

Validación de un modelo de fertilización nitrogenada espacial y temporalmente variable en maíz para el sur de Córdoba (Argentina)

Esposito Gabriel¹; Cerliani Cecilia¹; Naville Rafael¹; Hernández Carlos¹; Balboa Guillermo²

¹ Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional N°36 km 601. Río Cuarto. Córdoba. Argentina.

² Kansas State University

Trabajo presentado al
Primer Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión
(CLAP2018)
11 al 13 de abril 2018
Santiago, Chile

Resumen.

La variabilidad ambiental del sur de Córdoba (Argentina) es muy amplia, espacial y temporalmente. Se desarrolló un modelo de diagnóstico de la fertilización nitrogenada para maíz a partir de 18 experimentos (1998 y 2011). Este modelo estimado mediante un análisis estadístico econométrico mixto espacial (MEME) dispone de tres ecuaciones de producción de maíz dependientes de la condición climática prevista según pronóstico ENSO de agosto (niño, inactivo o niña). Con cada ecuación se puede optimizar económicamente la dosis de N (DOEN), según el índice topográfico compuesto (CTI) derivado de mapas digitales de elevación (MDE). Entre 2011 y 2017 se realizaron 9 experimentos en establecimientos agropecuarios subdivididos en zonas de manejo homogéneas (ZM) según su productividad. Este proceso de zonificación se realizó a partir de MDE con verificación de mapas de rendimiento de maíz. Se realizaron 5 franjas de fertilización nitrogenada creciente atravesando las ZM (entre 0 y 200 kg N ha⁻¹) y una franja de fertilización variable según MEME empleando el pronóstico ENSO (agosto). Al momento de la cosecha, realizada con monitor de rendimiento georreferenciado, se procedió a establecer la función de producción dependiente del N por ZM y según la proporcionalidad de éstas y la relación de precios se determinó la dosis DOEN media ponderada, el rendimiento obtenido con esa dosis, el del testigo y la eficiencia agronómica de N (EAN), además con estas funciones también se determinaron los mismos resultados para la dosis modal del sur de Córdoba (43 kg N ha⁻¹) la cual se aplica uniformemente (MODAL). Además los mismos resultados fueron determinados para la franja con las dosis recomendadas por el MEME. Finalmente y considerando a cada experimento como una repetición se realizó un ANAVA de la DOEN, el rendimiento (DOEN) y la EAN para comparar el modelo ZM, MEME y MODAL. Los resultados indican que el MEME arrojó estadísticamente el mayor rendimiento y EAN al modelo por ZM y a la dosis modal aunque con una DOEN superior. Estos resultados indican que el MEME fue el modelo de mejor desempeño para diagnosticar la fertilización nitrogenada en maíz para esta región productiva.

Palabras clave. N variable; variabilidad espacial y temporal; Modelos

Validación de un modelo de fertilización nitrogenada espacial y temporalmente variable en maíz para el sur de Córdoba (Argentina)

Introducción

La oferta hídrica para los cultivos en el sur de Córdoba (Argentina) depende fuertemente del paisaje del suelo, como consecuencia de la distribución espacial del agua. De este modo el rendimiento de maíz, queda fuertemente determinado por la topografía del terreno (Cantero et al., 1999). A su vez, en esta región se destaca que la respuesta al agregado de nitrógeno en maíz es afectada por la disponibilidad hídrica durante su estación de crecimiento (Espósito et al., 2006).

La topografía de los lotes de producción puede ser modelada a través de mapas digitales de elevación (DEM), los cuales son herramientas de disponibilidad creciente en la agricultura Argentina, como consecuencia del aumento de maquinaria de agricultura de precisión provistas con GPS (MINAGRI, 2011). A partir de estos DEM se pueden determinar atributos espaciales de terreno (AE) mediante el empleo de sistemas de información geográfica (Tarboton, 1997), los cuáles pueden relacionarse con los mapas de rendimiento de los cultivos (Ruffo et al., 2006).

Entre distintos AE evaluados el índice topográfico compuesto (CTI), relación entre el área de cuenca específica y la pendiente en cada punto del lote, es uno de los más apropiados a utilizar en regiones onduladas por estar asociado al movimiento superficial del agua. Además, la inclusión de variables sitio específica como el CTI, permiten mejorar el ajuste de la función de producción del maíz dependiente de la fertilización nitrogenada (Espósito, 2013).

