

Eficiencia de uso de agua y nitrógeno en maíz por zonas de manejo

Albarenque S. M.¹, Caviglia O.P.^{1,2,3}, Melchiori R.J.M.¹, Maddonni G.A.⁴

¹EEA INTA Paraná

²CONICET

³FCA-UNER

⁴FAUBA

albarenque.susana@inta.gob.ar

Introducción

El rendimiento del cultivo de maíz se encuentra principalmente limitado por agua y nitrógeno (N), recursos que suelen evidenciar variabilidad espacial y temporal. En estas situaciones, en donde la demanda y oferta de recursos varía, la aplicación de dosis uniformes de N genera desajustes (Huggins y Pan, 1993), que pueden tener consecuencias ambientales y económicas, por el uso de dosis sub- o supra-óptimas en distintos sectores de un lote.

En efecto, se ha demostrado que la dosis óptima de N varía espacial y temporalmente, dentro de un mismo lote de acuerdo a la heterogeneidad del suelo y a las variaciones intra- e inter- anuales del clima (Basso, 2007). Adicionalmente, el agua del suelo también muestra variaciones espaciales según las precipitaciones, la topografía y las propiedades del suelo (Batchelor et al., 2002) afectando la absorción de N (Lemaire and Gastal, 2009).

Las eficiencias de uso del N (EUN) y del agua (EUA), en consecuencia, dependerán de la disponibilidad de agua y N durante la estación de crecimiento y de las respuestas del cultivo en cada sector dentro de un lote. Se ha reportado que el incremento en la disponibilidad de N disminuye linealmente la EUN (Lemaire and Gastal, 2009); e incrementa la EUA (Hatfield et al., 2001) hasta un cierto umbral.

La delimitación de zonas de manejo (ZM) y el ajuste de dosis por zona, es una alternativa para optimizar la EUN y la EUA de acuerdo a la disponibilidad de agua y N y a la respuesta del cultivo en cada sector dentro de un lote.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la variación espacial de la disponibilidad de agua y de nitrógeno y de las eficiencias de uso de agua y nitrógeno en el cultivo de maíz.

Materiales y métodos

Se realizaron dos ensayos en lotes ubicados en el campo experimental de la Estación Experimental Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (31° 50' S; 60° 31' W; 110 m.s.n.m) durante las campañas 2011/12 (Lote 1) y 2012/13 (Lote 2). Los lotes se dividieron en zonas de manejo (ZM) con el software MZA (Management Zone Analyst) utilizando datos medidos de materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE) y elevación, interpolados a una grilla de 5x5m en el software AFS (Versión 5.5).

En el Lote 1 (L1) se identificaron cuatro ZM: Zona 1 (ZM1L1); Zona 2 (ZM2L1), Zona 3 (ZM3L1) y Zona 4 (ZM4L1) y en el Lote 2 (L2) se identificaron tres ZM: Zona 1 (ZM1L2), Zona 2 (ZM2L2) y Zona 3 (ZM3L2). Las principales diferencias entre las ZM estuvieron dadas por el grado de erosión y posición en el paisaje.

Se realizaron muestreos de suelo por ZM a la siembra y madurez fisiológica del cultivo hasta una profundidad de 60 cm para la determinación del contenido de N-NO₃ y mediciones semanales de humedad de suelo desde la siembra del cultivo hasta la

madurez fisiológica utilizando una sonda de neutrones hasta una profundidad de 160 cm en cada parcela.

Se evaluaron 4 tratamientos de disponibilidad de N, dispuestos en parcelas de 10 hileras de ancho y 20 m de largo con 3 repeticiones dentro de cada una de las ZM. Los tratamientos incluyeron 4 niveles de N: 70 kg N ha⁻¹ (70N: Ni_(0-60cm)+ N fertilizante), 140 kg N ha⁻¹ (140N: Ni_(0-60cm) + N fertilizante), 210 kg N ha⁻¹ (210N: Ni_(0-60cm) +N fertilizante) y un testigo (N0) al que no se le aplicó N (Nd=Ni). Donde Ni_(0-60cm) es el contenido de N en el suelo de 0 a 60 cm, en forma de nitratos previo a la siembra.

