; 4,32; 2,1 y 2,12 en las zonas 1, 2, 3 y 4, respectivamente (Figura 4). Según la teoría, estas diferencias de IAF ocasionan diferencias en intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA), lo que se refleja directamente sobre la TCC y pueden explicar las diferencias encontradas en el crecimiento y rendimiento del cultivo. Esto

concuera con lo encontrado en la mayoría de estudios de mejoramiento de maíz, donde se ha evidenciado una estrecha relación entre la TCC y el número de granos con la acumulación de radiación fotosintéticamente activa interceptada durante la época crítica de desarrollo del cultivo que se presenta alrededor de floración (Luque *et al.*, 2006; Ritchie y Alagarswamy, 2003; Sinclair y Muchow, 1999; Andrade *et al.*, 1999). Laffite (2002) señala que cultivos de maíz con un IAF alrededor de 2 sólo interceptan el 37% de la RFA, mientras que aquellos con un IAF de 4,5 interceptan un 58%.

La tasa de expansión, el área máxima y la tasa de senescencia de la hoja son factores importantes en la estimación de la fotosíntesis del dosel en modelos de simulación de crecimiento de cultivo (Valentinuz y Tollenaar, 2006) y por esto, cuando el suministro de nutrientes es subóptimo, la tasa de crecimiento de la hoja puede limitarse por bajas tasas de fotosíntesis neta y/o por insuficiente expansión celular. Esto ocurre por la reducción en el número y extensión de las células epidermales y es evidente en suministros subóptimos de P y N (Mansouri *et al.*, 2010; Marschner, 2002). En este estudio, las zonas 3 y 4 presentaron valores inferiores de P y N en el tejido foliar, lo cual puede explicar su menor desarrollo foliar; además se encontraron valores inferiores de N y P en el suelo en estas zonas.

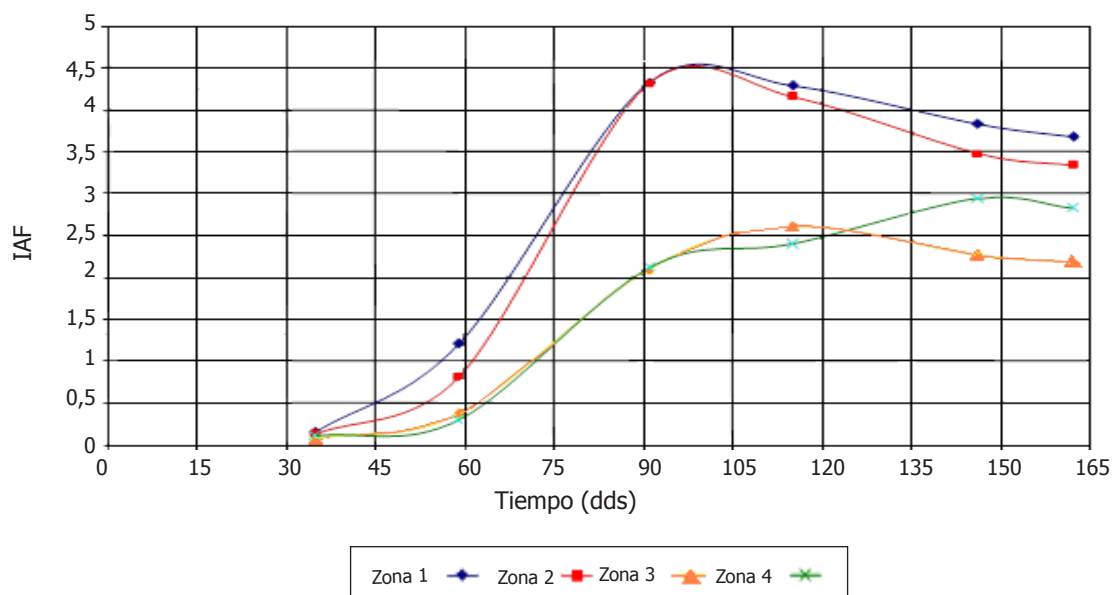


Figura 4. Comportamiento promedio del índice de área foliar (IAF), por grupos de suelos, en un lote de maíz, Sabana de Bogotá. Mosquera, Colombia.

