



Simposio
Fertilidad
2019 Conocer más.
Crecer mejor.



8 y 9 de Mayo

Rosario, Santa Fe. Argentina.

www.fertilizar.org.ar


FERTILIZAR
ASOCIACION CIVIL

Llevando la agricultura de precisión al lote

Agustín Pagani

Clarion, 9 de Julio, Buenos Aires

apagani@precisionclarion.com

Introducción

La adopción de tecnologías de agricultura de precisión referidas al manejo de nutrientes ha ganado popularidad en los últimos años en la Argentina (Melchiori et al., 2018). Su objetivo principal ha sido el de aumentar la eficiencia en el uso de los nutrientes mediante herramientas de diagnóstico y técnicas de aplicación que contemplen la variabilidad espacial de los lotes de producción, la variabilidad temporal (o interanual) y la interacción entre ambas. Esta incorporación tecnológica ha sido motivada por una mayor oferta de herramientas mecánicas e informáticas, pero también por una mayor disponibilidad de información para los productores y técnicos sobre cómo utilizarlas satisfactoriamente. El objetivo de este resumen es presentar algunos conceptos y experiencias en investigación y producción relacionadas al manejo sitio-específico de nutrientes en cultivos extensivos como herramientas para una agricultura más eficiente, más rentable y sustentable.

Manejo sitio-específico de nitrógeno

El manejo del N en sistemas agrícolas presenta una elevada complejidad debido al número de factores que intervienen en la dinámica de este nutriente en el sistema suelo-planta-atmósfera (Havlin et al., 2005). Esto es particularmente cierto en regiones húmedas o de pluviometría variable como gran parte de la región pampeana argentina, donde la oferta de N del suelo y la demanda potencial de este nutriente por parte del cultivo se modifican consistentemente de un año a otro en función de las condiciones ambientales. A su vez, estudios nacionales han demostrado como las variaciones en las propiedades edáficas y topográficas a nivel intra-lote determinan que el nivel óptimo de fertilizante nitrogenado a aplicar varíe espacialmente de manera considerable (Gregoret et al., 2011; Peralta et al., 2013; Puntel et al., 2019). En estas condiciones, el manejo tradicional de N con dosis uniforme puede derivar en la subfertilización en algunas

áreas y sobrefertilización en otras (Scharf et al., 2005). En este sentido, numerosos trabajos han establecido que el manejo sitio-específico de N puede aumentar la rentabilidad de la producción de cereales, donde la variabilidad en las propiedades edáficas y topográficas lo justifican (Mamo et al., 2003; Ferguson et al., 2007). Por otro lado, existen evidencias que muestran que la tecnología de dosis variable permite además reducir el impacto ambiental de la fertilización nitrogenada (Basso et al., 2016).

En un estudio realizado en campos de productores del centro-oeste bonaerense durante el período 2012-2018 para los cultivos de maíz (Puntel et al., 2019) y trigo (datos no publicados) se evaluaron múltiples factores estáticos y dinámicos como predictores de la variabilidad espacio-temporal del rendimiento de ambos cultivos, la respuesta a N y la dosis óptima económica (DOE) de este nutriente. Específicamente, se establecieron experimentos en microparcels con dosis crecientes de N (0 a 250 kg/ha) y tres repeticiones en posiciones en el relieve y tipo de suelo contrastantes dentro de los lotes de producción y se ajustaron curvas de respuesta a la fertilización nitrogenada para poder estudiar la variación de la DOE de N en el tiempo y en el espacio. Estos lotes, a su vez, fueron caracterizados espacialmente mediante relevamientos de elevación, conductividad eléctrica aparente (ECa), derivados topográficos, profundidad de napa, disponibilidad de agua y N a la siembra, textura y materia orgánica del suelo, rendimiento de años anteriores, profundidad efectiva y precipitaciones acumuladas en períodos específicos. El objetivo fue estudiar qué variable o combinación de variables no deberían descuidarse como criterios para generar una prescripción de N con dosis variable.

Considerando los cinco años de este estudio y al igual que lo ampliamente reportado en la bibliografía internacional para el cultivo de maíz (Raun et al., 2010; Arnall et al., 2013), el rendimiento al nivel óptimo de N no fue un buen indicador de la DOE (Figura 1), lo que significa que no necesariamente los años y áreas dentro de los lotes con mayor productividad fueron los

que requirieron mayor aporte de N mediante la fertilización. Por otro lado, la DOE de N se relacionó de forma negativa, aunque muy débilmente ($R^2 = 0.21$), con el rendimiento del testigo sin N (Figura 1), indicando que los niveles óptimos de N tendieron a incrementarse cuando y donde el aporte de N del suelo fue menor, o se dieron condiciones de pérdidas de N del sistema por lavado y desnitrificación. Sin embargo, la DOE se relacionó positiva y muy estrechamente ($R^2=0.91$) con la respuesta máxima a la fertilización (diferencia entre el rendimiento a la DOE y el rendimiento del testigo sin N, Figura 1), sugiriendo la importancia de la integración conjunta de la oferta de N del suelo y de la demanda de N por parte del cultivo (en función de la potencialidad de rendimiento

del ambiente) para establecer una estrategia de manejo de N con dosis variable. La bibliografía internacional señala la importancia de desarrollar modelos predictivos de la respuesta a la fertilización como indicador principal de la DOE para este cultivo (Lory y Scharf, 2003; Sawyer et al., 2006; Raun et al., 2010; Arnall et al., 2013).

A diferencia de lo encontrado para maíz, en los ensayos de trigo se observó que el nivel de rendimiento sin limitaciones de N fue un indicador parcial de la variabilidad espacio-temporal de la DOE ($R^2=0.51$), lo que indica una tendencia de que los niveles óptimos de fertilización nitrogenada deberían elevarse a medida que lo hace el nivel de rendimiento del ambiente, pero no se determinó relación alguna entre la DOE y el ren-

