



Simposio Fertilidad 2017

Más allá de
la próxima
cosecha

Resúmenes de Conferencias y Posters

17 Y 18 DE MAYO
CENTRO DE CONVENCIONES
METROPOLITANO
ROSARIO, SANTA FE, ARGENTINA



web LACS.IPNI.NET

@IPNIcs



FERTILIZAR.ORG.AR web

@FertilizarAC





Simposio Fertilidad 2017

Más allá de
la próxima
cosecha

Más allá de la próxima cosecha

El Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI), Programa Latinoamérica Cono Sur, y la Asociación Civil FERTILIZAR tienen el agrado de darles la bienvenida al Simposio “Fertilidad 2017: “Más allá de la próxima cosecha”. Como en ocasiones anteriores, nos acompañan instituciones y organizaciones afines a las cuales les estamos profundamente agradecidas: la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS), la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la Región Sur de Santa Fe de los grupos CREA, la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario (UNR), la Fundación Producir Conservando, y la Red de Buenas Prácticas Agrícolas.

El Simposio Fertilidad 2017 busca reforzar conceptos y conocimientos, mostrar y discutir la información más reciente y plantear necesidades e interrogantes de cara al futuro. El concepto de “Nutrición Integral de los Sistemas de Producción” es central a nuestra propuesta. La historia de manejo de un lote incide en los resultados del próximo cultivo y también repercute en los siguientes, lo que hacemos en un lote impacta en toda una cuenca, y lo que producimos en nuestro establecimiento contribuye a una cadena de producción económica y social. Abordamos los tres ejes de la sustentabilidad: Ambiental, Económica y Social.

Los paneles de presentaciones son los siguientes:

- ✓ Fertilización: Presente y Futuro
- ✓ Rotaciones y nutrición: Buscando una producción sustentable
- ✓ Manejo por ambientes ¿cómo estamos? ¿dónde vamos?
- ✓ Novedades en fertilización: Contame en 15´
- ✓ Nutrición de Cultivos para Rendimiento y Calidad
- ✓ El sistema de producción

Asimismo, se presentan una serie de posters con resultados relevantes de distintas investigaciones realizadas en los últimos años en la región. Los resúmenes escritos de las presentaciones de los paneles y de los posters se incluyen en esta publicación.

Las dos jornadas de trabajo nos permitirán intercambiar información y experiencias con distinguidos profesionales nacionales y extranjeros que nos presentarán su visión sobre el rol de la nutrición de cultivos en la búsqueda de una agricultura más eficiente y sustentable. IPNI Cono Sur y Fertilizar A.C. agradecen muy especialmente la participación de los disertantes de AACREA, CONICET, CSIRO-University of Adelaide (Australia), INTA, Kansas State University (EE.UU.), Universidad Nacional de Mar del Plata, y la actividad privada.

Rosario, 17 de Mayo de 2017

Dr. Fernando O. García
Director Regional, IPNI Cono Sur
fgarcia@ipni.net

Ing. Agr. María Fernanda González Sanjuan
Gerente Ejecutivo, Fertilizar A.C
mfgonzalez@fertilizar.org.ar

ÍNDICE		
CONFERENCIA	AUTOR	PÁG.
Los desafíos de la agricultura. La nutrición de los cultivos.	Andrade Fernando H.	5
Rotaciones de cultivos bajo siembra directa para el sudoeste chaqueño	Sauer Mariana Verónica y Alejandra Andreo	11
Rotaciones de cultivo bajo siembra directa ¿Secuestro de carbono asegurado?	Irizar Alicia, L. Milesi Delaye, y A. Andriulo	19
Importancia de las gramíneas en secuencias agrícolas con alta incidencia de oleaginosas en la región semiárida pampeana	Fernández Romina, D. Fernández, I. Frasier, M. Uhaldegaray, A. Oderiz, E. Sherger y A. Quiroga	23
Vuelven las pasturas: Manejo y fertilización para nuevos modelos ganaderos	Marino María Alejandra	26
Nutrición intensiva para planteos ganaderos intensivos	Duarte Gustavo y Valeria Parra	37
Manejo de ambientes: Sudeste de Buenos Aires	Calviño Pablo	41
Ambientes del centro de Santa Fe, ¿vale la pena el manejo diferenciado?	López Gustavo y Maximiliano Finello	44
Manejo diferencial por ambientes en suelos clase I y II del sudeste de Córdoba: Una visión práctica	Uranga Máximo	51
Zinc en maíz: ¿Cuándo, cuánto y cómo fertilizar?	Barbieri Pablo	55
Micronutrientes en región pampeana argentina: Diagnóstico de carencias y tecnología de aplicación	Ferraris Gustavo	61
Los Cultivos de Cobertura como Alternativa en el Sistema de Producción Agrícola	Permingeat Franco, V. Loza, A. Rovea y R. Pozzi	68
Suelos Compactados: ¿Ahora qué hago?	Gerster Guillermo y Silvina Bacigaluppo	77
Microrganismos PGPM (Plant Growth Promoting Microorganisms) Solubilizadores de Fósforo: Importancia Agronómica e Impacto Productivo	González Anta Gustavo	79
Impacto Económico de Estrategias de Fertilización de Cultivos	Grasso Andrés	83
Brechas de rendimiento en soja: Rol de la Nutrición en los Sistemas Productivos	Ciampitti Ignacio A., M. Stewart, F. Salvaggiotti, F.O. García, E. Francisco y G.R. Balboa	87
Trigo, apuntando a rendimiento y calidad	Bassi Jorge	92
Manejo de la nutrición de trigo en la región de la pampa arenosa atendiendo a rendimiento y calidad	Brambilla Cristian G.A. Duarte y M. Díaz-Zorita	94
El Cultivo de Trigo y Cebada en el Norte de Buenos Aires	Ermacora Matias	97
Pautas de manejo de la fertilización de trigo y cebada	Zamora Martin y Guillermo Pugliese	101
¿Por qué no fertilizamos cómo debemos? De la teoría a la práctica, de la ciencia al lote	Bert Federico	105
Modelos integrados de recomendación de fertilización en la región pampeana	Diaz Zorita Martin	108
POSTER	AUTOR	PÁG.
Productividad del cultivo de maíz en la región semiárida pampeana: eficiencia de uso de agua y nitrógeno	Alvarez C. y colaboradores	114
Cambios en la capacidad de mineralización de nitrógeno de los suelos pampeanos relacionados al uso agrícola	Alvarez R. y colaboradores	119
Evaluación del aporte de una fracción orgánica de fósforo del suelo para predecir la respuesta de soja a la fertilización	Applehans S. y colaboradores	123
Fertilización nitrogenada con dosis variable en el Sudeste Bonaerense ¿Dónde se justifica?	Arana E. y A. Pagani	130