La tendencia general de la TAN fue decrecer con la edad de la población de plantas debido al incremento del autosombreamiento del sistema foliar. La comparación de la TAN entre zonas mostró diferencias en las primeras fases de desarrollo del cultivo, particularmente a los 35 dds. Desde los 59 hasta los 115 dds se encontraron TAN similares en todas las zonas. Para las etapas finales del cultivo (146 - 162 dds) se observaron TAN superiores en las zonas de menores rendimientos, probablemente porque la reducción de la eficiencia fotosintética es consecuencia tanto de la senescencia de los órganos como del incremento de la respiración durante los estados de llenado de grano (Fageria *et al.*, 2006), y este llenado fue mayor en las zonas con mayores rendimientos (Figura 5).

La mayor eficiencia por unidad de tejido foliar (zonas 1 y 2) en las etapas iniciales de desarrollo debe atribuirse a la influencia de las características del suelo sobre la eficiencia fotosintética; los nutrientes son requeridos por la planta para el adecuado desempeño del aparato fotosintético y por esto una deficiencia de nutrientes

minerales que estén directamente involucrados en la síntesis de proteínas o de pigmentos de cloroplastos, y en la transferencia de electrones da como resultado la formación de cloroplastos con baja eficiencia fotosintética. Además, se ha establecido que la nutrición nitrogenada afecta la cantidad de tilacoides por unidad de área foliar (Fageria *et al.*, 2006; Hay y Porter, 2006; Marschner, 2002).

Adicionalmente, la deficiencia mineral reduce la fotosíntesis neta porque influye en la reacción de fijación de CO₂ a través de estoma. La síntesis de almidón en los cloroplastos y el transporte de azúcar a través del cloroplasto, así como la entrada al citoplasma, están directamente controlados por los fosfatos inorgánicos. Con esa deficiencia se incrementa una proporción de luz que es absorbida, pero no es usada en reacciones fotoquímicas y es disipada como calor. En hojas con deficiencia de Mn la eficiencia de fotosíntesis por unidad de clorofila es drásticamente reducida por un efecto directo sobre el foto sistema II (Fageria *et al.*, 2006; Hay y Porter, 2006; Marschner, 2002).

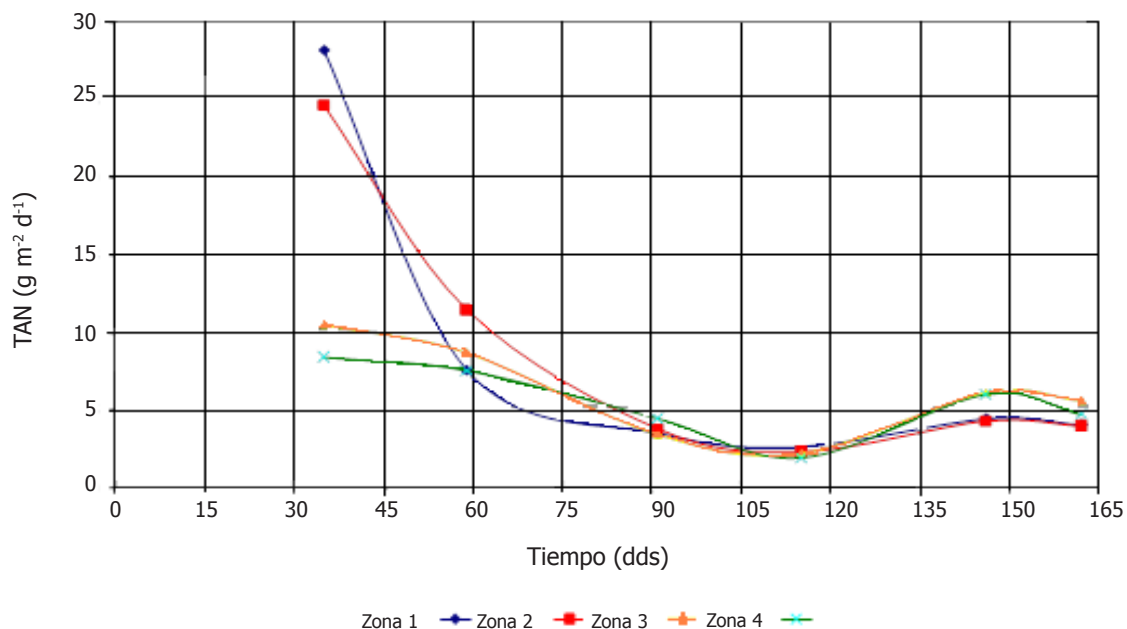


Figura 5. Comportamiento promedio de la tasa de asimilación neta, por grupos de suelos, en un lote de maíz, Sabana de Bogotá. Mosquera, Colombia.