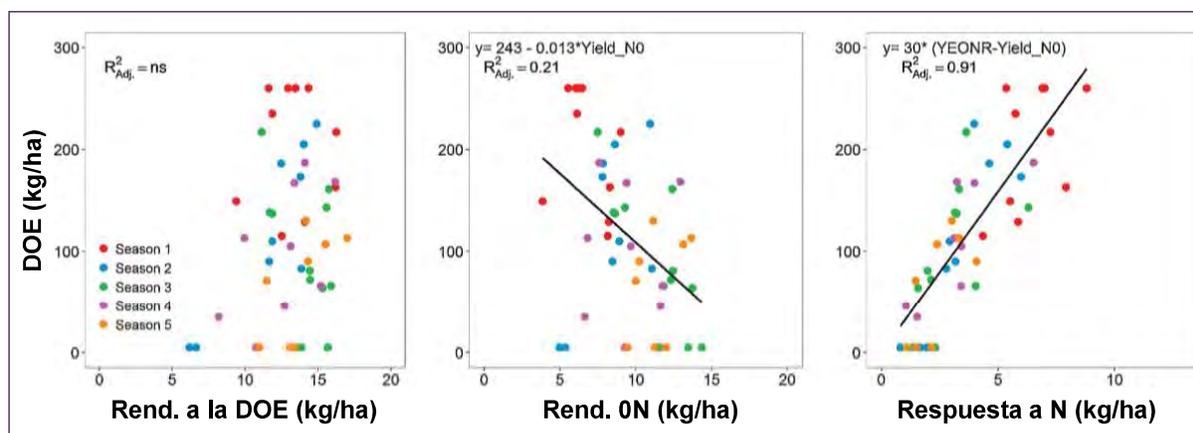


Figura 1. Dosis óptima económica de nitrógeno (DOE N) para el cultivo de maíz en función del rendimiento a la DOE, el rendimiento del testigo sin N y la respuesta máxima a la fertilización nitrogenada. Información proveniente de 53 ensayos en microparcelas ubicados en diferentes tipos de suelo y posiciones en el relieve dentro de lotes del partido de 9 de Julio durante el período 2012-2017. Adaptado de Puntel et al. (2019).

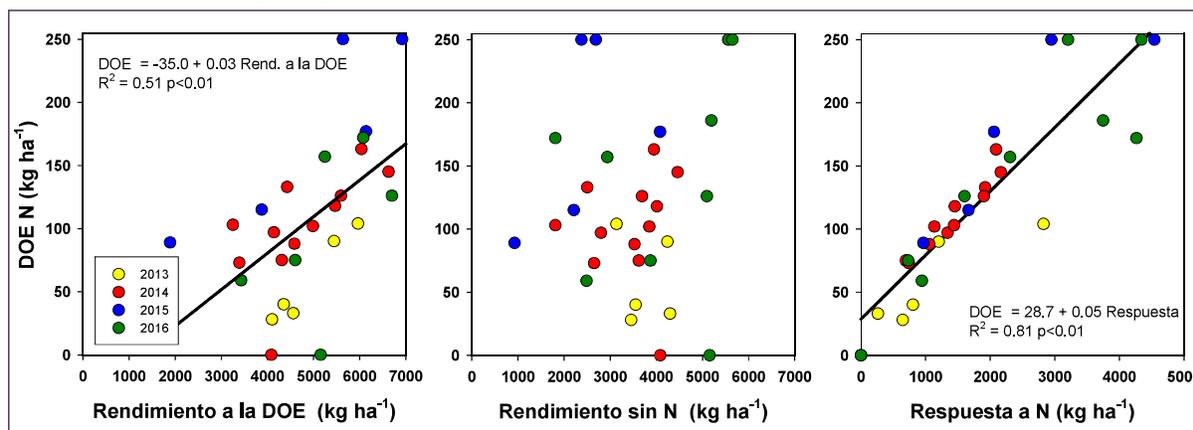


Figura 2. Dosis óptima económica de nitrógeno (DOE N) para el cultivo de trigo en función del rendimiento a la DOE, el rendimiento del testigo sin N y la respuesta a la fertilización nitrogenada. Información proveniente de 33 ensayos en microparcelas ubicados en diferentes tipos de suelo y posiciones en el relieve dentro de lotes del partido de 9 de Julio durante el período 2013-2016. Datos no publicados.

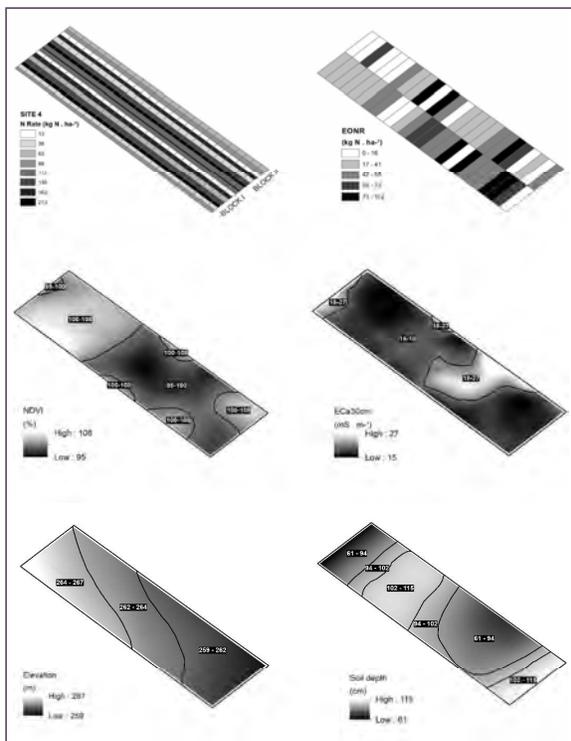


Figura 3. Esquema de uno de los ensayos en franja con dosis crecientes de nitrógeno (N) conducidos en el sudeste y noroeste bonaerense durante el período 2013 a 2017 donde se observa la variabilidad espacial de la dosis óptima de nitrógeno (DOE N) a nivel de celda y los diferentes criterios de delineación de zonas de manejo de N que fueron evaluados.

diminución del testigo sin N (Figura 2). Sin embargo, cuando la oferta y demanda de N fueron consideradas de manera conjunta a través del análisis de la respuesta máxima a la fertilización (Figura 2), se observó una estrecha relación entre esta variable y la DOE ($R^2=0.81$), de manera similar a lo obtenido para el cultivo de maíz.

Estos resultados para ambos cultivos sugieren la importancia de contemplar la oferta y demanda de N en forma integrada a la hora de generar una prescripción de fertilización nitrogenada con dosis variable ya que la cuantificación de la demanda en forma aislada (como por ejemplo, el uso de mapas de rendimiento de años anteriores o de imágenes multiespectrales que se correlacionen con productividad vegetal) puede no ser estrategias acertadas para separar áreas dentro del lote con diferentes requerimientos de N (especialmente para maíz). Por otro lado, la cuantificación de la oferta de N en forma individual (como el análisis de N inorgánico inicial o algún índice de mineralización de N) ignorando el potencial de rendimiento del ambiente tampoco parecería ser un planteo recomendable en regiones con pluviometría variable donde las pérdidas de N del sistema pueden ser importantes. En este sentido estudios internacionales sugieren que aquellas recomendaciones de fertilización que ignoran por completo el potencial de rendimiento del ambiente están sujetas a un 50% de éxito en el mejor de los casos (Lory y Scharf, 2003; Raun et al., 2010).