El rendimiento del cultivo se determinó cosechando manualmente un área de 10 m². En ambos años el cultivo se realizó bajo siembra directa, con un distanciamiento entre hileras de 0.525m, el híbrido utilizado fue Nidera AX882 HCLMG, y se aplicaron 100 kg de SFT a la siembra. La fecha de siembra fue 20 de octubre y 20 de septiembre, para la campaña 2011/2012 y 2012/13, respectivamente.

La eficiencia de uso de nitrógeno (EUN, kg grano kg de Nd⁻¹) se calculó como el cociente entre el rendimiento del cultivo (Kg grano ha⁻¹) y el Nd (kg N ha⁻¹). El N disponible (Nd) para el cultivo se estimó como la sumatoria del Ni, el N aplicado como fertilizante y el N mineralizado durante el ciclo del cultivo (Nmin), determinando este último a partir de mediciones en las parcelas sin fertilizar.

La eficiencia de uso de agua (EUA, kg grano mm⁻¹) se calculó como el cociente entre el rendimiento del cultivo (kg grano ha⁻¹) y la lámina de agua evapotranspirada durante el período de crecimiento del cultivo.

Los resultados se analizaron mediante un ANOVA y regresiones lineales para evaluar los cambios en EUN y EUA de acuerdo a Nd. Los análisis se realizaron con el software Infostat (2004).

Resultados

Las precipitaciones en la primer campaña (Lote 1, 2011/12), fueron de 417 mm, un 25% menor que las normales. Alrededor de floración (27 de diciembre) las precipitaciones fueron 53 mm, representando sólo el 60% de la evapotranspiración del cultivo, registrándose una situación de déficit en todos los meses. En el Lote 2 (2012/13), las precipitaciones en el ciclo totalizaron 750 mm, siendo un 23% mayor que las normales. Esto generó balances positivos en tres de los seis meses de crecimiento del cultivo, mientras que durante el período centrado en floración las precipitaciones excedieron en 58% a la demanda del cultivo.

En el Lote 1, el Ni mostró bajos niveles siendo en promedio 33 kg N-NO₃ ha⁻¹, sin diferencias significativas entre ZM ($p>0.05$). De manera similar, en el Lote 2 no se detectaron diferencias significativas en Ni por ZM, siendo el contenido promedio de 49 kg N-NO₃ ha⁻¹. No se detectaron diferencias significativas entre ZM en el contenido de agua inicial ($p>0.05$) en ninguno de los lotes evaluados.

En el Lote 1, el Nd varió por efecto del N y de las ZM, aumentando con el tratamiento de fertilización entre 29 y 240%, comparado con el tratamiento testigo (N0) (Tabla 1), la ZM3L1 fue la que menor disponibilidad de N tuvo, siendo entre 11 y 17% menor que las otras zonas. La variación por efecto de la fertilización fue de 38%, mientras que la variación atribuida a la ZM fue de 8%. En el Lote 2, el Nd aumentó hasta 2.4 veces con el tratamiento de fertilización con N (Tabla 2), respecto al tratamiento testigo. La disponibilidad de N en la ZM1L2 fue 41% mayor que en las otras ZM. La variación debida a la fertilización fue mayor que la variación entre ZM, siendo de 40% y 21%, respectivamente.

El rendimiento en el Lote 1 resultó mayor y similar en las ZM1L1 y ZM4L1, intermedio en la ZM2L1 y menor en la ZM3L1 (Tabla 1). La respuesta media a la disponibilidad de

N fue de 177, 1061 y 1791 kg ha⁻¹, para los tratamientos N70, N140 y N210, respectivamente (Tabla 1). La respuesta media por ZM fue mayor en las ZM2L1 y ZM4L1, intermedia en la ZM1L1, y las menores respuestas se obtuvieron en la ZM3L1. En el Lote 2, el rendimiento promedio del cultivo fue un 50 y 60% mayor en la ZM1L2 respecto a los alcanzados en las ZM2L2 y ZM3L2, respectivamente. (Tabla 2). La respuesta del cultivo varió de acuerdo al tratamiento de N; no obteniéndose respuesta en el tratamiento N70 y con una respuesta media de 1907 y 2437 kg ha⁻¹ para N140 y N210, respectivamente. La respuesta media fue similar entre ZM y alcanzó los 1400 kg ha⁻¹.