Con excepción de las mediciones de la TAN a los 59 dds y 91 dds, que se ajustaron a modelos teóricos de semivarianza con efecto pepita puro EPP (relación entre la meseta y la pepita del 100%) (Giraldo, 2002),

los demás parámetros de crecimiento mostraron autocorrelación espacial (Tabla 3). De acuerdo con esto, la variabilidad de la TCC a los 35, 115, 146 y 162 dds puede explicarse por la variabilidad del IAF

y de la TAN, pero a los 59 y 91 sólo es explicada por la variabilidad espacial del IAF. Esto significa que bajo las condiciones de este estudio, la TCC a los 59 y 91 dds no fue afectada por la eficiencia fotosintética de la población de plantas de maíz en el lote experimental, pero sí por la magnitud del sistema foliar.

Una de las posibles explicaciones del por qué a los 59 y 91 dds la TAN no presentó autocorrelación espacial se atribuye a que el autosombreamiento de las hojas en los sitios más fértiles reduce la eficiencia del aparato fotosintético a niveles similares al de los sitios menos fértiles, lo que probablemente causó

homogeneidad en el comportamiento de la TAN en todos los sitios durante estas etapas de desarrollo del cultivo; no obstante, la variabilidad de la fertilidad del suelo generó un efecto irreversible sobre el tamaño del dosel y por esto se conservó la variabilidad del mismo expresado en el IAF, afectando la TCC.

La información obtenida en este estudio sobre la variabilidad de los componentes fisiológicos de desarrollo y del rendimiento del cultivo, y la relación de estos con las propiedades químicas del suelo, es básica para implementar prácticas de manejo por sitio específico y en particular para mejorar la fertilización del cultivo de maíz de choclo.

Tabla 3. Modelos teóricos ajustados a semivariogramas experimentales de las variables de crecimiento TCC, TAN e IAF en las distintas etapas del crecimiento, en un cultivo de maíz, Sabana de Bogotá. Mosquera, Colombia.

Parámetro	dds	Modelo	Pepita	Meseta	Rango*	R ² *	Residual SS
TCC	35	Exponencial	0,340	7,111	79,200	0,868	0,391
TCC	59	Exponencial	8,900	76,600	172,200	0,993	3,64
TCC	91	Exponencial	52,800	132,410	384,900	0,833	88,5
TCC	115	Gauss	7,600	54,620	49,020	0,888	22,1
TCC	145	Esférico	3,500	36,830	49,500	0,639	20,6
TCC	162	Esférico	0,010	28,270	62,200	0,717	34
IAF	35	Gaussiano	0,002	0,004	118,300	0,998	3,56E-09
IAF	59	Esférico	0,000	0,224	116,700	1,000	2,43E-06
IAF	91	Gaussiano	0,573	2,523	121,240	0,978	0,026
IAF	115	Gaussiano	0,142	2,294	195,720	1,000	1,85E-04
IAF	146	Esférico	0,012	0,648	44,000	0,881	8,54E-04
IAF	162	Esférico	0,011	0,598	44,100	0,882	7,14E-04
TAN	35	Exponencial	2,000	451,600	55,500	4,407	5,67E+03
TAN	59	EPP	45,590	47,220	104,900	0,008	9,60E+01
TAN	91	EPP	2,727	2,727	104,900	0,000	9,98E-02
TAN	115	Esférico	0,060	4,028	42,200	0,812	3,94E-02
TAN	146	Exponencial	0,980	6,938	91,800	0,995	1,38E-02
TAN	162	Esférico	0,290	7,460	41,300	0,546	3,81E-01

* Rango efectivo del modelo. ** R² del semivariograma

CONCLUSIONES

El estudio mostró variabilidad en el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz de choclo como respuesta a las características específicas por sitio de las propiedades químicas del suelo en el lote bajo estudio. El agrupar el lote por zonas homogéneas permitió explicar la dinámica del crecimiento en

cada una de ellas, a través de las diferentes etapas de desarrollo del cultivo y determinar cómo esta dinámica afectó la variabilidad del rendimiento para maíz de choclo.