POSTER	AUTOR	PÁG.
Fertilización potásica en cultivos agrícolas de Uruguay	Barbazan M. y colaboradores	138
Importancia de la interacción nitrógeno-densidad en la dosificación de N	Cerliani C. y colaboradores	142
Conocer la variabilidad espacial para optimizar el muestreo: Ejemplos en Pampa Arenosa y Pampa Ondulada	Ciarlo E. y colaboradores	148
Fertilización nitrogenada en agropiro alargado en función de zonas de manejo delimitadas mediante la conductividad eléctrica aparente	Cicore P. y colaboradores	157
Tendencias en los niveles de fósforo disponible, carbono orgánico y pH de los suelos de San Luis	Colazo J. C. y colaboradores	164
Sistema de soporte para la recomendación de fertilización fosfatada en pasturas	Cuadro R. Y colaboradores	167
¿Podemos mejorar el manejo de nitrógeno en girasol?	Diovisalvi N. y colaboradores	171
Integrando estrategias de manejo de cultivo y fertilización para reducir las brechas de rendimiento en soja en región pampeana	Enrico J. M. y colaboradores	175
Partición de la fertilización nitrogenada en trigo: estrategia para lograr altos rendimientos con calidad?	Ferraris G. y M. Toribio	181
Aplicación variable de nitrógeno en maíz ¿Qué estamos aprendiendo en el Noroeste Bonaerense?	Girón P. y A. Pagani	184
Respuesta a la fertilización con N según cultivos invernales previos en una secuencia Maíz tardío-Trigo	Kehoe E. y colaboradores	193
Intensificación + Nutrición = Eficiencia de uso de recursos + Productividad	Madias A. y colaboradores	197
Efecto de la aplicación de estiércol vacuno sobre un cultivo de cebada	Minoldo G. y colaboradores	202
Interpretación de niveles de fósforo y de zinc extractables de suelos agrícolas según su variabilidad dentro de los lotes	Navarro M. y colaboradores	207
¿Podemos diagnosticar nitrógeno durante el ciclo del trigo en el norte de la región pampeana?	Orcellet J. M. y colaboradores	211
Actualización del umbral de Fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos	Pautasso J. M. y P. A. Barbagelata	217
Aporte nutricional de los cultivos de cobertura en nuestros sistemas productivos de granos	Robledo G. y colaboradores	222
Emisiones de gases de efecto invernadero con fertilización variable de N a escala intralote	Sanahuja M. E. y colaboradores	226
Respuesta a la fertilización nitrogenada en cultivo de sorgo granífero en el sudoeste chaqueño	Sauer M. V. y colaboradores	230
Condición hidrofísica y química de un suelo Haplustol éntico tratado con zeolita y residuos de feed lot	Torres Duggan M. y colaboradores	233

Los desafíos de la agricultura. La nutrición de los cultivos.

Fernando H. Andrade

INTA Balcarce, Facultad de Ciencias Agrarias UNMP, CONICET

Balcarce, Buenos Aires, Argentina

Contacto: andrade.fernando@inta.gob.ar

Introducción

La agricultura y las actividades humanas en general ocasionan una extralimitación en el uso de los recursos naturales y de la capacidad bioproductiva del planeta. Una extralimitación en el uso de los recursos surge de la convergencia de un rápido crecimiento de la población y de sus actividades económicas, de un límite en la disponibilidad de dichos recursos y de un desfase en la percepción del problema que causa retrasos en la aplicación de las medidas adecuadas (Meadows et al., 2012).

Desde el advenimiento de la agricultura, la producción agrícola aumentó siguiendo el incremento en la demanda de alimentos por parte de la población. Este notable incremento de la producción se produjo principalmente a través de la expansión de la superficie cultivada hasta mediados del siglo XX y del aumento en la intensidad de uso de insumos externos a partir de mediados del siglo pasado. Esto resultó en procesos de degradación del suelo, de pérdida de hábitats y de contaminación por la elevada utilización de insumos, entre los que se destacan los fertilizantes, los plaguicidas y la energía fósil. (Bourne, 2009; Gurian Sherman, 2009; Bringezu et al., 2010; Encíclica Laudato Si, 2015). Estos daños, sumados al cambio climático, amenazan la futura producción de alimentos.

