

# MANEJO SITIO ESPECIFICO DEL NITRÓGENO AJUSTADO POR ATRIBUTOS ESPACIALES DEL TERRENO

Espósito G. <sup>(1)</sup>; W. Robledo <sup>(2)</sup>; R. Bongiovanni <sup>(3)</sup>; M. Ruffo <sup>(4)</sup> & G. Balboa <sup>(1)</sup>

(1) Univ. Nac. de Río Cuarto. Ruta 36 km 601, [gesposito@ayv.unrc.edu.ar](mailto:gesposito@ayv.unrc.edu.ar)  
[gbalboa@ayv.unrc.edu.ar](mailto:gbalboa@ayv.unrc.edu.ar)(2) Univ. Nac. de Córdoba, [wrobledo@agro.unc.edu.ar](mailto:wrobledo@agro.unc.edu.ar) (3)  
INTA-Manfredi, [rbongiovanni@correo.inta.gov.ar](mailto:rbongiovanni@correo.inta.gov.ar) (4) Univ. of Illinois, [ruffo@illinois.edu](mailto:ruffo@illinois.edu)

**RESUMEN:** En agricultura de precisión, la función de producción del maíz debe elaborarse considerando que los datos de rendimiento presentan autocorrelación espacial y heterocedasticidad. La disponibilidad de relevamientos topográficos precisos, permite establecer atributos de terreno a través del uso de los Sistemas de Información Geográfico (SIG) y con ello determinar atributos espaciales. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto combinado del análisis de la autocorrelación espacial que incluya atributos de terreno.

Se utilizaron datos de 12 ensayos de fertilización nitrogenada, donde se determinaron mapas digitales de terreno (DGPS) y atributos de relieve. Las funciones de producción fueron estimadas por análisis de regresión espacial múltiple, con atributos espaciales y dosis de N (variables independientes) y rendimiento de maíz (dependiente). Los parámetros se estimaron mediante máxima verisimilitud, considerando todas variables de efectos fijos. El análisis estadístico espacial se realizó empleando el programa OpenGeoDA 0.9.8.8. Los resultados encontrados en cada ensayo muestran que la inclusión del atributo CTI (índice topográfico compuesto) fue significativo en 5/12 experimentos evaluados, el SPI (índice de poder erosivo) en 2/12 y el LSCA (log. del área de cuenca específica) en 1/12. El análisis de los 12 ensayos de manera conjunta presentó efectos significativos sólo mediante la inclusión del CTI al modelo, lo cual puede estar relacionado con la disponibilidad hídrica del suelo. Se concluye que la inclusión atributos espaciales (CTI o SPI) permitiría mejorar el ajuste de la función de producción del maíz. La variabilidad encontrada entre localidades y años requiere profundizar su análisis, lo cual está bajo desarrollo.

**PALABRAS CLAVE:** agricultura de precisión, fertilización nitrogenada, atributos de relieve.

## INTRODUCCIÓN

El ajuste de dosis nitrogenadas económicamente óptimas depende de la función de producción, que es afectada por la disponibilidad hídrica del maíz (Espósito et al., 2006). Para el manejo sitio-específico del N, la función de producción debe elaborarse considerando que los datos obtenidos de un monitor de rendimiento presentan autocorrelación espacial y heterocedasticidad (Bongiovanni, 2002). Como las características de cada sitio son representadas por variables que presentan distribución espacial, no puede ignorarse su estructura para evitar cometer errores de sesgo o inconsistencia de los estimadores obtenidos. En Córdoba, es de esperar que la condición hídrica de los cultivos dependa fuertemente del relieve del suelo y por lo tanto la distribución espacial del agua y el rendimiento del maíz, están fuertemente determinados por la topografía (Cantero et al., 1999). La disponibilidad de relevamientos topográficos precisos, permite establecer atributos de terreno a través del uso de los Sistemas de Información Geográfico (SIG). En este sentido, se han desarrollado métodos para determinar la dirección del flujo de agua y

cuantificar el área de cuenca con modelos digitales de elevación. Ruffo et al., (2006) indicaron que el LSCA (log del área de cuenca específica) y la pendiente instantánea presentaron correlación con el contenido de agua del suelo en algunos sitios, mientras que el CTI (índice topográfico compuesto) fue el atributo mejor correlacionado en otros.