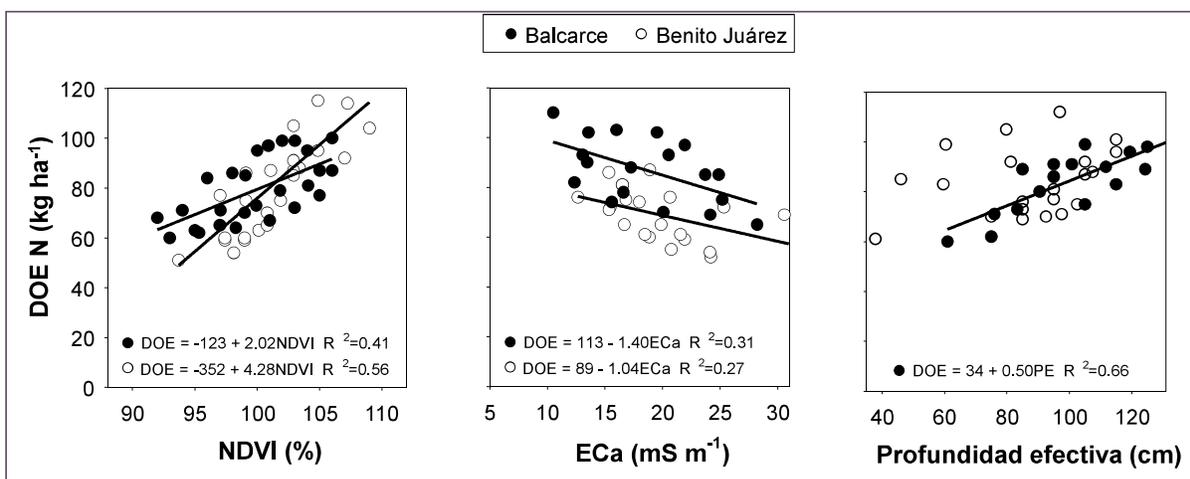


Figura 4. Dosis óptima económica de nitrógeno (DOE N) para el cultivo de maíz en función de: i) el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) promedio de cultivos anteriores, ii) la conductividad eléctrica aparente (ECa) del suelo medida a 30 centímetros de profundidad con la rastra Veris 3100, y iii) la profundidad efectiva de suelo. Información proveniente de nueve ensayos en franja con dosis crecientes de N en lotes del partido de Balcarce y Benito Juárez durante las campañas 2013/14 y 2014/15. Adaptado de Arana (2018).

Con el objetivo de comparar criterios de caracterización ambiental para el manejo sitio-específico de las necesidades de N para el cultivo de maíz se llevaron a cabo dos proyectos de investigación en campos de productores, uno en el sudeste bonaerense (partidos de Balcarce y Benito Juárez) durante las campañas 2013/14 y 2014/15 (Arana, 2018) y el otro en el noroeste de la provincia de Buenos Aires (partidos de Villegas y Ameghino) durante las campañas 2015/16 y 2016/17 (Girón et al., datos no publicados). En ambos casos se condujeron ensayos en franja (**Figura 3**) con cinco a ocho dosis de N (de 0 a 200 kg N ha⁻¹) atravesando la variabilidad de nueve lotes comerciales en el sudeste y diez en el noroeste bonaerense. Estos lotes fueron caracterizados espacialmente mediante el análisis de imágenes satelitales y mapas de rendimiento de cultivos anteriores, elevación, conductividad eléctrica aparente (CEa) y profundidad efectiva del suelo (tosca en el sudeste y horizonte thapto en el noroeste) siguiendo una metodología similar a la empleada en varios trabajos previos (Wibawa et al., 1993; Franzen et al., 1998; Scharf et al., 2005).

En el estudio realizado en el sudeste bonaerense (Arana, 2018), condiciones de estrés hídrico y térmico restringieron el rendimiento del cultivo y la respuesta a la fertilización nitrogenada en ambas campañas. En general, todos los criterios de delineación de zonas de manejo se mostraron efectivos para explicar el rendimiento del cultivo a nivel intra-lote, sin embargo, su capacidad para explicar la variación espacial de la respuesta a N y la DOE fue diferente dependiendo del criterio empleado. Agrupando todos los sitios se observó que el rendimiento del cultivo, la respuesta a N (datos no mostrados) y la DOE (**Figura 4**) tendieron a aumentar a medida que lo hicieron el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) promedio de cultivos anteriores y la profundidad efectiva del suelo, pero disminuyeron a medida que aumentó la ECa del suelo. Estas tres variables asociadas a la potencialidad del ambiente (demanda de N) más que a la capacidad del suelo de aportar N (oferta de N), fueron los indicadores que mejor explicaron las variaciones de la DOE dentro de estos lotes, por lo que deberían ser tenidas en cuenta en la delineación de zonas de manejo de N en el sudeste bonaerense, al menos en campañas de escasas precipitaciones como las de este estudio.

En el estudio llevado a cabo en el noroeste bonaerense (Girón et al., datos no publicados) usando la misma metodología, se presentaron condiciones de abundantes/excesivas precipitaciones durante ambas campañas, lo que derivó en altos rendimientos máximos, pero también condiciones predisponentes para la ocurrencia de pérdidas de N del sistema. En dicho estudio, considerando solo los tres sitios de mayor contenido de arena y heterogeneidad topográfica, la elevación del terreno fue el mejor criterio para separar zonas dentro del lote con rendimientos contrastantes independientemente del nivel de N aplicado. Para estos sitios, el rendimiento del cultivo disminuyó a medida que aumentó la elevación del terreno (**Figura 5**). Sin embargo, la elevación no fue un criterio efectivo para explicar variaciones a nivel intra-lote de la respuesta a N o la DOE (**Figura 5**), ya que ambas fueron altas y generalizadas (situación típica de lotes arenosos ante condiciones hídricas muy favorables o excesivas).