Tabla 1. Valores medios de N disponible (Nd), rendimiento, evapotranspiración del cultivo (ETC), eficiencia de uso de N (EUN) y eficiencia de uso de agua (EUA) por zona de manejo (ZM) y tratamiento de fertilización con N (N) en el Lote 1.

	Nd kg ha ⁻¹	Rendimiento kg ha ⁻¹	ETC mm	EUN kg grano kg N ⁻¹	EUA kg grano mm ⁻¹
ZM1L1	211 bc	6350 a	428	33	15
ZM2L1	205 b	5955 a	463	31	13
ZM3L1	185 a	3827 b	446	24	9
ZM4L1	223 c	6309 a	454	29	13
N0	126 A	4853 A	426 A	39 A	11
N70	163 B	5030 A	440 AB	31 B	12
N140	233 C	5914 A B	473 C	26 BC	13
N210	303 D	6189 B	452 BC	21 C	14
ANOVA					
ZM	***	***	ns	ns	ns
N	***	*	**	***	ns
ZMxN	ns	ns	**	ns	ns

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), mayúsculas indican diferencias entre tratamientos de disponibilidad de N dentro de la ZM, minúsculas indican diferencias entre ZM y minúscula *cursiva* indican diferencias entre tratamientos de disponibilidad de N. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ns: no significativo

En el Lote 1, la EUN disminuyó con el aumento de N (Tabla 1) siendo la disminución con la dosis máxima de 46%. De manera similar, en el Lote 2, la EUN disminuyó hasta un 43% por efecto de Nd (Tabla 2). No se verificaron efectos significativos de ZM sobre la EUN ($p > 0.05$) en ninguno de los lotes evaluados.

En el Lote 1, la ETC promedio fue de 447mm (Tabla 1) y se vio afectada significativamente por N ($p < 0.01$) evidenciándose una interacción significativa ($p < 0.001$). En el Lote 2, la ETC en promedio fue de 482mm, y a diferencia del lote 1 varió por efecto de la ZM.

La EUA en el lote 1 no mostro diferencias por zonas ni dosis de N a diferencia del lote 2, donde la EUA varió de acuerdo a las ZM, siendo un 41 y 31% mayor en la ZM1L2 respecto a las otras zonas (Tabla 2).

Tabla 2. valores medios de n disponible (nd), rendimiento, evapotranspiración del cultivo (etc), eficiencia de uso de n (eun) y eficiencia de uso de agua (eua) por zona de manejo (zm) y tratamiento de fertilización con n (n) en el lote 2.

	Nd	Rendimiento	ETC	EUN	EUA
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	mm	kg grano kg N ⁻¹	kg grano mm ⁻¹
ZM1L2	245 a	9122 a	498	38	22 a
ZM2L2	168 b	6071 b	479	39	15 b
ZM3L2	179 b	5618 b	469	37	16 b
N0	123 A	5877 A	484	49	13 A
N70	145 A	5774 A	477	40	16 A
N140	229 B	7784 B	482	34	20 B
N210	293 C	8314 B	485	28	22 B

ANOVA					
ZM	***	***	***	ns	***
N	***	ns	ns	***	ns
ZMxN	ns	ns	ns	*	ns

Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05), minúsculas indican diferencias entre ZM y mayúsculas entre tratamientos de fertilización.*p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001; ns: no significativo

En ambos lotes, la EUN se relacionó lineal y negativamente con el Nd y la EUA lo hizo lineal y positivamente (Figura 1 y 2).