La producción de alimentos es responsable de buena parte del impacto ambiental que las actividades antropogénicas tienen sobre los ecosistemas por sus contribuciones a la emisión de gases de efecto invernadero, por la pérdida de biodiversidad y la contaminación, por el uso del agua de ríos, lagos y acuíferos para riego, por el requerimiento de tierras, por la remoción de nitrógeno del aire y por los aportes al flujo de P y de otros nutrientes a aguas superficiales y a los océanos (Rockstrom et al., 2009).

Se espera un crecimiento de alrededor de 70% en la demanda de productos agrícolas entre los años 2010 y 2050 debido, principalmente, al crecimiento poblacional y al aumento de la calidad de la dieta por incrementos en el poder

adquisitivo (Andrade, 2016a).

El gran desafío que hoy enfrentamos es satisfacer las futuras demandas de productos agrícolas y reducir simultáneamente el impacto ambiental.

La fertilización de los cultivos

La fertilización de los cultivos puede contribuir a satisfacer las crecientes demandas de productos agrícolas. La proporción de los rendimientos atribuibles al uso de fertilizantes minerales comerciales ronda el 50% en EE.UU. y Europa e incluso más en algunos países tropicales (Stewart et al., 2005). En muchos países de regiones menos desarrolladas, especialmente de África y América Latina, el uso de fertilizantes es bajo (De Janvry, 2010; FAO, 2014), siendo este factor una importante causa de los bajos rendimientos. Por lo tanto, la fertilización puede aumentar sustancialmente los rendimientos de los cultivos en los países en los que aún no se generalizó el uso de esta práctica. No obstante, por lo anteriormente expresado, esta tecnología de insumos debe ser cuidadosamente considerada y adecuadamente aplicada ya que el uso de fertilizantes ha alterado el flujo de los elementos en la naturaleza (ciclos biogeoquímicos) y causado contaminación (Sutton et al., 2013).

Globalmente se aplican cerca de 200 millones de t de fertilizantes nitrogenados, fosforados y potásicos (medidas como N, P₂O₅ y K₂O) siendo China, India, EE.UU. y Brasil, en orden decreciente, los principales consumidores. Argentina consume menos del 1% del volumen global de fertilizantes (García y González San Juan, 2015). En China, India y algunas regiones de EE.UU. y Europa se aplican fertilizantes en exceso produciendo contaminación, mientras que en otros países (Argentina, por ejemplo), los balances de nutrientes son negativos, lo que contribuye a la degradación de los suelos por pérdida de fertilidad (Sutton et al., 2013; García y Díaz Zorita, 2015). La adición consistente a los suelos de nitrógeno (N) y de fósforo (P) a través de la fer-

tilización presenta eficiencias de uso muy bajas (Sutton et al., 2013) causando contaminación e ineficiencias energéticas. Globalmente, sólo el 47% del N reactivo aplicado actualmente como fertilizante es convertido a productos cosechables (Lassaleta et al., 2014).

La agricultura alteró considerablemente el flujo de N_2 atmosférico a N reactivo y el flujo de P a los océanos. La elaboración de fertilizantes nitrogenados para la agricultura y la fijación biológica por los cultivos leguminosos son las principales vías de producción de compuestos nitrogenados reactivos a partir de la remoción de N_2 atmosférico (Galloway et al., 2003; Rockstrom et al., 2009a). Los umbrales de seguridad de este proceso han sido superados ampliamente. Entre las alteraciones que origina (Sutton et al., 2013) resaltan i) la acumulación de nitratos en las napas (Hallberg, 1987; Aparicio et al., 2008) con sus efectos en la salud, ii) las emisiones de amonio y principalmente óxido nitroso (N_2O) a la atmósfera (Mosier et al., 1998), gas con fuerte efecto invernadero y iii) los flujos de N a los ríos, lagos y mares. Además, la elaboración de fertilizantes nitrogenados es muy costosa en cuanto a utilización de energía fósil y emisiones de gases de efecto invernadero (Gellings y Parmenter, 2004).

La agricultura y el posterior consumo son el principal determinante del flujo de P a los océanos (Rockstrom et al., 2009a) a través de la extracción del nutriente del suelo y de los fertilizantes por parte de los cultivos y de la producción de desechos por los humanos y animales. El P también se pierde desde los suelos a las aguas por erosión, escurrimiento superficial y, en menor medida, lixiviación (Sims et al., 1998; Sharpley et al., 2013).

Los flujos de N, P y otros nutrientes a los ríos, lagos, embalses y mares producen eutrofización, proceso que altera la estructura y funcionalidad de los ecosistemas con la consecuente pérdida de biodiversidad.

Uso eficiente de recursos e insumos

En la literatura internacional, muchos expertos hoy coinciden en que la producción de alimentos debe ser incrementada aumentando los rendimientos por unidad de superficie en las actuales áreas agrícolas, minimizando o revirtiendo el impacto ambiental, y utilizando más eficientemente los recursos e insumos (Ikerd, 1990; Postel, 1998; Foley et al., 2011; Garnett et al., 2013; Smith,

2013; Rosegrant et al., 2014).

Para esto es necesario un profundo conocimiento de los factores intervinientes en cada sistema de producción, de cómo las tecnologías específicas que se desarrollen para cada situación los afectan, y de cómo se pueden revertir posibles efectos negativos.

El uso eficiente de recursos e insumos, es un aspecto de alta relevancia para el manejo agronómico porque tiene implicancias en la rentabilidad de los cultivos y, sobre todo, en la calidad del ambiente.

La eficiencia de uso de un insumo generalmente disminuye en respuesta al incremento en la disponibilidad del mismo siguiendo la ley de rendimientos decrecientes (Ferreira, 2015; Abbate y Andrade, 2015). Por lo tanto, aumentar la producción sólo en base a la aplicación de un insumo generalmente resulta en reducciones en su eficiencia de uso.