Por el contrario, agrupando los sitios más planos de textura más fina y con presencia de horizonte thapto en determinada porción del lote, se observó una relación significativa entre el rendimiento del testigo sin N, la respuesta a la fertilización nitrogenada y la DOE N con la CEa del suelo medida con la rastra Veris 3100 (**Figura 6**). En estos sitios, el rendimiento del testigo sin N disminuyó a medida que aumentó la ECa a 90 cm de profundidad, sugiriendo la ocurrencia de mayores pérdidas de N en las zonas de alta ECa asociadas a la presencia de horizontes thapto que permanecieron encharcadas por más tiempo en campañas de abundantes precipitaciones. Por esa razón, la respuesta a N y DOE N aumentaron a medida que lo hizo la ECa del suelo (**Figura 6**). Estos resultados sugieren una mayor capacidad de variables asociadas a la oferta de N del suelo para explicar las variaciones espaciales de la DOE N en años húmedos como los que se dieron en este estudio. En estas condiciones, y a diferencia de lo observado en el estudio del sudeste en condiciones de precipitaciones escasas, la demanda de N asociada al potencial de rendimiento del cultivo tiene poca capacidad de explicar la variabilidad espacial de la DOE N ya que es alta y generalizada en todo el lote cuando el agua deja de ser el factor más limitante.

Estas experiencias realizadas en zonas diferentes de la región pampeana sugieren la importancia de emplear modelos integrados para la fertilización nitrogenada con dosis variable. Por lo

expuesto, queda claro que cualquier herramienta o algoritmo adoptado como base para generar una prescripción de fertilización nitrogenada debería integrar factores asociados a la demanda de N por parte del cultivo como disponibilidad de agua, presencia de napa o textura y materia orgánica del suelo (o índices que se correlacionen con estas propiedades como la elevación y la ECa), así como también indicadores de la oferta de N del suelo como el N inorgánico inicial o el potencialmente mineralizable durante la estación de crecimiento. Si bien oferta y demanda deberían ser consideradas en forma conjunta, la investigación sugiere que la importancia relativa de cuantificar la demanda de N sería mayor en años de bajas precipitaciones, mientras que la cuantificación de la oferta de N del suelo cobraría mayor importancia relativa para definir la DOE N en años de precipitaciones abundantes o excesivas.

Manejo sitio específico de fósforo

En general, el manejo del fósforo (P) presenta menor complejidad que el manejo del N, particularmente en regiones con suelos poco fijadores de P como los de la región templada argentina. Esto se debe a que las necesidades de P por parte de un cultivo determinado interaccionan relativamente poco con el clima, suelo y nivel de rendimiento (Havlin et al., 2005). A diferencia del caso del N, en general los umbrales críticos de P (valor de concentración de P en el suelo por encima del cual la probabilidad de respuesta es muy baja o nula) son relativamente estables ante variaciones en las condiciones de crecimiento del cultivo (Gutiérrez Boem y Salvagiotti, 2014; Wortmann et al., 2018). Además, debido a la residualidad de la fertilización fosforada en suelos poco fijadores, la determinación de la dosis de P a aplicar no es un aspecto tan crítico en el corto

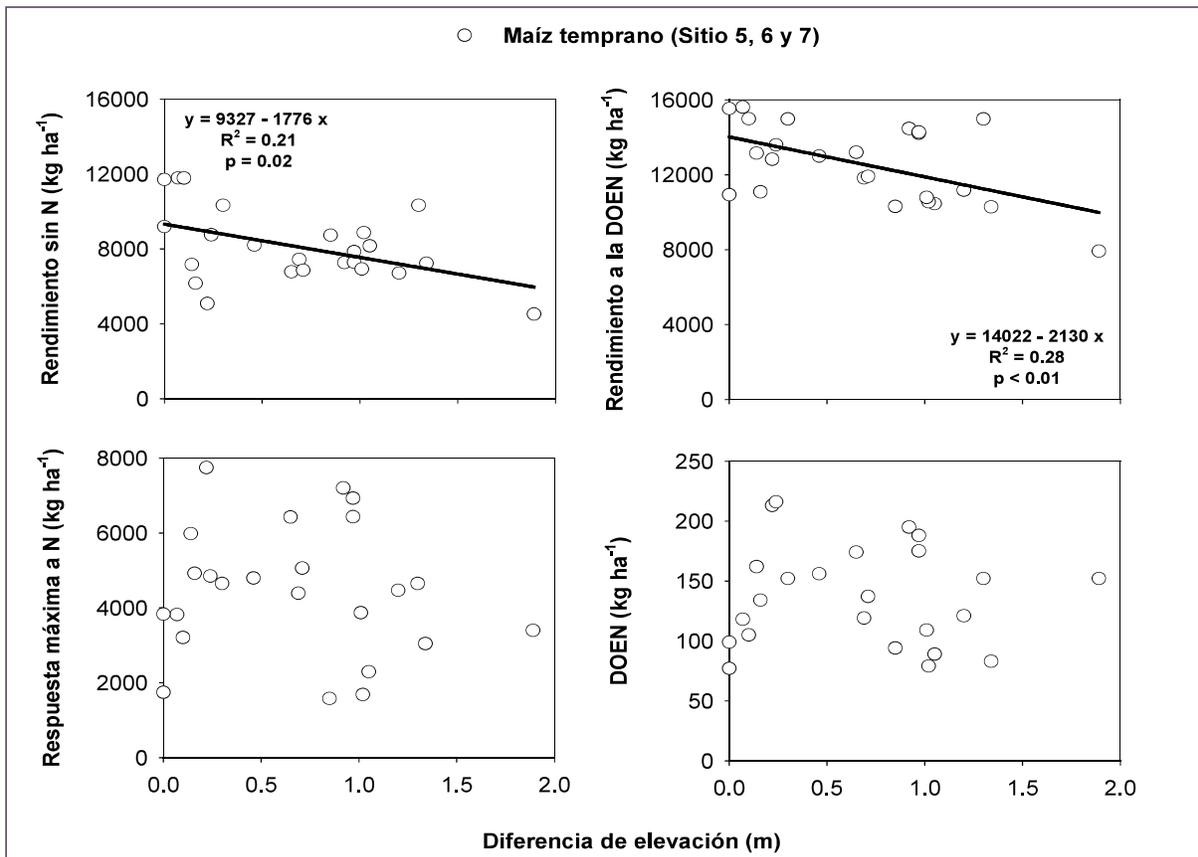


Figura 5. Rendimiento de maíz sin el agregado de nitrógeno (N), rendimiento a la dosis óptima económica (DOE N), respuesta a la fertilización y DOE N en función de la elevación del terreno (expresada como diferencia respecto al punto más bajo del lote). Información proveniente de ensayos en franja con dosis crecientes de N en tres lotes (con presencia de lomas arenosas) del partido de General Villegas durante las campañas 2015/16 y 2016/17.

plazo como lo es para el N. Siempre y cuando las necesidades de P de un cultivo sean satisfechas, moderados excesos en el P aplicado no representan reducciones importantes en la eficiencia de la fertilización ya que dichos excesos quedan disponibles para futuros cultivos.