Como estos atributos se determinan a una escala espacial similar a los mapas de rendimiento (Ruffo et al., 2006), se pueden generar funciones de producción de maíz que incluyan el efecto del CTI y su interacción con la fertilización nitrogenada, de tal forma que la optimización económica de la dosis de N también dependa de las características del relieve. No obstante, la práctica dominante de los productores agropecuarios en la Argentina y en el mundo, es aplicar la misma cantidad de fertilizante nitrogenado en toda la superficie del campo, sin considerar la posible variabilidad espacial de las necesidades de este nutriente. Específicamente en el sur de Córdoba a una dosis uniforme de 43 kg ha⁻¹ (De Prada y Penna, 2008).

En este ambiente se desarrolló un modelo de diagnóstico de la fertilización nitrogenada para maíz a partir de 18 experimentos realizados entre la campaña 1998 y 2011. Este modelo estimado mediante un análisis estadístico econométrico mixto espacial (MEME) arrojó un alto grado de ajuste entre rendimientos observados y simulados. El modelo dispone de tres ecuaciones de producción de maíz dependientes la condición climática prevista para cada campaña según el pronóstico ENSO (húmedo, neutro o seco) del mes de agosto. A su vez, con cada ecuación se puede optimizar económicamente la dosis de N (DOEN), según el índice topográfico compuesto (CTI) derivado de mapas digitales de elevación (DEM) y la interacción entre N y CTI (Espósito, 2013).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño del modelo de dosificación variable espacial y temporalmente en maíz para el sur de Córdoba (Argentina)

Materiales y Métodos

Los experimentos se llevaron a cabo en la región sur de la provincia de Córdoba (Argentina), durante los años 2011 y 2017 (Tabla 1).

Tabla 1. Experimentos, campaña agrícola y pronóstico ENSO de agosto de cada año

Experimento	Localidad	Campaña	Pronóstico ENSO
1	Alejandro Roca	2010/11	Neutro
2	San Basilio	2010/11	Neutro
3	Adelia María	2011/12	Niña
4	Alejandro Roca	2011/12	Niña
5	Las Vertientes	2012/13	Niño
6	Ucacha	2014/15	Neutro
7	Chaján	2015/16	Neutro
8	Holmberg	2016/17	Niño
9	Alcira Gigena	2016/17	Niño

Los ensayos se ubicaron en lotes comerciales de producción, los cuales fueron zonificados a partir de mapas digitales de elevación y posterior validación con mapas de rendimiento de años anteriores (3 como mínimo) mediante análisis de cluster utilizando el Software Management Zone Analyst (Fridgen et al. 2004). Se delimitaron así, dos zonas de manejo (ZM): Alta Producción (AP) y Baja Producción (BP).

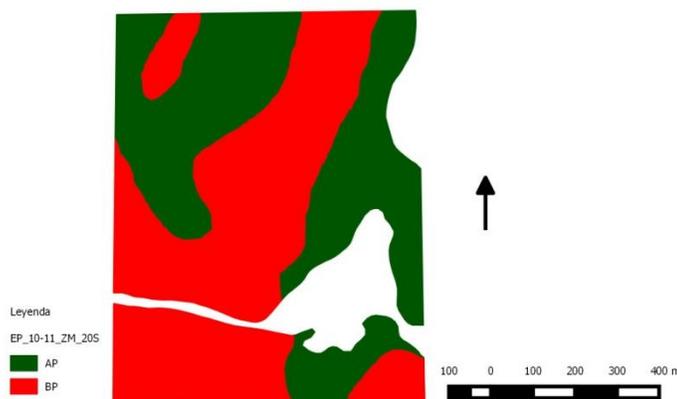


Figura 1. Zonificación Lote ensayo Alejandro (2010/11) (Córdoba).