Tecnologías de procesos y conocimientos pueden resultar en saltos de curva en la relación entre el rendimiento del cultivo y el nivel de insumos/recursos disponibles que se traducen en i) mejor adaptación de los cultivos a ambientes actuales y futuros (cambio climático), ii) mejoras en eficiencia de uso de recursos e insumos, y/o iii) reducciones de la contaminación ambiental.

Dichas tecnologías pueden entonces conducir i) a la reducción en el uso de insumos sin mermas de rendimiento, ii) al aumento de la producción manteniendo los niveles de uso de insumos y, cuando sea necesario, iii) a incrementos en la aplicación de insumos sin reducir la eficiencia de uso de los mismos. La reducción en el uso de insumos conlleva menores riesgos de contaminación ambiental mientras que el aumento de la producción a igual nivel de aplicación de insumos reduce las huellas por unidad producida. Por otro lado, con mayores volúmenes aplicados, el aumento de la eficiencia de uso de insumos no garantiza por sí mismo menor contaminación, meta que se debe lograr a través de buenas prácticas agrícolas (Jaime et al., 2013).

Entre estas tecnologías intensivas en conocimiento que producen saltos de curva se destacan el mejoramiento genético, la biotecnología, el manejo de cultivos con bases ecofisiológicas, la agricultura por ambiente, la agricultura de precisión, el manejo integrado de organismos perjudiciales, las buenas prácticas de fertilización y del riego, las estrategias de intensificación ecológica, etc.

Eficiencia de uso de los fertilizantes

La eficiencia de uso de un nutriente puede mejorarse aumentando la eficiencia de recuperación del nutriente disponible y/o la eficiencia de uso del nutriente absorbido (Andrade, 2009).

El mejoramiento genético de los cultivos ha aumentado la eficiencia fisiológica de N, P y de nutrientes en general, principalmente a través de un mayor índice de cosecha (Ferreira, 2015; Abbate y Andrade, 2015).

La eliminación por mejoramiento genético y/o por manejo de cultivos de factores limitantes para el crecimiento distintos de la nutrición, como deficiencias hídricas, temperaturas no óptimas, adversidades bióticas, prácticas de manejo inadecuadas, etc. puede aumentar la eficiencia de uso del nutriente absorbido, siempre que dichas limitaciones afecten el rendimiento en mayor proporción que la absorción de nutrientes.

La elección del genotipo puede tener un importante efecto en la eficiencia de recuperación ya que se observa variabilidad en desarrollo y morfología del sistema radical y en capacidad de absorber y transportar nutrientes (Fageria y Baligar, 2005; Hirel et al., 2007). Por lo tanto, la eficiencia de recuperación del nutriente disponible puede ser incrementada por el mejoramiento genético.

El manejo del cultivo y el del fertilizante tienen un efecto importante en la eficiencia de recuperación de nutrientes (Cassman et al., 2003; Doberman, 2007; Andrade, 2009; Echeverría y García, 2015). El manejo responsable de los fertilizantes requiere de la aplicación de la fuente correcta, a la dosis adecuada, en el momento adecuado y en el lugar correcto (Manejo de los 4 Requisitos, 4R) (IPNI, 2012; UNEP, 2014). La eficiencia de recuperación tiende a disminuir con el incremento en la disponibilidad del nutriente y cuanto mayor es la oferta en relación con la demanda del cultivo (Cassman et al., 2002; Barbieri et al., 2008). De aquí surge la importancia de los análisis de suelo y planta para evaluar la disponibilidad de nutrientes y los requerimientos de fertilizante.

Una mayor sincronía entre los requerimientos por parte del cultivo y la oferta resulta en una menor exposición del N a los mecanismos de pérdidas y, por lo tanto, en una mayor recuperación. En este sentido, la aplicación del fertilizante en estadio 6 hojas del maíz y en macollaje del trigo mejoró la eficiencia de recuperación de ni-

trógeno en comparación con la fertilización en el momento de la siembra (Sainz Rozas et al., 1997; Melaj et al., 2003). Además, el fraccionamiento de la dosis, la localización, la fuente de fertilizante nitrogenado, la aplicación de fertilizantes con el riego, y la utilización de fertilizantes de liberación lenta son otras prácticas que pueden resultar en una mayor eficiencia de recuperación del nutriente, aunque estos efectos interactúan fuertemente con el ambiente (Fageria y Baligar, 2005; IPNI, 2012).

Además, prácticas de manejo del cultivo como la siembra de maíz con mayor densidad de plantas y con menor espaciamiento entre hileras incrementan la eficiencia de recuperación de N (Barbieri et al., 2008; Pietrobón, 2012). Esto se debería principalmente a una más rápida y mayor exploración del suelo por las raíces con este sistema de cultivo.

Una mayor precisión en los pronósticos climáticos, el diagnóstico de la fertilidad de los suelos, la estimación del agua disponible en el momento de la siembra, el monitoreo del estado de las plantas y del ambiente a lo largo de la estación de crecimiento y la evaluación de las condiciones particulares de cada microambiente del potrero posibilitará ajustes del manejo del cultivo, de la fertilización, y de otras prácticas con vistas a una mayor producción y a un uso más eficiente de los recursos e insumos.

Finalmente, técnicas de intensificación ecológica como la recirculación de nutrientes, los abonos verdes, y los abonos orgánicos contribuyen a una adecuada nutrición de los cultivos reduciendo el impacto ambiental (Tifton, 2013).