Sin embargo, cuando se considera la variabilidad espacial de la disponibilidad de P para los cultivos, el manejo de este nutriente se complejiza significativamente. Esto se debe a que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo pueden producir variabilidad tanto en rendimiento y exportación de P por parte de los cultivos, como en el P disponible para la planta afectando la cantidad total de P en el suelo, la fracción de P disponible para el cultivo y las posibles pérdidas del sistema (Mulla y Schepers, 1997). La variabilidad en las propiedades del suelo puede ocurrir en varias escalas, desde centímetros a escalas regionales, pero es de

especial interés para el manejo variable de P, la que ocurre a nivel intra-lote. Particularmente, la variabilidad del nivel de P en el suelo puede ser muy alta aún dentro de campos que parecen ser uniformes en otras propiedades del suelo (Mallarino et al., 1999) y tiende a ser todavía más alta en lotes con varios años de agricultura y ganadería, sobre todo con extensa historia de fertilización y aplicación de enmiendas (Mallarino y Wittry, 1998; Kravchenko y Bullock, 2000). Por lo tanto, con muy pocas excepciones, los lotes de producción presentan áreas donde los cultivos requieren la aplicación de P y áreas donde no se requiere fertilizar o el requerimiento es significativamente menor.

El muestreo y análisis de suelo es el primer paso para iniciar una estrategia de manejo variable de P. En este sentido, existen diferentes esquemas de muestreo para coleccionar las muestras de P de un lote. Tradicionalmente, la recomendación

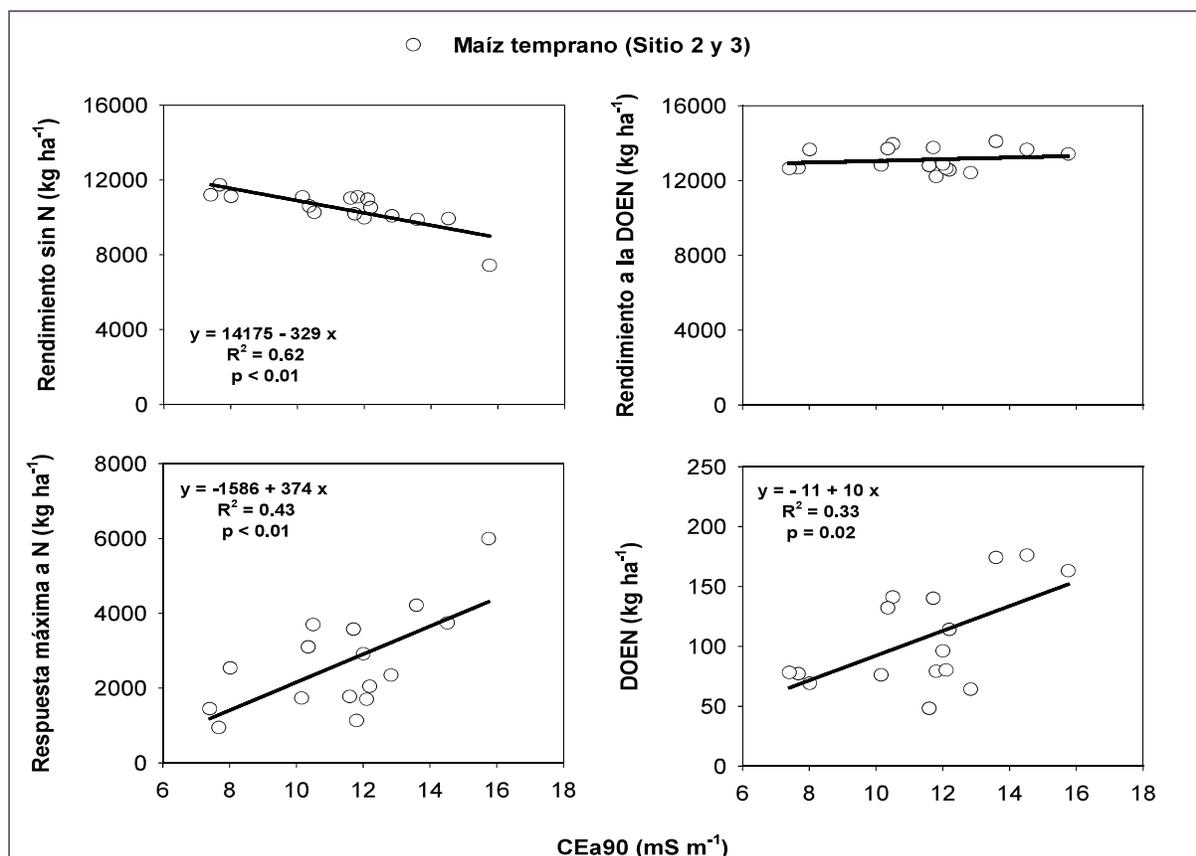


Figura 6. Rendimiento de maíz sin el agregado de nitrógeno (N), rendimiento a la dosis óptima económica (DOE N), respuesta a la fertilización y DOE N en función de la conductividad eléctrica aparente (ECa) del suelo medida a 90 centímetros de profundidad con la rastra Veris 3100. Información proveniente de ensayos en franja con dosis crecientes de N en dos lotes (planos y con presencia de horizonte thapto) del partido de General Villegas durante las campañas 2015/16 y 2016/17.

de muestreo de suelo para el diagnóstico de P a nivel mundial ha sido un método de muestreo de suelo basado en la topografía, mapa de suelo o manejo previo, tomando una muestra compuesta de 12 a 15 submuestras colectadas al azar de cada área de muestreo. En América del Norte y ciertas regiones de Europa, el reconocimiento de una alta variabilidad en los niveles de P no asociada con el tipo de suelo o topografía llevó al uso del muestreo en grilla para caracterizar esta variabilidad (Franzen y Peck, 1995; Lauzon et al., 2005). Este tipo de muestreo consiste en subdividir sistemáticamente un lote en áreas pequeñas o celdas y de cada una de éstas se extrae una muestra compuesta de 6 a 12 submuestras. Inicialmente se colectaban las submuestras de toda el área de cada celda, ya sea siguiendo un modelo sistemático o al azar, y a este método se lo denominó "muestreo de grilla-celda". Más tarde, se comenzaron a tomar las submuestras de áreas pequeñas (50 a 150 m²) localizadas cerca del centro de cada celda o de modo aleatorio, dándole el nombre de "muestreo de grilla-puntos". Los valores de los análisis de suelo obtenidos por el muestreo en grilla se los puede expresar directamente en un mapa para representar las celdas como tales (cuadrícula); o bien pueden usarse para interpolación de un mapa más denso y suavizado por medio de varios métodos estadísticos.