La variabilidad del crecimiento entre zonas homogéneas se expresó en diferencias en los componentes fisiológicos: TCC, IAF y TAN, correspondiendo en

general los mayores valores a las mejores condiciones de fertilidad del suelo. Se destaca que el IAF fue el componente fisiológico con mayor influencia sobre la TCC y que la TAN, desde antes de floración y hasta la cosecha, presentó un comportamiento similar para los diferentes sitios del cultivo.

La metodología utilizada en este estudio usando la combinación de técnicas estadísticas permite caracterizar la variabilidad espacial y temporal del crecimiento y rendimiento del cultivo del maíz para choclo (*Zea mays*) y su relación con las propiedades químicas de los suelos.

La información sobre variabilidad en el crecimiento y rendimiento del cultivo y su relación con las propiedades químicas del suelo es básica para establecer prácticas de manejo por sitio específico y en particular para lograr mayor eficiencia en la fertilización del cultivo de maíz de choclo.

Dadas las condiciones particulares en las que se siembra el maíz de altura, es importante profundizar en estudios del análisis de crecimiento en áreas específicas para optimizar sus rendimientos y para recomendar el uso de los fertilizantes de acuerdo con las características del suelo propias de cada sitio.

BIBLIOGRAFÍA

Andrade, F.H., C. Vega, S. Uhart, A. Cirilo, M. Cantarero and O. Valentinuz. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science* 39(2): 453-459.

Bakhsh, A., R.S. Kanwar and R.W. Malone. 2007. Role of landscape and hydrologic attributes in developing and interpreting yield clusters. *Geoderma* 140(3): 235-246.

Barreto, M., D.R. Jiménez and A. Pérez. 2007. Tree-structured self-organizing map component planes as a visualization tool for data exploration in agro-ecological modelling. p. 55-56. In: *Proceedings of the 6th European Conference on Ecological Modelling (ECEM'07)*. Trieste, Italy.

Banziger, M., G.O. Edmeades and H.R. Lafitte. 2002. Physiological mechanisms contributing to the increased N stress tolerance of tropical maize selected for drought tolerance. *Field Crops Research* 75(2-3): 223-233.

D'Andrea, K.E., M.E. Otegui and A.G. Cirilo. 2008. Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Research* 105(3): 228-239.

Díaz, L.G. 2002. Estadística multivariada: inferencia y métodos. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística. Bogotá. 529 p.

Fageria, N.K., V.C. Baligar and R.B. Clark. 2006: *Physiology of crop production*. Haworth Press, New York. 342 p.

García, F.O. 2002. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. Aproximaciones zonales. En: *Memorias. Congreso "Maíz: Una oportunidad para la Sustentabilidad de la Agricultura y sus Empresas"*. SEMA, Buenos Aires. 26 p.

Gardner, F.P., R.B. Pearce and R.L. Mitchell. 1985. *Physiology of crops plants*. Iowa State University Press, Ames. 327 p.

Giraldo, H.R. 2002. Introducción a la geoestadística su teoría y aplicación. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Bogotá D.C. 180 p.

Hay, R.K. and A.J Porter. 2006. *The physiology of crop yield*. Second edition. Blackwell Publishing, Oxford. 328 p.

Hidalgo, R. 2003. Variabilidad genética y caracterización de especies vegetales. pp. 2-26. En: Franco, T.L. y R. Hidalgo (eds.). *Análisis estadístico de datos de caracterización morfológica de recursos filogenéticos*. Boletín Técnico IPGRI No. 8, Instituto Internacional de Recursos Filogenéticos, Roma. 90 p.

Hunt, R. 2003. Plant growth analysis: individual plants. pp. 579-588. In: Thomas, B., D.J. Murphy and B. Murray (eds.). *Encyclopaedia of applied plant sciences*. Elsevier Academic Press, London. 1.618 p.

IGAC, 2000. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología, Bogotá. 256 p.

Isaacs, E.C., C.V. Carrillo, A.E. Anderson, G.J. Carbonell y U.B. Ortiz. 2004. Desarrollo de un sistema

interactivo de información en web con el enfoque de agricultura específica por sitio. CENICAÑA Serie Técnica No. 34. 73 p.

Lafitte, H.R. 2002. Fisiología del maíz tropical. Programa de maíz CIMMYT. Tecnifenalce. No. 2. Año 4. 7 p.

Leiva, F.R. 2008. Agricultura de precisión en cultivos transitorios. Editorial Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 108 p.

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.