Por estos antecedentes resulta relevante evaluar la función de producción mediante el efecto combinado del análisis de la auto-correlación espacial que incluya atributos de terreno.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron datos de fertilización nitrogenada realizados entre 1998 y 2006, bajo siembra directa en la Provincia de Córdoba. La zona de ubicación abarca un área desde la localidad de Río Primero al Norte y Alejandro al Sur (200 km) y entre Manfredi y Alta Gracia (100 km). En esta zona se realizaron un total de doce ensayos, los cuáles fueron identificados para este trabajo mediante numeración correlativa del 1 al 12 (Bomgiovanni 2002 y proyecto PICTO-INTA 12931). La codificación de los ensayos fue 1-2 en Manfredi, 3-4 en Bengolea, 5-9-10 en Alejandro, 6 en Río Cuarto, 7 en Alta Gracia, 8 en Río Primero y 11-12 en Las Peñas Sud. En cada ensayo se probaron entre 4 y 6 dosis de N, alcanzando el máximo un rango de 125 – 225 kg N ha<sup>-1</sup>. La fuente de N fue urea aplicada en 4°-6° hoja. Los datos de rendimiento fueron recolectados con un monitor de rendimiento AgLeader, debido a que los datos originales incluyen puntos que están más cerca dentro que entre hileras, se promediaron dentro de cada polígono para lograr equidistancia y poder calcular una matriz de ponderadores espaciales. En cada ensayo se determinaron mapas digitales de elevación de terreno mediante DGPS. Los datos de elevación fueron interpolados en una grilla regular de 9 m usando el comando TOPOGRID de ArcGIS (ESRI, 2007). Los atributos primarios fueron elevación, pendiente, exposición y área de cuenca específica (SCA), calculados directamente del mapa digital, mientras que los secundarios fueron combinaciones de primeros. El SCA fue transformado mediante log en LSCA. El índice topográfico compuesto (CTI) y el índice de poder erosivo (SPI) fueron calculados con la extensión Spatial Analyst de ArcGIS, empleando las siguientes ecuaciones:

$$CTI = \ln(SCA/slope(\%)) \quad [1]$$

$$SPI = SCA \times slope (\%) \quad [2]$$

### Análisis estadístico

Las funciones de producción fueron estimadas por análisis de regresión espacial múltiple con atributos espaciales y dosis de N como variables independientes, mientras que rendimiento de maíz, dependiente. Los parámetros del modelo se estimaron mediante máxima verisimilitud, considerando todas variables como de efectos fijos. El análisis estadístico espacial de los datos emplea el modelo de error espacial, en el cual la variable dependiente no está correlacionada por sí misma sino que es el error de muestreo aleatorio el correlacionado:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad \text{donde} \quad \varepsilon = \lambda\omega\varepsilon + \mu \quad [3]$$

Donde  $\mu$  es el error de muestreo aleatorio con una especificación auto regresiva espacial (SAR) y coeficiente  $\lambda$ . La matriz de ponderadores espaciales tiene una estructura "Queen" de 8 vecinos. Los coeficientes del modelo son estimados empleando el programa de estadística espacial OpenGeoDA 0.9.8.8 (Anselin, 2009). El desarrollo del modelo en cada experimento comenzó con un polinomio de 2º grado para la dosis de N, y luego los atributos de relieve fueron adicionados individualmente. Las variables fueron incorporadas al modelo con un nivel de significancia del 10% y usando el criterio de Akaike (menor valor, mejor

ajuste) para evitar sobre parametrización. El análisis fue realizado para cada ensayo en particular y para los 12 ensayos de manera conjunta, considerando a cada ensayo como una repetición.

## RESULTADOS

Los diferentes ensayos presentaron una amplia variación en cuanto a: rendimientos de maíz, diferencia de altura ( $\Delta h$ ) y atributos espaciales. El rendimiento medio general fue de 7367 kg ha<sup>-1</sup>, siendo los ensayos 1 y 5 los de mayor producción media, mientras que el 9 y el 11 los menores. El rango de diferencia de cota presentó una variación importante entre ensayos (1,39m a 9,39m) lo cual evidencia las características del relieve regional. Entre los atributos evaluados, las mayores variaciones intra y entre ensayos se encontraron en los ensayos 2, 3 y 4, con valores máximos muy superiores a los reportados por Ruffo et al. (2006) lo cual puede ser explicado por las diferencias en relieve y la erosión precedente del suelo.

En la Tabla 1, se presentan las funciones de producción ajustadas en cada ensayo. El agregado de N fue significativo sobre el rendimiento de maíz en todos, excepto en el 9. Sin embargo, el análisis de regresión realizado presentó diferentes resultados individualmente. En 3-5-12, ningún atributo espacial presentó efectos significativos, en cambio, el CTI fue significativo en 1-2-4-7-11, siendo la variable sitio específica con mayor efecto (5 sobre 12). Los restantes atributos evaluados fueron significativos en 8 y 10 (SPI) y solamente en 6 el LSCA.