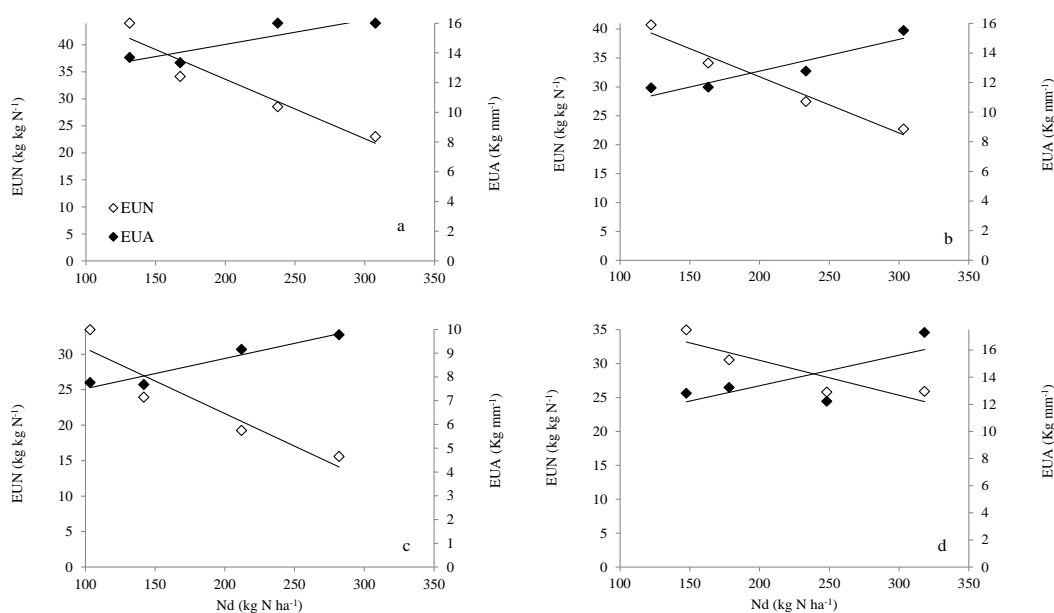


Figura 1. Relación entre la EUN (símbolos vacíos) y la EUA (símbolos llenos) con el Nd de ensayos de fertilización nitrogenada para las ZM evaluadas en el Lote 1 (Campaña 2011/12) a) ZM1L1, b) ZM2L1, c) ZM3L1 y d) ZM4L1.

De acuerdo con estas relaciones puede obtenerse el nivel de Nd en el cual las dos eficiencias se equilibran (cruce entre las eficiencias).

En el Lote 1, los niveles de Nd donde las eficiencias se equilibran resultaron en 160, 190, 140 y 240 kg N ha⁻¹, para las ZM1L1, ZM2L1, ZM3L1 y ZM4L1, respectivamente (Figura 1 a, b, c y d), mientras que en el Lote 2 fueron de 250, 165 y 130 kg N ha⁻¹, para la ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2, respectivamente (Figura 2 a, b y c). Debe destacarse que el nivel de Nd en el cual las eficiencias se optimizan aumentó con la productividad de la ZM en ambos lotes.