La intensidad de muestreo en grilla requerida para una prescripción efectiva con dosis variable es diferente para cada lote o región geográfica. No obstante, se ha encontrado que, si el muestreo de P se realiza con grillas muy grandes, se pueden encontrar bajas correlaciones cuando los resultados se comparan con muestreos en grilla de menor tamaño. Por consiguiente, las interpolaciones que se realizan para lograr mapas de prescripción de P pueden resultar inadecuadas dando lugar a recomendaciones de fertilidad erróneas (Mallarino y Wittry, 2004).

Con el fin de evaluar la conveniencia económica del muestreo de suelo en grilla en la región pampeana argentina, se realizó un estudio de 175 lotes de producción. Estos lotes fueron muestreados en grillas alineadas con una intensidad de 1 muestra (compuesta por 10 submuestras a 20 centímetros de profundidad) cada 1 ha o 1.6 has dependiendo del sitio (Figura 7). Las muestras de suelo fueron secadas, molidas, tamizadas y analizadas para fósforo disponible, materia orgánica y pH (NCR-13 No. 221).

Se utilizó la información publicada (Tellería et al., 2016; Chacra Experimental Bellocq, datos no publicados; Correndo, 2018) para simular la respuesta del rendimiento del maíz, el trigo y la soja a la fertilización fosforada empleando i) una dosis uniforme de 20 kg P/ha (muy frecuentemente empleada en la región pampeana) o ii) una dosis variable para cada celda de la grilla siguiendo las recomendaciones publicadas en Echeverría y García (1998). Se asumió como fuente de P el súper fosfato triple (430 US\$/ton) y se consideraron los siguientes precios para maíz, trigo y soja: 150, 200 y 250 US\$/ton, respectivamente. A dichos precios se les descontaron los gastos de flete y comercialización, y se calculó el margen bruto (MB) por hectárea para cada lote y cultivo asumiendo una fertilización con dosis uniforme y variable.

Los lotes muestreados presentaron diferentes niveles de variabilidad espacial en la disponibilidad de P con desvíos estándar que variaron entre 1.5 y 23 ppm y rangos entre 3 y 43 ppm (datos no mostrados), lo que representa una condición característica de la región pampeana Argentina. Los resultados de estas simulaciones muestran que la fertilización variable presentó un MB significativamente mayor que el de la fertilización con dosis uniforme (Figura 8) y su impacto económico fue mayor para el trigo (incremento de MB/ha promedio de 39 US\$/ha) y algo menor para el

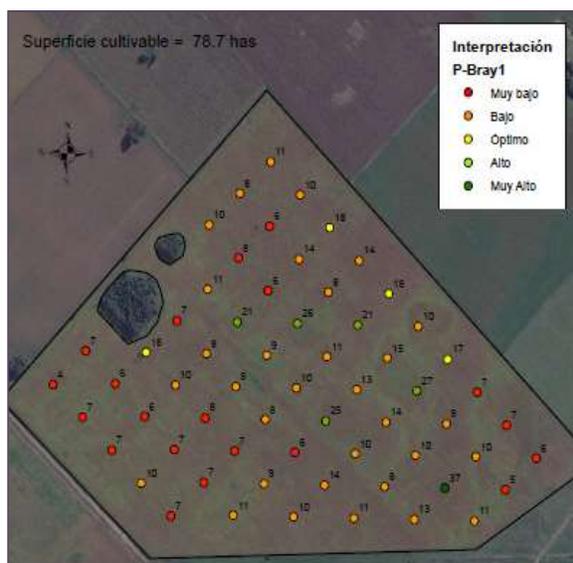


Figura 7 Ejemplo de un lote muestreado en grilla y ubicación geográfica de los 175 lotes. Algunos puntos representan más de un lote cuando estos se encontraban muy próximos entre sí.

maíz y la soja (30 y 27 US\$/ha, respectivamente), lo que puede explicarse por los diferenciales niveles de respuesta y umbrales críticos normalmente observados para estos tres cultivos (Echeverría y García, 1998; Correndo, 2018). Cabe aclarar que este aumento simulado de MB se compone de ahorro de fertilizante y/o aumento en la respuesta a P y solo contempla efectos de corto plazo, ignorando la residualidad de la fertilización y las

ventajas para el sistema que la dosis variable de largo plazo provoca al disminuir la variabilidad de P en el suelo (Mallarino y Wittry, 2004). Si bien este análisis representa una simple simulación utilizando supuestos publicados en la bibliografía nacional, los resultados obtenidos se consideran orientativos de la rentabilidad de corto plazo (1 año) de la fertilización con dosis variable respecto a un planteo tradicional con dosis uniforme.