Consideraciones finales

La transformación de la agricultura requiere como primeros pasos reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero, frenar las pérdidas de tierra cultivable, biodiversidad, hábitats y servicios ecosistémicos, disminuir el consumo no sustentable del agua especialmente donde este recurso es demandado para otros usos, frenar la contaminación del agua, suelo, aire y alimentos con productos químicos, y mejorar la eficiencia de uso de recursos e insumos, entre otras acciones (Viglizzo et al., 2001; Foley et al., 2011).

Entonces, los aumentos de la producción no pueden basarse principalmente en la expansión de la superficie cultivada como ocurrió en el

siglo XIX y primera mitad del siglo XX, ya que resulta en pérdida de biodiversidad, emisiones de gases de efecto invernadero y exposición de tierras frágiles a procesos de degradación. En consecuencia, los mayores esfuerzos para incrementar la producción deben enfocarse en la intensificación del uso de la tierra. Pero esta no debe basarse primariamente en mayores usos de insumos como sucedió durante la segunda mitad del siglo XX, ya que producen contaminación y degradación del ambiente y agotamiento de recursos hídricos y de fuentes de fertilizantes minerales. Por el contrario, deben centrarse en tecnologías de procesos y de conocimientos (Satorre, 2004), que permitan detener o revertir el deterioro de los suelos y la contaminación química y hacer un uso más racional y eficiente de los recursos e insumos.

Para alcanzar los objetivos de producir los alimentos requeridos y reducir el impacto ambiental, la futura manifestación de nuestra capacidad creativa e innovadora deberá ser adaptar, transferir y desarrollar tecnologías que resulten en mayores producciones, mejores eficiencias de uso de recursos e insumos y menor impacto ambiental (Huang et al., 2002; Trewavas, 2002; Tilman et al., 2002; Toenniessen, 2003; 2008; Tester y Langridge, 2010; Phillips, 2010; Fedoroff et al., 2010; Hall y Richards, 2013; Tittonell, 2013; Rosegrant et al., 2014; EU, 2015).

Las prácticas, técnicas o estrategias descritas en el presente escrito deben ser consideradas dentro de un sistema de producción atendiendo a sus efectos sobre la productividad, el suelo, el ambiente, la dinámica del agua y los nutrientes, las adversidades bióticas, etc. Deberán también considerarse las interacciones y posibles efectos compensatorios entre dichas prácticas y sus interacciones con el ambiente (Andrade, 2016b; Sadras y Denison, 2016). Este abordaje es poco frecuente en la literatura internacional debido a las complejas interacciones existentes entre los componentes del sistema y a las dificultades de su interpretación (Andrade, 2016b).

Referencias

Abbate P. y F. Andrade. 2015. Los nutrientes del suelo y la determinación del rendimiento de los cultivos de granos. Capítulo 6 (p 155-185) en H. Echeverría y F. García (Eds): Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ediciones INTA.

Andrade F. 2009. Eficiencia de uso de los nutrientes y rol de la nutrición en la producción de los cultivos.

P 124-130 en "Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de los cultivos" F. García e Ignacio Ciampitti Eds. Actas Simposio Fertilidad. IPNI, Fertilizar. Rosario, Mayo 2009.

Andrade F. 2016a. Los desafíos de la agricultura. IPNI-INTA. 136p.

Andrade J. 2016b. Intensificación de los sistemas de producción de granos en la región pampeana: productividad y uso de recursos. Tesis doctoral. Escuela para Graduados Facultad de Agronomía UBA. 146 pp.

Aparicio V., J. Costa y M. Zamora. 2008. Nitrate leaching assessment in a long-term experiment under supplementary irrigation in humid Argentina. *Agricultural Water Management* 95: 1361-1372.

Barbieri P, H. Sainz Rozas, H. Echeverría y F. Andrade. 2008. Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. *Agron. J.* 100: 1094-1100.

Bourne J. 2009. El fin de la abundancia. *National geographic* 439-59?./ngenespanol.com/2009/.../el-fin-de-la-abundancia-la-crisis-alimentaria-mundial-articulos.

Bringezu S., M. O'Brien, W. Pengue, M. Swilling y L. Kauppi. 2010. Assessing global land use and soil management for sustainable resource policies. Scoping Paper. International Panel for Sustainable Resource Management. UNEP.

Cassman K., A. Doberman y D. Walters. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency and nitrogen management. *Ambio* 2: 132-140.

Cassman K., A. Doberman, D. Walters y H. Yang. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28: 315-358. citar

De Janvry A. 2010. Agriculture for development: new paradigm and options for success. *Agricultural Economics* 41 S1: 17-36.

Doberman A. 2007. Nutrient use efficiency. Measurement and management. IFA. International workshop on fertilizar best management practices. 7-9 mayo 2007. Bruselas, Bélgica.

Echeverría H. y F. García. 2015. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ediciones INTA. 904 p.

Encíclica Laudato SI. 2015. Carta Encíclica del Padre Francisco sobre el cuidado de la casa común. La Santa Sede. Libreria Editrice Vaticana. 87 pp.

EU. 2015. The role of research in global food and nutrition security. Expo 2015 European Union Scientific Steering Committee. Fischler, F. Chairman, doi: 10.2788/521449.

Fageria N. y V. Baligar. 2005 Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy* 88: 97-185.

FAO. 2014. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. FAO Statistical Database. <<http://www.fao.org/>>.