Lindquist, J.L., T.J. Arkebauer, D.T. Walters, K.G. Cassman and A. Dobermann. 2005. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. Agronomy Journal 97(1): 72-78.

Liu, M. and A. Samal. 2002. A fuzzy clustering approach to delineate agroecozones. Ecological Modelling 149(3): 215-228.

Loomis, R.S. and J.S. Amthor. 1999. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. Crop Science 39(6): 1584-1596.

Luque, S.F., A.G. Cirilo and M.E. Otegui. 2006. Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. Field Crops Research 95(2-3): 383-397.

Maddonni, G.A., A.G. Cirilo and M.E. Otegui. 2006. Row width and maize grain yield. Agronomy Journal 98(6): 1532-1543.

Maddonni G.A. and M.E. Otegui. 1996. Leaf area, light interception, and crop development in maize. Field Crops Research 48(1): 81-87.

Mansouri, C., S. Mohammad and F. Saberali. 2010. Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions. Agricultural Water Management 97(1): 12-22.

Marschner, H. 2002. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Elsevier Academic Press, New York. 889 p.

Melchiori, R.J. and O.P. Caviglia. 2008. Maize kernel growth and kernel water relations as affected by nitrogen supply. Field Crops Research 108(3): 198-205.

Moreno, M.J. 1984. Ficha Técnica ICA-V-508. Variedad mejorada de maíz tipo sogamoceño para clima frío. ICA Plegable Divulgación No. 00-4-3187-84.

Moser, S.B., B. Feil, S. Jampatong and P. Stamp. 2006. Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. Agricultural Water Management 81(1-2): 41-58.

Ortega, R.A. and O.A. Santibanez. 2007. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. Computers and Electronics in Agriculture 58(1): 49-59.

Otegui, M.E. and R. Bonhomme. 1998. Grain yield components in maize: I. Ear growth and kernel set. Field Crops Research 56(3): 247-256.

Rengel, M.L. 2003. Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en Maíz (*Zea mays* L.) en Venezuela. Informaciones Agronómicas. 53: 5-8.

Ritchie, J.T. and G.I. Alagarswamy. 2003. Model concepts to express genetic differences in maize yield components. Agronomy Journal 95(1): 4-9.

Rodríguez, J., A.M. González, F.R. Leiva y L. Guerrero. 2008. Fertilización por sitio específico en un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la Sabana de Bogotá. Agronomía Colombiana 26(2): 308-321.

Sánchez, T.J. 2008. Respuesta en el desarrollo y productividad del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) causada por la variabilidad química del suelo, en la sabana de Bogotá. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 120 p.

Sinclair, T.R. and R.C. Muchow. 1999. Radiation use efficiency. Advances in Agronomy 65: 215-265.

SPSS® Inc., 2006. Clementine, User's Guide, Version 12.0. SPSS Inc., Chicago, IL.

Srinivasan, A. 2006. Precision agriculture: an overview. pp. 3-15. In: Srinivasan, A. (ed.). Handbook

of precision agriculture principles and applications. The Haworth Press Inc., New York. 704 p.

Tian, Q., F. Chen, F. Zhang and G. Mi. 2006. Genotypic difference in nitrogen acquisition ability in maize plants is related to the coordination of leaf and root growth. *Journal of Plant Nutrition* 29(2): 317-330.

Tollenaar, M., W. Deen, L. Echarte and W. Liu. 2006. Effect of crowding stress on dry matter accumulation and harvest index in maize. *Agronomy Journal* 98(4): 930-937.

Uribe Larrea, M., J. Cárcova, L. Borrás and M.E. Otegui. 2008. Enhanced kernel set promoted by synchronous pollination determines a tradeoff between kernel number and kernel weight in temperate maize hybrids. *Field Crops Research* 105(3): 172-181.

Valentinuz, O.R. and M. Tollenaar. 2006. Effect of genotype, nitrogen, plant density, and row spacing on the area-per-Leaf profile in maize. *Agronomy Journal* 98(1): 94-99.

Vásquez, J.R., D. Baena y J.C. Menjivar. 2010. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia). *Acta Agronómica* 59(4): 449-456.

Williams, C.L., W.W. Hargrove, M. Liebman, D.E. James. 2008. Agro-ecoregionalization of Iowa using multivariate geographical clustering. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 123: 161-174.

Zhang, N., M. Wang and N. Wang. 2002. Precision agriculture-a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture* 36(2-3): 113-132.