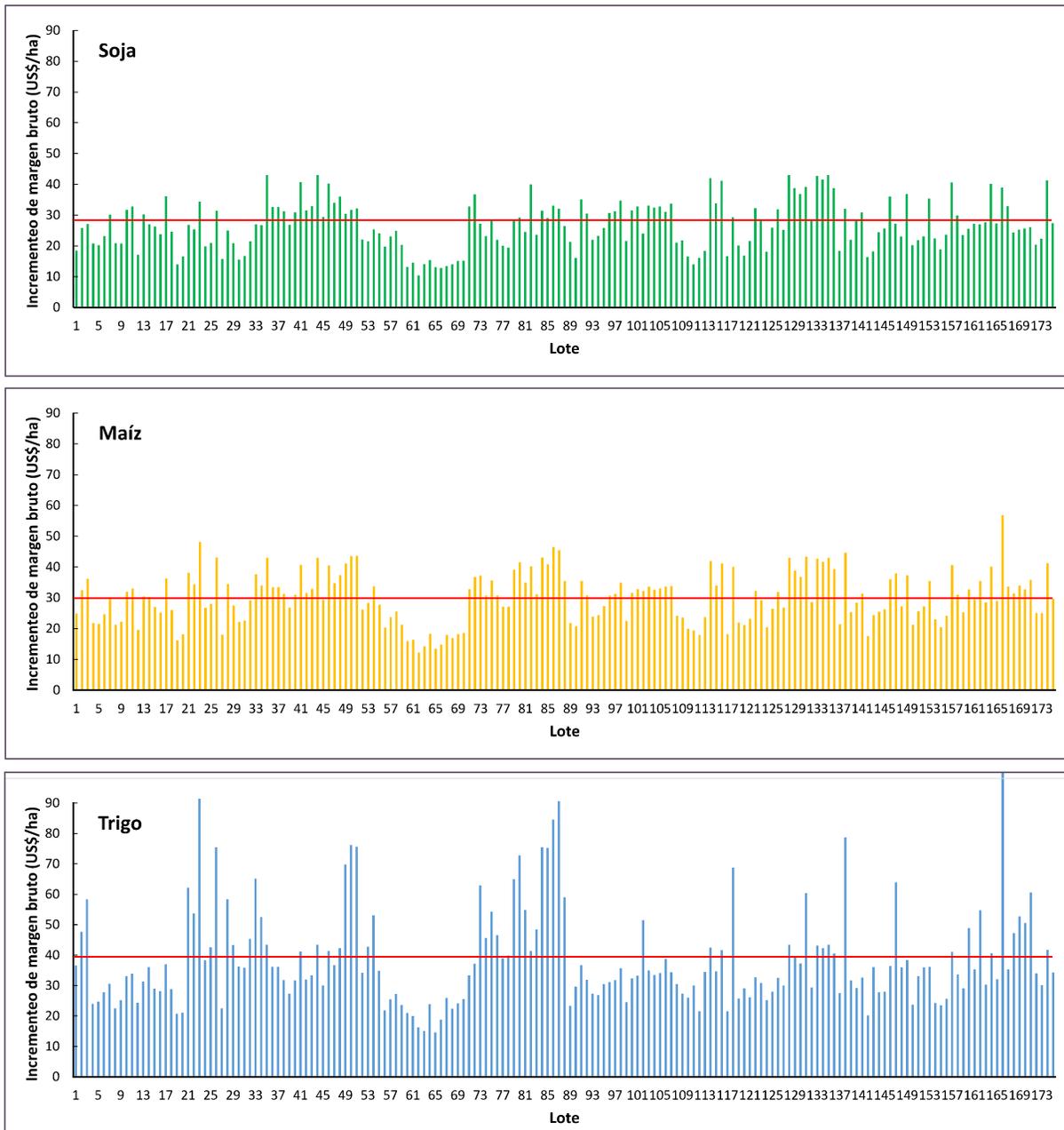


Figura 8. Incremento de margen bruto por hectárea estimado de la fertilización variable con P respecto a un planteo de fertilización con dosis uniforme para maíz, trigo y soja. Dichos incrementos se componen en ahorro de fertilizante y aumento adicional de producción.

Manejo sitio-específico de otros nutrientes y enmiendas

El conocimiento disponible respecto al manejo de azufre (S) con dosis variable no es abundante. Sin embargo, existen algunos estudios que indican variabilidad espacial en la respuesta de los cultivos a la aplicación de S según ciertos atributos del paisaje y/o suelo. Por ejemplo, en un trabajo realizado por la Universidad de Minnesota en EE.UU. se determinó, a través de ensayos en franja atravesando la variabilidad espacial de cuatro lotes, que el cultivo de maíz respondía significativamente al agregado de S cuando el nivel de materia orgánica del suelo era menor a 2%, pero la probabilidad de respuesta bajaba en el rango de materia orgánica de 2% a 4%, para hacerse nula a valores de materia orgánica superiores a 4% (Kaiser et al., 2010). En este estudio se concluyó que la aplicación variable de S podría incrementar la rentabilidad de la fertilización azufrada en regiones con marcada variabilidad espacial. En la Argentina el manejo del S generalmente se hace en combinación con el P o N por lo que frecuentemente resulta complejo hacer coincidir los criterios sobre los cuales basar la fertilización variable.

El manejo de enmiendas básicas (encalado) con dosis variable es otra tecnología con gran potencial en la Argentina. Como es ampliamente conocido, la agricultura intensiva está provocando un paulatino incremento de los niveles de acidez de los suelos (Sainz Rozas et al., 2010) por lo que es probable que empiecen a observarse respuestas al encalado en cultivos agrícolas de forma más generalizadas como las reportadas en otras regiones (Pagani y Mallarino, 2015). En este sentido, es esperable que los requerimientos de encalado varíen espacialmente dentro de lotes de producción con heterogeneidad espacial en el pH del suelo, su capacidad buffer y/o potencial de rendimiento (asociado a exportación de bases).

De la misma manera, existen algunas experiencias en producción que señalan ventajas de la corrección de suelos sódicos mediante el enyesado en planteos agrícolas y ganaderos. Por esta razón, y teniendo en cuenta la heterogeneidad de la distribución del sodio dentro de los lotes, el enyesado con dosis variable sería la mejor forma de abordar el problema. Herramientas de caracterización ambiental como la CEa han demostrado ser de alta utilidad debido a que presenta una alta correlación con la salinidad

del suelo (Williams y Baker, 1982).

La información expuesta en esta sección, representa algunos ejemplos de cómo el uso de la tecnología de aplicación variable se está expandiendo a otros nutrientes y enmiendas. En el futuro se espera que el uso de estas herramientas también se haga extensivo a otros nutrientes y enmiendas en la medida que se demuestre un beneficio concreto por su implementación.

Conclusión

Por lo expuesto en este resumen, queda claro que el manejo sitio-específico de nutrientes tiene la potencialidad de aumentar la eficiencia de uso de nutrientes, los rendimientos de los cultivos y la rentabilidad del productor, respecto al manejo convencional. A su vez, se presenta como una herramienta efectiva para minimizar los problemas de contaminación ambiental asociados a la fertilización de cultivos. No obstante, también es evidente que la implementación de esta estrategia de manejo requiere de mayor inversión, capacitación y laboriosidad, respecto al manejo de nutrientes convencional. Además, es importante destacar que la conveniencia de un planteo de manejo de nutrientes sitio-específico no es uniforme a través de todas las condiciones de producción, si no que varía entre regiones, lotes, cultivos y productores. Sin embargo, considerando la extensa variabilidad espacial de las características edáficas, en la mayoría de los lotes de producción es intuitivo que un manejo nutricional que permita contemplar dicha variabilidad presente ventajas sobre un manejo espacialmente rígido. En la actualidad se cuenta con la tecnología para maximizar las ventajas productivas asociadas a un manejo de nutrientes sitio-específico y la investigación a nivel nacional va paulatinamente cubriendo esta demanda de información.