Fedoroff N., D. Battisti, R. Beachy, P. Cooper, D. Fischhoff, C. Hodges, V. Knauf, D. Lobell, B. Mazur, D. Molden, M. Reynolds, P. Ronald, M. Rosegrant, P. San-

- chez, A. Vonshak y J. Zhu. 2010. Radically Rethinking Agriculture for the 21st Century. *Science* 327: 833-834.
- Ferreira, M. 2015. Efectos del mejoramiento de maíz sobre la eficiencia de uso del nitrógeno (1965-2010). Tesis Magister Scientiae. Univ. Nac. Mar del Plata.
- Foley J., N. Ramankutty, K. Brauman, E. Cassidy, J. Gerber, M. Johnston, N. Mueller, C. O'Connell, D. Ray, P. West, C. Balzer, E. Bennett, S. Carpenter, J. Hill, C. Monfreda, S. Polasky, J. Rockstrom, J. Sheehan, S. Siebert, D. Tilman y D. Zaks. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478: 337-342.
- Galloway J., J. Aber, J. Erisman, S. Seitzinger, R. Howarth, E. Cowling y J. Cosby. 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience* 53: 341-356.
- García F., y M. Díaz-Zorita. 2015. La fertilidad de los suelos y el uso de nutrientes en la producción agrícola extensiva de Argentina. En "El Deterioro del Suelo y del Ambiente de la Argentina" R. Casas y G. Albarracín (eds). Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura, FECIC. CABA, Argentina. 608 p.
- García F. y F. Gonzalez San Juan L. 2015. Consumo de fertilizantes en el mundo y en la Argentina. En "Sostenibilidad de los agrosistemas y uso de fertilizantes". R. Lavado (Ed.) Asociación argentina de Ciencia del Suelo. AACs. Buenos Aires. 270 p.
- Garnett, T., M. Appleby, A. Balmford, I. Bateman, T. Benton, P. Bloomer, B. Burlingame, M. Dawkins, L. Dolan, D. Fraser, M. Herrero, I. Hoffmann, P. Smith, P. Thornton, C. Toulmin, S. Vermeulen y H. Godfray. 2013. Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies. *Science* 341: 33-34.
- Gellings C. y K. Parmenter. 2004. Energy efficiency in fertilizer production and use. In: Efficient use and conservation of energy. C. Gellings y K. Blok Eds. Encyclopedia of life support systems. UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK.
- Gourian Sherman D. 2009. Failure to yield. Evaluating the performance of genetic engineered crops. Union of concerned scientists. USC publications. Cambridge.
- Hall A. y R. Richards. 2013. Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Research* 143: 18-33
- Hallberg G. 1987. Agricultural chemicals in ground water: Extent and implications. *American Journal of Alternative Agriculture* 2: 3-15.
- Hirel B., J. Le Gouis, B. Ney y A. Gallais. 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *Journal of Experimental Botany* 58: 2369-2387.
- Huang J., C. Pray y S. Rozelle. 2002. Enhancing the crops to feed the poor. *Nature* 418: 678-684.
- Ikerd J. 1990. Agriculture's search for sustainability and profitability. *J. Soil Water Cons.* 45: 18-23.
- IPNI. 2012. 4R Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition, (T.W. Bruulsema, P.E. Fixen, G.D. Sulewski eds.), International Plant Nutrition Institute. Norcross, GA, USA.
- Jaime, S., F. Andrade, F. Bedmar, S. Borracci, C. Leonardi, F. Martens, E. Quagnolo, A. Szczesny, G. Tito y M. Vigna. INTA. 2013. Criterios para la gestión de uso de los agroquímicos con un marco de ordenamiento territorial. Cerbas, Balcarce. 50pp.
- Lassaletta L., G. Billen, B. Grizzetti, J. Anglade y J. Garnier. 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9: 1-9.
- Meadows D., J. Randers y D. Meadows. 2012. Los límites del crecimiento. Tauros. Buenos Aires. 424 p.
- Melaj M., H. Echeverría, S. López, G. Studdert, F. Andrade y N. Bárbaro. 2003. Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and no-tillage system. *Ag. Journal* 95: 1525-1531.
- Mosier A., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, S. Seitzinger y O. van Cleemput. 1998. Closing the global N2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52: 225-248.
- Phillips R. 2010. Mobilizing science to break yield barriers. *Crop Sci.* 50: S99-S108.
- Pietrobon M. 2012. Densidad de plantas en el cultivo de maíz y su efecto sobre la eficiencia de uso de nitrógeno. Tesis MSc. Facultad de Ciencias Agrarias UNMP.
- Postel S. 1998. Water for Food Production: Will There Be Enough in 2025? *BioScience* 48: 629-637.
- Rockström J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. Stuart Chapin, E. Lambin, T. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. Corell, V. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen y J. Foley. 2009a. A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472-475.
- Rockström J., M. Falkenmark, L. Karlberg, H. Hoff, S. Rost y D. Gerten. 2009b. Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. *Water resources research* 45. doi: 10.1029/2007WR006767.
- Rosegrant M., J. Koo, N. Cenacchi, C. Ringler, R. Robertson, M. Fisher, C. Cox, K. Garrett, N. Perez y P. Sabbagh. 2014. Food security in a world of natural resource scarcity. The role of agricultural technologies. International Food Policy Research Institute. Washington, DC.
- Sadras V. y R. Denison. 2016. Neither crop genetics nor crop management can be optimised. *Field Crops Res.* 189:75-83.
- Sainz Rozas H., H. Echeverría, F. Andrade y G.A. Studdert. 1997. Efecto del inhibidor de la ureasa y momento de fertilización sobre la absorción de nitrógeno y rendimiento del cultivo de maíz bajo siembra directa. *Rev. Fac. Agron. La Plata.* 102: 129-136.
- Satorre E. 2004. Marco conceptual de la sostenibilidad. Seminario: Sustentabilidad de la producción agrícola. Bs As. JICA-INTA.
- Sharpley A., H. Jarvie, A. Buda, L. May, B. Spears y P.