En forma transversal a las ZM se dispusieron seis tratamientos de fertilización nitrogenada: cinco franjas fijas de N (0, 50, 100, 150 y 200 kg N ha⁻¹) y una franja cuya dosis de N fue variable de acuerdo al modelo MEME y según la predicción climática ENSO de agosto, mediante las ecuaciones I, II y III:

El procedimiento de dosificación del modelo MEME determina una ecuación de cálculo de dosis para cada año según su condición hídrica. A través de la calculadora raster presente en el software QGIS 2.16 (QGIS Development, 2016) y la implementación de las ecuaciones (II), (III) y (IV) teniendo en cuenta la condición hídrica del año, se determinaron los mapas de DOEN en kg ha^{-1} .

SI ENSO Niño = Húmedo.

$$DOEN = \frac{\left(\frac{\rho N}{\rho M}\right) - 25.04 + 0.49CTI}{2 \times -0.06} \quad (I)$$

SI ENSO Inactivo = Neutro.

$$DOEN = \frac{\left(\frac{\rho N}{\rho M}\right) - 15.95 + 0.6273CTI}{2 \times -0.0506} \quad (II)$$

SI ENSO Niña = Seco

$$DOEN = \frac{\left(\frac{\rho N}{\rho M}\right) - 3.18 - 0.27CTI}{2 \times -0.02} \quad (III)$$

Donde ρN representa el precio del fertilizante en forma de nitrógeno elemental, ρM representa el precio del maíz al momento de la cosecha. El cociente $\left(\frac{\rho N}{\rho M}\right)$ representa la relación de precios.

A modo de ejemplo en la Figura 2 se puede visualizar un mapa de CTI y la propuesta de dosificación espacialmente variable para la condición de año húmedo en ese mismo lote.

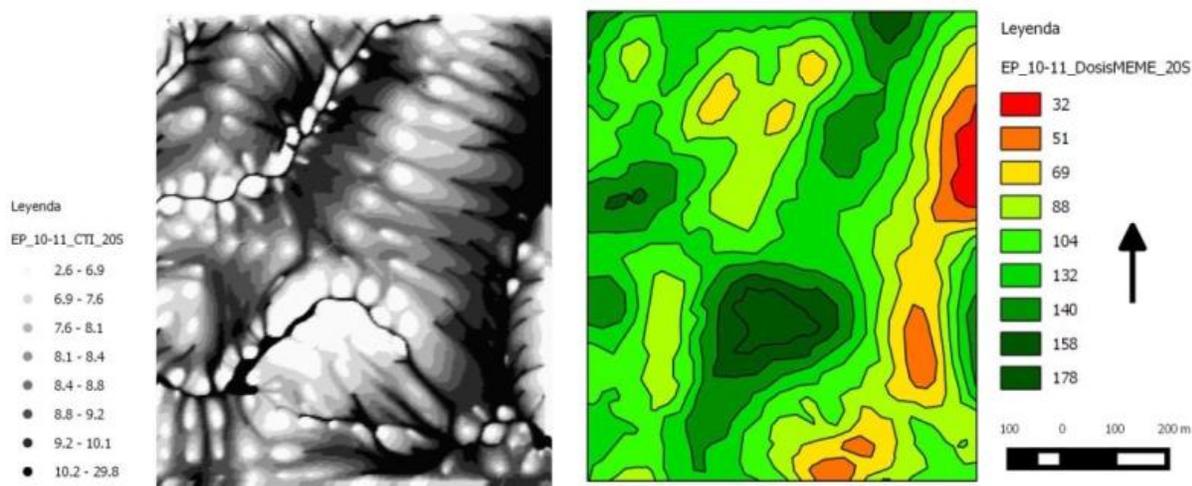


Figura 2. Mapa de CTI (izquierda) y de dosis de N variable según MEME (derecha). Ensayo Alejandro 2010/11 (Córdoba).

A madurez de cosecha se evaluó el rendimiento y sus componentes mediante cosecha mecánica utilizando cosechadora con monitor de rendimiento y referencia espacial mediante GPS.

En gabinete y con todos los mapas de rendimiento se procedió a calcular la dosis óptima económica por ZM (ex post) utilizando el modelo de error espacial autorregresivo (SAR) propuesto por Anselin

et al (2004). Este ajuste evalúa si la DOEN varía por ZM, en ese caso se definió una DOEN ponderada según la proporción territorial de cada ZM. Además se determinó cual hubiera sido la producción de maíz en caso de utilizar la dosis modal de 43 kg ha⁻¹ de N en las funciones estimadas. Por otro lado se ponderó en cada ZM la dosis MEME (variable a escala de 10 m por 10 m) y su producción de maíz.