Bibliografía

- Arana, E.D. 2018. Manejo sitio-específico de nitrógeno para el cultivo de maíz en el sudeste bonaerense. Tesis Magister Scientiae, FCA-UNMP. Mayo 2018.
- Arnall, D. B. A. P. Mallarino, M. D. Ruark, G. E. Varvel, J. B. Solie, M. L. Stone, J. L. Mullock, R. K. Taylor y W. R. Raun. 2013. Relationship between grain crop yield potential and nitrogen response. *Agron. J.* 105:1335–1344.
- Basso, B., B. Dumont, D. Cammarano, A. Pezzuolo, y F. Marinello, L. Sartori. 20016. Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen

- fertilization in a nitrate vulnerable zone. *Sci. Total Environ.* 545-546:227-35.
- Correndo, A.** 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. Tesis M.S. EPG FAUBA. Julio 2018.
- Echeverría H. y F. García.** 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico No. 149. EEA INTA Balcarce.
- Ferguson, R., A. Dobermann, y J. Schepers.** 2007. Site-specific nitrogen management for irrigated corn. University of Nebraska extension publication, EC163. University of Nebraska-Lincoln.
- Franzen, W.D., y T.R. Peck.** 1995. Field soil sampling density for variable rate fertilization. *J. Prod. Agric.* 8:568-574.
- Franzen, D., Reitmeier, L., Giles, J. y A. Cattanach.** 1998. "Aerial photography and satellite imagery to detect deep soil nitrogen levels in potato and sugar beet," En: Robert, P., Rust, R. and W. Larson, eds., *Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture*. St. Paul, MN, July 19-22, 1998. (ASA-CSSASSSA, Madison, Wisconsin, 1999), p. 281-290.
- Gregoret, M.C., M. Díaz Zorita, J. Dardanelli, y R. G. Bongiovanni.** 2011. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. *Precis. Agric.* 12:831-849.
- Gutierrez Boem, F.H. y F. Salvagiotti.** 2014. Soja. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) 'Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos', 2ª ed., Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, pp. 479-508, ISBN 978-987-521-565-8.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson.** 2005. Soil fertility and fertilizers. 7th ed. Prentice Hall, Englewood Cliff s, NJ. p. 515.
- Kaiser, D.E., J.A. Lamb y K. Kim.** 2010. Response to starter applied sulfur in combination with nitrogen and phosphorus across a landscape. p.66-73 En. *Proc. 40th annual North Central Extension Industry Soil Fertility Conference*. Nov. 17-18 Des Moines, IA.
- Kravchenko, A.N. y D.G. Bullock.** 2000. Correlation of grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92:75-83.
- Lauzon, J. D., I. P. O'Halloran, D. J. Fallow, A. P. von Bertoldi, y D. Aspinall.** 2005. Spatial variability of soil test phosphorus, potassium, and pH of Ontario soils. *Agron. J.* 97:524-532.
- Lory, J.A. y P.C. Scharf.** 2003. Yield goal versus delta yield for predicting fertilizer nitrogen need in corn. *Agron J.* 95: 994-999.
- Mallarino, A.P. y D.J. Wittry.** 1998. Soil sampling strategies for variable rate P and K fertilization and liming. p. 251-256. En *The Integrated Crop Management Conference. Proceedings*. Nov. 17-18, 1998. Iowa State Univ. Extension, Ames.
- Mallarino, A.P., E.S. Oyarzabal y P.N. Hinz.** 1999. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. *Precis. Agric.* 1:15-25.
- Mallarino, A.P. y D.J. Wittry.** 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precis. Agric.* 5:131-144.
- Mamo, M., G.L. Malzer, D.J. Mulla, D.R. Huggins y J. Strock.** 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agron. J.* 95:958-964.
- Melchiori, R.J.M., S.M. Albarenque y A.C. Kemerer.** 2018. Evolución y cambios en la adopción de la agricultura de precisión en Argentina. En: 17° Curso Internacional de Agricultura y Ganadería de Precisión. INTA Manfredi, Córdoba.
- Mulla, D.J. y J.S. Schepers.** 1997. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. p. 1-18. En F.J. Pierce, and E.J. Sadler (ed.) *The state of sitespecific management for agriculture*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Pagani, A. y A.P. Mallarino.** 2015. On-farm evaluation of corn and soybean grain yield and soil pH responses to liming. *Agron. J.* 107(1): 71-82.
- Peralta, N., J.L. Costa, M.C. Franco y M. Balzarini.** 2013. Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo. *Interciencia.* 38:418.
- Puntel, L.A., A. Pagani y S.V. Archonhoulis.** 2019. Development of a nitrogen recommendation tool for corn considering static and dynamic variables. *Eur. J. Agron.* 105:189-199.
- Raun, W.R., J.B. Solie y M.L. Stone.** 2010. Independence of yield potential and crop nitrogen response. *Precis. Agric.* 12:508-518.
- Sainz Rozas, H., H. Echeverría y H. Angelini.** 2010. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de las regiones Pampeana y extrapampeana de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 2:1-7. IPNI.
- Sawyer, J., E. Nafziger, G. Randall, L. Bundy, G. Rehm y B. Joern.** 2006. Concepts and rationale for regional nitrogen rate guidelines for corn. *Publ. PM2015*, Iowa State Univ. Extension, Ames, IA.
- Scharf, P.C., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, J.G. Davis, V.C. Hubbard y J.A. Lory.** 2005. Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agron. J.* 97(2): 452-461.
- Tellería, M.G., F. H. Gutiérrez-Boem y G.N. Ferraris.** 2016. Respuesta del cultivo de maíz a la aplicación anticipada de fósforo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 22:20-24.
- Wibawa, W.D., D.L. Dluclu, L.J., Swenson, D.G. Hopkins y W.C. Dahnke.** 1993. Variable fertilizer application based on yield goal, soil fertility and soil map unit. *J. Prod. Agric.* 6: 225-261.
- Williams, B.G. y G.C. Baker.** 1982. An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soil salinity hazards. *Aust. J. Soil Res.* 20:107-118.
- Wortmann, C., C. Shapiro, T. Shaver y M. Mainz.** 2018. High soil test phosphorus effect on corn yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 102:964- 971. ◀