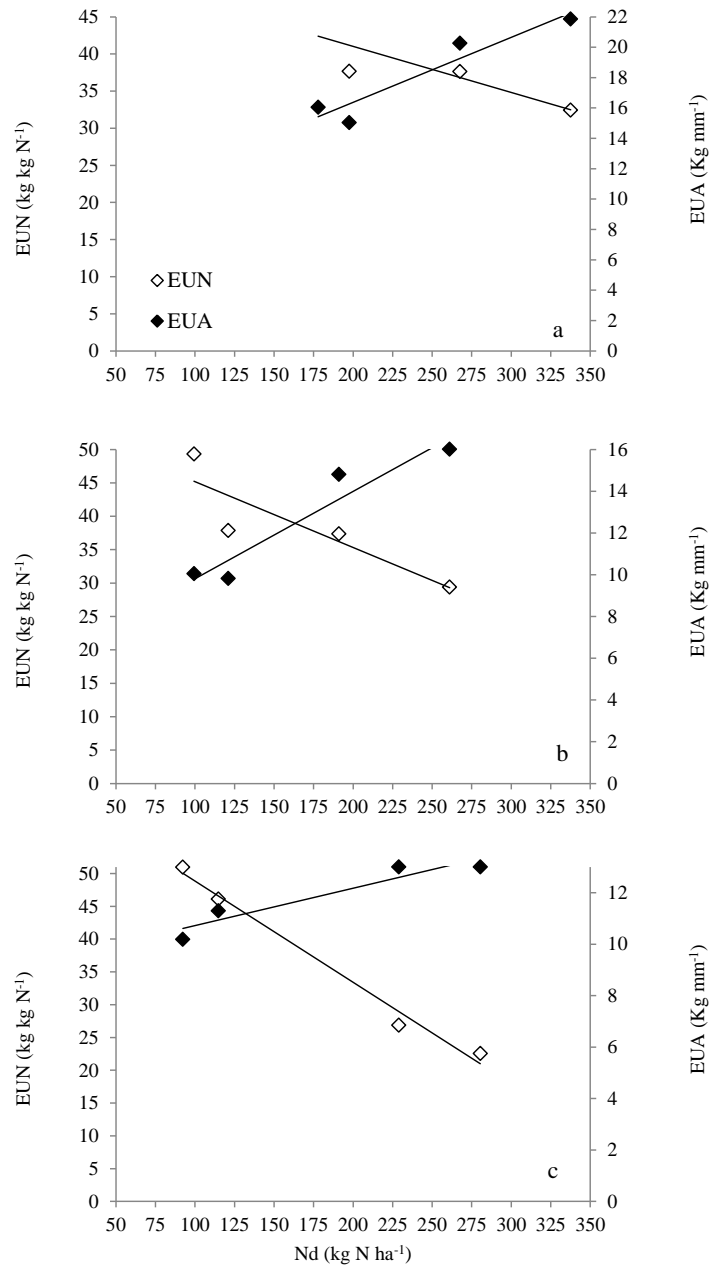


Figura 2. Relación entre la EUN (símbolos vacíos) y la EUA (símbolos llenos) con el Nd de ensayos de fertilización nitrogenada para las ZM evaluadas en el Lote 2 (Campaña 2012/13) a) ZM1L2, b) ZM2L2 y c) ZM3L2.

Discusión

Los antecedentes donde se estudia la respuesta al agregado del nitrógeno por ambientes, como los trabajos realizados por Lopez de Sabando et al., (2010) y por Melchiori et al. (2011), reportan una mayor respuesta en sitios de menor productividad, resultados que difieren con los hallados en este trabajo, debido a que las ZM de menor productividad (ZM3L1 y ZM3L2, en cada año) tuvieron una menor respuesta que las ZM de mayor productividad.

Contrariamente a lo esperado, la EUN no mostró variaciones espaciales, ya que no se hallaron diferencias entre ZM en ninguno de los años evaluados, en contraste con esto Muschetti Piana (2012) reportó diferencias en la EUN por ZM, siendo estas mayores en zonas de baja productividad. Los dos años evaluados fueron de condiciones climáticas muy distintas de la media, la falta de variación espacial de la EUN podría atribuirse a esto, como lo reportado por Schepers et al. (2004), quienes estudiaron el efecto de la variabilidad temporal sobre la expresión de la variabilidad espacial de maíz, hallando que la variabilidad espacial del rendimiento está más fuertemente relacionada a las ZM en años de precipitaciones medias, comparados con años secos o húmedos.

La EUA fue mayor en zonas de alta productividad y se asoció positivamente con el Nd, esta relación entre EUA y la disponibilidad de N ha sido documentada previamente por varios autores (Lamm et al., 2001; Halvorson et al., 2004; Hatfield and Prueger, 2004; Brueck, 2008;).

Kim et al. (2008) reportaron incrementos en la EUA de 31% con aumentos de N de 0 a 112 kg N ha⁻¹. A diferencia de esto Muschetti Piana (2012) trabajando con maíz sobre suelos arenosos, encontró una relación negativa entre la EUA y el aumento en la disponibilidad de N, atribuyendo esta relación a las condiciones de déficit hídrico y la poca capacidad de retención hídrica del suelo.