El modelo SAR para establecer la función de producción por ZM, asume que la variable dependiente no está correlacionada por sí misma sino que es el error de muestreo aleatorio el que está correlacionado. Matemáticamente se expresa según la Ecuación IV:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad [IV]$$

donde Y es el vector (n por 1) de observaciones de la variable dependiente, X es la matriz de incidencia con las observaciones de las variables independientes, β es el vector de parámetros estimados, y ε es el término de error espacial, obtenido mediante la Ecuación V:

$$\varepsilon = \lambda W\varepsilon + \mu \quad [V]$$

donde μ es el error de muestreo aleatorio que sigue una especificación autorregresivo espacial (SAR) con un coeficiente autorregresivo λ (lambda), corregido también por la matriz de ponderadores espaciales (W).

La respuesta del maíz al N se modeló como un polinomio de segundo grado por cada ZM según la Ecuación VI:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 N^2 + \beta_3 ZM + \beta_4 N \times ZM + \beta_5 N^2 \times ZM + \varepsilon_{ij} \quad [VI]$$

Donde Y_{ij} es el rendimiento del maíz (kg ha⁻¹) por cada punto ij del monitor de rendimiento, β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 y β_5 , son los parámetros de la ecuación de regresión, N es la dosis de fertilizante (kg ha⁻¹), ZM se refiere a las variables "dummy" para cada zona de manejo, y ε_{ij} es el término de error de la regresión por cada ubicación (Gregoret et al., 2011).

El cálculo de la dosis óptima económica de N por zona de manejo, se realizó mediante una optimización tradicional de las funciones de respuesta de tipo cuadrática (Dillon & Anderson, 1990) según la ecuación [VII]:

$$DOEN = \frac{\left(\frac{\rho N}{\rho M}\right) - \beta_1}{2\beta_2} \quad [VII]$$

Donde ρM : precio del maíz (\$ kg⁻¹), ρN : precio del nitrógeno elemental (\$ kg⁻¹). La relación de precios ($\rho N/\rho M$) utilizada fue de 7,76 como valores promedio para la plaza de Río Cuarto (Córdoba).

Con los datos de rendimiento y dosis ponderada para cada criterio se determinó la Eficiencia Agronómica del Nitrógeno (Dobermann, 2005):

$$EAN = \frac{(RtoF - Rto0)}{DN} \quad [VIII]$$

Donde EAN: eficiencia agronómica del Nitrógeno, RtoF: rendimiento del tratamiento fertilizado; Rto0: rendimiento del tratamiento testigo y DN: dosis de nitrógeno.

Finalmente se compararon la DOEN, el rendimiento del maíz con la DOEN y la EAN obtenidos con el modelo optimizado por ZM (ex post), el modelo ZM con dosis modal (MODAL) de 43 kg N ha⁻¹ y el modelo MEME (ex antes). Para ello se utilizó un ANAVA y test de comparación de medias LSD de Fisher ($\alpha= 0.10$), mediante el software estadístico INFOSTAT versión 2012 (Di Rienzo et al., 2017), considerando a cada experimento como una repetición en un diseño completamente aleatorizado.

Resultados

En dos de los experimentos realizados el pronóstico ENSO indicó en el mes de agosto condición de año seco, lo cual generó un mapa con escasa variación espacial de la DOEN la cual fue mayoritariamente igual a "cero" en todo el lote en ambos ensayos (Figura 3)