**Tabla 1. Modelos de regresión determinados en cada ensayo. Valores de parámetros significativos al 10% de probabilidad**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\beta_0$	8428	7109	7039	4829	10367	8010	9114	6481	ns	6083	7079	5335
$\beta_1$ N	46,70	29,96	10,53	26,11	14,05	45,84	-65,17	49,26	ns	16,76	-96,08	19,92
$\beta_2$ N <sup>2</sup>	-0,24	-0,09	-0,043	-0,09	-0,04	-0,27	0,39	-0,151	ns	-0,148	0,676	-0,049
$\beta_3$ CTI	149,33	-16,65		125,57			-260,84				-256,09	
$\beta_4$ CTI*N	-3,33	0,74		-1,81			9,78				9,84	
$\beta_5$ CTI*N <sup>2</sup>	0,02	-0,003		0,008			-0,053				-0,07	
$\beta_6$ SPI								357,18		206		
$\beta_7$ SPI*N								-11,77		-7,31		
$\beta_8$ SPI*N <sup>2</sup>								0,06		0,053		
$\beta_9$ LSCA						178,81						
$\beta_{10}$ LSCA*N						-5,99						
$\beta_{11}$ LSCA*N <sup>2</sup>						0,054						

1 a 12, ensayos (Córdoba). ns, no significativo al 10 % de probabilidad.  $\beta_{0-11}$ , parámetros determinados en cada modelo. CTI, índice topográfico compuesto. SPI, índice de poder erosivo. LSCA, log del área de cuenca específica

El segundo análisis realizado al conjunto de todos los datos relevados, se presenta en la Tabla 2, en donde el modelo de respuesta al nitrógeno con la incorporación del CTI fue significativo en todos los parámetros evaluados.

A diferencia de lo determinado por Ruffo et al. (2006) el atributo CTI fue el de mayor impacto en la respuesta a la fertilización con N, dado que este es un indicador del nivel de humedad del suelo. Cabe mencionar que las condiciones climáticas y edáficas del trabajo de Ruffo et al. (2006) presentan diferencias muy marcadas con Córdoba (Argentina) donde las precipitaciones son menores y los suelos presentan menor capacidad de retención hídrica.

**Tabla 2. Modelos de regresión ajustados para los 12 ensayos evaluados conjuntamente**

	Modelo 1	Valor p	Modelo 2	Valor p	Modelo 3	Valor p	Modelo 4	Valor p
$\beta_0$	6843	0,00	6512	0,00	6851	0,00	6451	0,00
$\beta_1$ N	9,15	0,00	9,90	0,00	8,81	0,00	10,28	0,00
$\beta_2$ N <sup>2</sup>	-0,02	0,00	0,02	0,00	-0,02	0,00	0,01	0,24
$\beta_3$ AE			32,65	0,00	-2,5	0,11	81,88	0,00
$\beta_4$ AE*N			0,27	0,00	0,11	0,01	-0,13	0,70
$\beta_5$ AE*N <sup>2</sup>			-1285,04	0,00	-0,0001	0,02	-0,01	0,00
Akaike	257381		257187		257378		257252	

Valor p, valor de probabilidad obtenido mediante OpenGeoDA 0.9.8.8 (Anselin, 2009). AE, Atributo espacial evaluado: CTI, SPI o LSCA. CTI, índice topográfico compuesto. SPI, índice de poder erosivo. LSCA, log del área de cuenca específica. Modelo 1:  $\beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 N^2$ . Modelo 2:  $\beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 N^2 + \beta_3 CTI + \beta_4 CTI * N + \beta_5 CTI * N^2$ . Modelo 3:  $\beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 N^2 + \beta_3 SPI + \beta_4 SPI * N + \beta_5 SPI * N^2$ . Modelo 4:  $\beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 N^2 + \beta_3 LSCA + \beta_4 LSCA * N + \beta_5 LSCA * N^2$ .

## CONCLUSIÓN

La inclusión de variables sitio específicas como los atributos espaciales el índice topográfico compuesto o el índice de poder erosivo permitiría mejorar el ajuste de la respuesta del maíz al agregado de nitrógeno al considerar efectos hídricos potenciales o erosión de suelo precedente, dado que la determinación de estos atributos puede realizarse a pequeña escala (similar al mapa de rendimiento de un lote) se pueden ajustar dosis económicamente óptimas a igual escala que el mapa de rendimiento. No obstante, la variabilidad encontrada entre localidades y años requiere ampliar el análisis mediante la inclusión variables de efecto aleatorio, desarrollando así un modelo econométrico mixto espacial.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anselin L. 2009. OpenGeoDa 0.9.8.8. Geoda Center for Geospatial Analysis and Computation. In: <http://geodacenter.asu.edu/>
- Bongiovanni, R. 2002. A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management and Corn Production. PhD Dissertation, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Cantero A, Bricchi EM, Cisneros J, Becerra, V & H. Gil. 1999. Un índice de aptitud relativa de tierras con fines catastrales. Aplicación al Departamento Río Cuarto (Córdoba, Argentina). Invest. Agr.: Prot. Veg. Vol 14 (1-2):259-272.
- Espósito G, C Castillo y R Balboa. 2006. Calibración y validación de un método de diagnóstico de fertilización nitrogenada en maíz para el sur de Córdoba (Argentina). Revista de Investigación Agraria. RIA, 35(3):45-63.
- ESRI, 2007. ArcMap ver. 9.2. ESRI, Redlands, CA, USA.
- Ruffo M., G Bollero, DS Bullock & DG Bullock. 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. Precision Agric. 7:327-342.