Kleinman. 2013. Phosphorus legacy: overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. *Journal of Environmental Quality* 42: 1308-1326.

Sims J., R. Simard y B. Joern. 1998. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *Journal of Environmental Quality* 27: 277-293.

Smith P. 2013. Delivering Food Security without Increasing Pressure on Land. *Global Food Security* 2: 18-23.

Stewart W., D. Dobb, A. Johnston y T. Smyth. 2005. *Agron. J.* 97: 1-6.

Sutton M., A. Bleeker, C. Howard, M. Bekunda, B. Grizzetti, W. de Vries, H. van Grinsven, Y. Abrol, T. Adhya, G. Billen, E. Davidson, A. Datta, R. Diaz, J. Erisman, X. Liu, O. Oenema, C. Palm, N. Raghuram, S. Reis, R. Scholz, T. Sims, H. Westhoek y F. Zhang. 2013. Our nutrient world. The challenge to produce more food and energy with less pollution. *Global Overview of Nutrient Management*. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative. GPNM, UNEP, INI. www.unep.org.

Tester M. y P. Langridge. 2010. Breeding Technologies to increase crop production in a changing World. *Science* 327: 818-822.

Tilman D., K. Cassman, P. Matson, R. Naylor y S. Polasky. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418: 671-677.

Tittonell P. 2013. Farming systems ecology. Towards ecological intensification of world agriculture. Wageningen University. 40p.

Toenniessen G., J. O'Toole y J. De Vries. 2003. Advances in plant biotechnology and its adoption in developing countries. *Current Opinion in Plant Biology* 6: 191-198.

Trewavas A. 2002. Malthus foiled again and again. *Nature* 418: 668-670.

UNEP. 2014. Assessing global land use: balancing consumption with sustainable supply. A report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel. S. Bringezu, H. Schütz, W. Pengue, M. O'Brien, F. Garcia, R. Sims, R. Howarth, L. Kauppi, M. Swilling, y J. Herrick. United Nations Environmental Programme. UNEP.

Viglizzo E. 2001. La trampa de Malthus. Agricultura, competitividad y medio ambiente en el siglo XXI. Eudeba. Universidad de Buenos Aires. 190 pp. ●

Rotaciones de cultivos bajo siembra directa para el sudoeste chaqueño

Mariana Verónica Sauer^{1,*} y Alejandra Isabel Andreo²

¹Investigadora de la EEA "Ing. Agr. Emilio Druzianich" INTA Las Breñas. Manejo de Suelos y Fertilidad.

²Investigadora del Laboratorio de Suelos, Agua y Forrajes del I.E.S. Miguel Neme.

*Contacto: sauer.mariana@inta.gov.ar

Introducción

Actualmente, en la Argentina, la mayor parte de los cultivos agrícolas extensivos se implantan bajo el sistema siembra directa (SD) (Derpsch et al., 2010). Algunos de los beneficios más destacados de esta práctica están asociados a la reducción que provoca en la erosión del suelo y a la disminución en los costos de producción. La SD como sistema de producción sustentable tiene en la rotación de cultivos una de las herramientas más importantes y válidas para mejorar el funcionamiento de los agroecosistemas (Manso y Forjan, 2012). Resulta importante conocer cómo funcionan los sistemas en cada situación agroecológica, cómo se afectan los procesos y en que magnitud pueden ser alterados los sistemas para no afectar la capacidad de restauración de sus propiedades y funcionalidad (Studdert, 2012), por ello la utilidad de los ensayos de larga duración (ELD) que varias Instituciones llevan adelante. En INTA funcionan más de 54 ELD que proporcionan información relevante de numerosos parámetros estudiados (físicos, químicos y biológicos). Cuando se pretende ejecutar sistemas de intensificación productiva sostenible en agricultura se deben incluir, entre otros, al sistema de siembra directa y a las rotaciones (García, 2011).

La instalación de cultivos bajo SD resulta ser más compleja y exigente en relación al manejo de los suelos y de los cultivos, requiriendo una programación previa del área a ser utilizada, del análisis del suelo, del uso de correctivos y fertilizantes para mejorar la fertilidad del suelo, de la rotación de cultivos y de los equipamientos adecuados. Todo lo citado anteriormente debe ir acompañado de un buen conocimiento sobre el control integrado de malezas, plagas y enfermedades y de un permanente seguimiento a los cultivos en la finca (Cubilla, 2014).

Por otra parte, la demanda mundial de ali-

mentos, así como de forrajes, fibras y biocombustibles en las últimas décadas, impulsó un decidido aumento en la producción de granos en los países de Sudamérica (González et al., 2016), esto acarreo como consecuencia, la expansión de la frontera agrícola hacia regiones extrapampeanas. La región sudoeste chaqueña es un área de gran importancia agrícola, pero de suelos frágiles, por el origen de su formación predominan los limos. El área de influencia de la EEA INTA Las Breñas cuenta con el 74,6% de la superficie incorporada a la producción primaria, reuniendo 732.206 hectáreas. El principal grupo de cultivos está integrado por las oleaginosas (soja y girasol), seguido por el algodón y los cereales (maíz, trigo y sorgo). La importancia de esta región como productora agrícola se refleja al concentrar el 55.7% del área sembrada con oleaginosas, el 42.7% del área cultivada con cereales y el 30% de la superficie aldononera provincial (Simón, 2008).