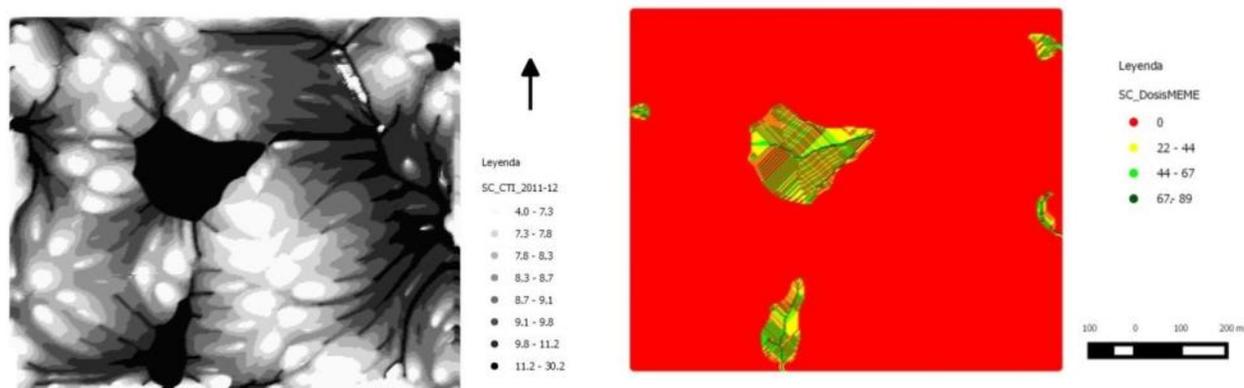


Figura 3. Mapa de CTI (izquierda) y de dosis de N variable según MEME (derecha). Ensayo Alejandro 2011/12 (Córdoba).

En estos ensayos con pronóstico de Niña (año seco) se obtuvieron 1588 y 4109 kg ha⁻¹ como rendimiento de las parcelas testigo sin fertilizar, siendo ello la DOEN por ZM en los experimentos de Adelia María y Alejandro de 2011/12. En relación al modelo MEME la DOEN media fue de 1 y 4 kg ha⁻¹ con un rendimiento de 1667 y 3904 kg ha⁻¹, para los mismos experimentos, mientras que usando la dosis modal de 43 kg ha⁻¹ se obtuvieron 1455 y 3563 kg ha⁻¹. Estos resultados indican que cuando el pronóstico ENSO es niña no debiera aplicarse nitrógeno puesto que la limitante hídrica es tan severa que impide un crecimiento del maíz suficiente como para demandar aportes nitrogenados externos, quedando muy reducida la producción del cultivo. En este sentido el modelo MEME fue sensible a esta condición dado que no recomendó el aporte de N como si ocurre a nivel modal entre los productores, generando un gasto innecesario y evitando la posible contaminación ambiental que un fertilizante que no es utilizado puede provocar.

En los restantes siete experimentos el pronóstico ENSO indicó neutro o niño, en ellos se pudo obtener una DOEN superior a "0 kg ha⁻¹" en todos los modelos evaluados y con ello se pudo hacer comparaciones entre los mismos, principalmente a nivel de la EAN. Como se puede apreciar en la Tabla 2, se encontraron diferencias significativas entre los tres modelos en la DOEN y en el rendimiento obtenido con la DOEN. En relación a la EAN el modelo MEME fue superior a los restantes.

Las diferencias encontradas en la DOEN indican que el MEME, con una gran variabilidad espacial de la dosis recomendada, utilizó 19,19 y 34,05 kg ha⁻¹ más de N que el ZM y MODAL respectivamente, indicando un incremento del 33 y 79 % de cantidad usada en MEME respecto de

los restantes modelos. En los años húmedos el MEME recomienda utilizar mayor cantidad de N en ambientes altos dentro del relieve caracterizados por una textura más arenosa y un menor contenido de materia orgánica y con ello se incrementa el rendimiento de estos sectores, siempre y cuando no se presenten condiciones hídricas adversas. Por otro lado, es fácil comprender que la dosis MODAL (43 kg ha⁻¹) como dosis de costumbre puede ser inferior o superior a una dosis optimizada experimentalmente.

En relación a los rendimientos alcanzados con las distintas DOEN, el modelo MEME fue 533 y 909 kg ha⁻¹ más productivo que ZM y MODAL, con aumentos del 5,3 y 9,4 % respectivamente. Sin embargo el aspecto más destacado fue la eficiencia de utilización del nitrógeno del fertilizante, dado que en MEME el aumento en la EAN fue del 20,5 y 33,5 % sobre ZM y MODAL, respectivamente. Sin lugar a dudas, la mejor distribución espacial de la oferta nitrogenada del MEME, asociada a su sensibilidad temporal mediante el pronóstico ENSO, provoca una mayor eficiencia de uso del N que las restantes estrategias de fertilización.