Las relaciones opuestas halladas entre la EUA y EUN con el Nd, y las diferencias entre ZM en los niveles de Nd en los que las eficiencias se equilibran, sugieren que se podrían ajustar dosis de N por ZM y de esta manera realizar un manejo eficiente, tanto del N como del agua.

Las variaciones espaciales y temporales de la disponibilidad de N y de agua requieren de más años de estudios para determinar si los niveles de Nd a los cuales las eficiencias se optimizan se mantienen a través del tiempo por ZM. De acuerdo a esto un estudio mediante el uso de modelos de simulación permitiría realizar un análisis temporal de las variaciones de Nd por ZM.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que a pesar de que las ZM evaluadas no mostraron diferencias en la disponibilidad inicial de agua y N, las diferencias entre ZM en cuanto a propiedades del suelo y posición en el paisaje permitieron verificar la existencia de variabilidad espacial en la EUA del cultivo de maíz.

La EUN y la EUA, se relacionaron con el Nd de manera opuesta. Esto permitió hallar los niveles de Nd a los que las eficiencias se equilibran en cada ZM, lo que podría tenerse en cuenta para el ajuste de dosis de N por ZM.

Bibliografía

- Batchelor W.D., Basso B. and J.O. Paz. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Europ. J. Agronomy*. 18:141-158.
- Basso B., Bertocco M., Sartori L. and E.C. Martin. 2007. Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in a maize–wheat–soybean rotation. *European Journal of Agronomy*. 26:82–91.
- Brueck, H. 2008. Effects of nitrogen supply on water use efficiency of higher plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 171:210-219.
- Hatfield J.L. and J.H. Prueger. 2004 Nitrogen Over-use, Under-use, and Efficiency. 4th International Crop Science Congress. Brisbane, Queensland, Australia. http://www.regional.org.au/au/asa/2004/plenary/2/140_hatfield.htm. (Marzo 2014).
- Hatfield J., Sauer T. J. and J.H. Prueger. 2001. Managing Soils to Achieve Greater Water Use Efficiency: A Review. *Agronomy Journal*. 93:271–280
- Halvorson, A.D., D.C. Nielsen, and C.A. Reule. 2004. Nitrogen fertilization and rotation effects on no-tillage dryland wheat production. *Agronomy Journal*. 96:1196–1201.
- Huggins D.R. and W.L. Pan. 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity. *Agronomy Journal*. 85: 898-905.
- Kim K., Clay D.E., Carlson C.G., Clay S.A. and T. Trooien. 2008. Do Synergistic Relationships between Nitrogen and Water Influence the Ability of Corn to Use Nitrogen Derived from Fertilizer and Soil? *Agronomy Journal* 100:551–556.
- Lamm, F.R., Trooien T.P., Manges H.L. and H.D. Sunderman. 2001. Nitrogen fertilization for subsurface drip-irrigated corn. *Trans. ASAE* 44:533–542.
- Lemaire G. and F.F. Gastal. 2009. Chapter 8: Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. In: *Crop Physiology*. Sadras V. and D. Calderini (Eds). p171-211. ISBN 9780123744319, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374431-9.00008-6> (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744319000086>)
- López de Sabando M.J., M. Díaz Zorita, y F. Musegne. 2010. Variabilidad en los rendimientos y en la calidad de granos de trigo dentro de lotes de producción. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Actas en CD.
- Melchiori R.J.M., Pautasso J.M., Albarenque S.M. y A.C. Kemmerer. 2011. Fertilización nitrogenada en trigo según zonas de manejo. *Jornada Regional de cultivos de Invierno*. 1º Edición. p59.
- Muschetti Piana M.P. 2012. Riesgo de pérdidas de nitratos por lixiviación en fertilizaciones nitrogenadas según manejo uniforme y sitio-especifico del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Tesis de Maestría....
- Schepers A.R., Shanahan J.F., Liebig M.A., Schepers J.S., Johnson S.H. and A. Luchiari. 2004. Appropriateness of Management Zones for Characterizing Spatial Variability of Soil Properties and Irrigated Corn Yields across Years. *Agronomy Journal*. 96:195–203