Tabla 2. Valores medios de dosis óptima económica de N (DOEN), rendimiento obtenido con DOEN (RTO DOEN) y eficiencia agronómica del nitrógeno (EAN) de tres modelos de fertilización nitrogenada en maíz

	DOEN (kg ha ⁻¹)	RTO DOEN (kg ha ⁻¹)	EAN (kg kg ⁻¹)
MEME	77,05 a	10556 a	19,82 a
ZM	57,86 b	10023 b	16,45 b
MODAL	43,00 c	9647 c	14,85 b
DMS	12,22	308,84	2,26
CV (%)	21,63	3,22	13,95

MEME, modelo econométrico mixto espacial para el diagnóstico de N variable (ex antes). ZM, funciones de producción de maíz dependiente del N por zona de manejo (ex post). MODAL, funciones obtenidas en ZM con el empleo de dosis fija de 43 kg ha⁻¹. DMS, diferencia mínima significativa con p valor de 0,10. CV: coeficiente de variación.

Como en otras regiones de Argentina, en ambientes ondulados, la variabilidad espacial del rendimiento de maíz se relaciona con la variabilidad de la capacidad de retención hídrica de los suelos, la cual se asocia con su posición relativa en el paisaje y con su textura. Resultados similares fueron encontrados por Urricariet et al. (2011) en el oeste de Buenos Aires.

Por lo tanto, es fácil comprender que la variabilidad del rendimiento del maíz asociada al paisaje pueda ser explicada mediante atributos del relieve que sean sensibles a variaciones en la capacidad de retención hídrica asociadas a diferencias texturales. Así, para establecer una DOEN variable espacialmente es necesario considerar factores del relieve ligados a la oferta hídrica, tal como se planteó en este trabajo. Según lo propuesto por Bullock et al. (2009) la inclusión de variables sensibles a las diferencias edáficas y climáticas permiten determinar la DOEN con mayor exactitud.

Al asumir una relación de precio establecida en 7,76 cada unidad de nitrógeno tiene un costo directo 7,76 veces el valor de un kilo de maíz. Si la eficiencia agronómica del nitrógeno aplicado se define como la cantidad de kg de maíz que se producen con una unidad de N aplicado entonces todo valor de EAN por encima de 7,76 puede ser considerado como margen bruto parcial de la fertilización con N (Figura 4). De esta forma se puede interpretar que entre los modelos de diagnóstico evaluados el margen bruto parcial fue un 39 y 70 % superior en el modelo MEME que en ZM y

MODAL, respectivamente. Como fue planteado por Bongiovanni (2002) el uso de la agricultura de precisión impacta más sobre la eficiencia económica de los insumos agrícolas que sobre las producciones obtenidas. Estos resultados también coinciden con Roberts et al. (2012), quienes, en ambientes con relieve suavemente ondulado de Nebraska (EE.UU.), hallaron que la FVN tuvo un mayor retorno al N.

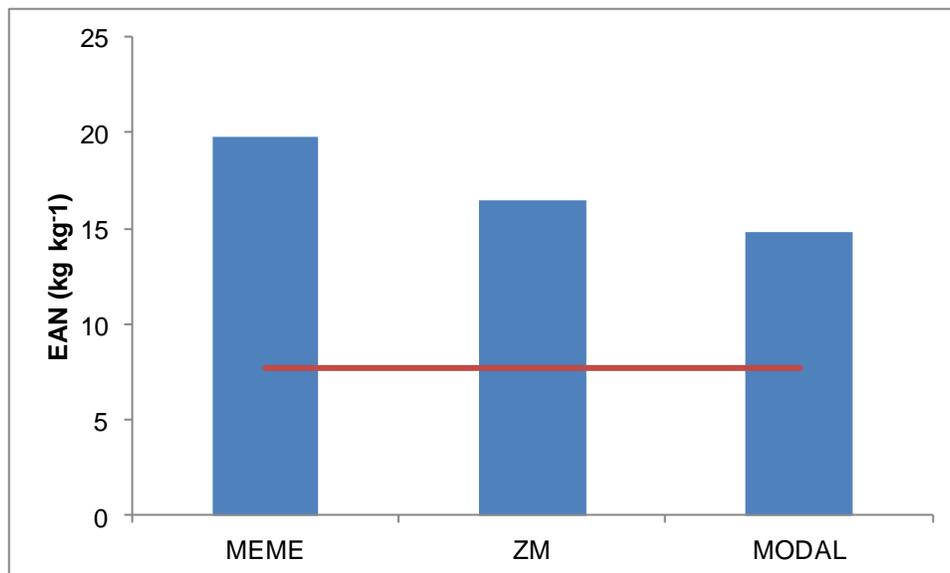


Figura 4. Eficiencia agronómica del nitrógeno aplicado y relación con margen bruto y costo relativo de la unidad de nitrógeno. MEME, modelo econométrico mixto espacial para el diagnóstico de N variable (ex antes). ZM, funciones de producción de maíz dependiente del N pro zona de manejo (ex post). MODAL, funciones obtenidas en ZM con el empleo de dosis fija de 43 kg ha⁻¹.

Resumen y conclusiones

El desarrollo de modelos agronómicos para el diagnóstico de la dosis de nitrógeno a utilizar el maíz es un esfuerzo que debe ser continuamente realizado. Para las condiciones del Sur de Córdoba Argentina, ambiente caracterizado por el relieve suavemente ondulado a ondulado, suelos predominantemente arenosos con bajo contenido de carbono orgánico y con clima monzónico fuertemente influenciado por el aporte de aire húmedo desde el Pacífico y del Atlántico, el empleo del pronóstico ENSO del mes de agosto y la optimización de la dosis de N dependiente del CTI permitió contar con un modelo (ex antes) que previo a la siembra puede diagnosticar necesidades de fertilización nitrogenada variable, espacial y temporalmente con un muy buen ajuste con la dosis por ZM (ex post) tanto en condiciones climáticas secas como neutras o húmedas, obteniendo un mayor rendimiento, una mayor EAN con un incremento sustancial del margen bruto parcial al uso del N.

Como este modelo se desarrolló sobre un base experimental y mediante el análisis de una extensa base de datos, se recomienda continuar se validación en otras regiones similares y analizar su desempeño frente a nuevos materiales genéticos de maíz no contemplados durante el desarrollo y validación del mismo.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo queremos agradecer especialmente al Dpto. de Producción Vegetal, a la Facultad de Agronomía y Veterinaria y a la Universidad Nacional de Río Cuarto donde realizamos

cotidianamente nuestras actividades de docencia e investigación.

Referencias

- Anselin L., Bongiovanni R. & Lowenberg-DeBoer J. (2004). A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. *Am. J. Agr. Econ.* 86(3):675-687.
- Bongiovanni, R. (2002). *A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management and Corn Production*. (PhD Thesis), Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN, 252 pp.
- Bullock D. S., M. Ruffo, Bullock D. G. & Bollero G. (2009). The value of variable rate technology: An information. Theoretic approach. *Amer. J. Agr. Econ.* 91: 209–223.
- De Prada, J.; & Penna, J. (2008). Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el Sur de Córdoba, Argentina. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada M. & Robledo, C.W. InfoStat, Grupo InfoStat, (2017), FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Doberman, A.R. (2005). Nitrogen use efficiency – state of the art. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany.
- Espósito G., Castillo C. & Balboa R. (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.
- Espósito, G. P. (2013). *Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto (MEME)*. (Tesis Doctoral) Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Fridgen, J.J., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Wiebold, W.J. & Fraisse, C.W. (2004). Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agron. J.* 96: 100-108.
- Gregoret, M. C., Díaz Zorita, M., Dardanelli J. & Bongiovanni, R. G. (2011). Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. *Precis. Agric.* 12(6):831-849.
- QGIS v2.16.1 Nodebo, Development Team (2016). QGIS Geographic Information System. Essen, Germany.
- Roberts D. F., Ferguson R. B., Kitchen N. R., Adamchuk, V. I. and Shanahan J. F.(2012). Relationships between Soil-Based Management Zones and Canopy Sensing for Corn Nitrogen

Management. *Agron. J.* 104(1):119-129.

Ruffo, M., Bollero, G., Bullock, D. S. & Bullock, D. G. (2006). Site-specific c production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precis. Agric.* 7:327–342.

Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in digital elevation models. *Water Resour. Res.* 33:309–319.

Urricariet S., Niborski M. & Kvolek, C. M. (2011). Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ci. Suelo* (Argentina), 29(1):49–59.