Al mismo tiempo, en los últimos años se ha incrementado de manera importante la proporción de la superficie destinada casi exclusivamente al cultivo de soja (Novelli et al., 2011), lo cual puede repercutir negativamente sobre el ambiente, sobre todo en ambientes frágiles como el sudoeste chaqueño. Por ello se debe prestar atención al cuidado del suelo.

La calidad del suelo es definida en términos de sus propiedades químicas, físicas y biológicas, y entre ellas la materia orgánica (MO) es uno de los indicadores de mayor relevancia de la calidad del suelo, así como de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Robinson et al., 1994). Se considera a la MO como la fracción orgánica del suelo, aquella que contiene los residuos de plantas y animales en proceso de descomposición (10-20%), la biomasa microbiana (1-5%) y el humus (50-85%), y no así a los residuos vegetales y animales sin descomponer. La importancia de la MO se fundamenta en su relación con cuantiosas

propiedades del suelo, como las propiedades físicas (densidad, capacidad de retención de agua, agregación y estabilidad de agregados, color y temperatura), las químicas (reserva de nutrientes como nitrógeno, fósforo, azufre y otros, pH, capacidad de intercambio catiónico, poder buffer, formación de quelatos) y las propiedades biológicas (biomasa microbiana, actividad microbiana-respiración, fracciones lábiles de nutrientes). Cada uno de estos parámetros puede servir para monitorear la calidad o salud del suelo.

Los sistemas de SD, la rotación de cultivos y el mantenimiento o incremento de los niveles de fertilidad, aportan su contribución a la estabilización de los contenidos de MO del suelo mediante la incorporación de una elevada cuantía de residuos de buena calidad (Walters et al., 2007; Ferrari et al., 2010). Así, las prácticas de manejo antes mencionadas (SD, rotación de cultivos, y mantenimiento o elevación de los niveles de fertilidad) interactúan entre sí promoviendo la acumulación de MO, condición esta que a su vez mejora las propiedades químicas, físicas y biológicas que determinan la calidad del suelo y la sostenibilidad de los sistemas de producción (García, 2011).

La presencia de restos vegetales en superficie cobra real importancia cuando no se toca más el suelo, ya que los mismos son los encargados de mantener la porosidad, la penetrabilidad, el reciclaje de nutrientes y mejoran la dinámica del agua por mayor infiltración y menor escurrimiento. La MO es también un reservorio temporario de nutrientes en agro ecosistemas que contiene casi todo el N del suelo (98%), como así también del S (aproximadamente 98%), y de un 30 a un 50% del P (Álvarez y Steinbach, 2006a). La MO tiene relación con propiedades físicas del suelo como la susceptibilidad a la compactación (Díaz-Zorita y Grosso 2000; Quiroga et al., 1998), densidad aparente máxima, y estabilidad de agregados (Quiroga, et al., 1998).

Bajo SD, la mineralización se ve enlentecida por la no incorporación de los residuos y la magnitud de este enlentecimiento depende de la cantidad de residuos, del tipo de los mismos, tanto en su forma física (tamaño, densidad y diámetro), como en su composición química (relación Carbono/Nitrógeno) y de las condiciones climáticas por lo que se debe hacer una correcta planificación de los cultivos que participan en la rotación.

Por definición, la rotación de cultivos es la

alternancia regular y ordenada en el cultivo de diferentes especies vegetales en secuencia temporal en una determinada área (Geisler, 1980). No es sólo un cambio de especies, sino que es necesario seleccionar los cultivos respetando sus necesidades y características diferentes, así como su influencia diferenciada sobre el suelo, crecimiento de malezas, desarrollo de enfermedades y plagas, en una secuencia apropiada y práctica que promueva efectos residuales benéficos.

Cuando se planifica una rotación (Arnon, 1972) se debe tener en cuenta la habilidad diferencial de absorber nutrientes de suelo (sistemas radiculares que alcancen diferentes profundidades), alternar especies susceptibles a ciertas enfermedades y plagas con aquellas resistentes, considerar todo efecto positivo o negativo de un cultivo sobre otro (alelopatías, suministro de nutrientes, incremento en materia orgánica, en el sistema radicular, estructura de suelo, microorganismos o humedad residual del suelo). Es fundamental alternar el uso de cultivos que contribuyen con el suelo con aquellos que lo agotan, por ejemplo, incrementar la participación de gramíneas en la rotación que aportan grandes volúmenes de rastrojos y de calidad respecto de una soja. La calidad de estos rastrojos es relevante en el resultado final, destacándose por sus efectos benéficos. El cultivo de maíz y de sorgo son unos de los cultivos con mayores aportes y la soja en la situación inversa, con aporte nulo o negativo. Paralelamente, la relación C/N más alta del rastrojo de maíz determinaría una descomposición más lenta y sería más favorable para la formación de materia orgánica estabilizada en el suelo, presentando nuevamente la soja la situación inversa.

El monitoreo de los componentes orgánicos del suelo constituye una herramienta para evaluar la sustentabilidad física de los agroecosistemas. En la evaluación ambiental de la agricultura a escala regional se cuantifican, por ejemplo, cambios en la reserva de carbono (Viglizzo et al., 2003). Para una investigación prospectiva se realizan ELD que proveen de información para dicho monitoreo, y permiten proyectar situaciones a través de modelos de simulación.

La intensificación de las actividades agrícolas en la mayor parte de las áreas cultivables del país, junto con la expansión del cultivo de soja y el doble cultivo trigo/soja (Darwich, 2003), como el aumento de los rendimientos en los cultivos de maíz y girasol, han acentuado el empobreci-

miento en nutrientes en los suelos, acarreado una pérdida de MO en el horizonte superficial.

Los niveles de MO que tenían los suelos bajo situaciones prístinas, fueron disminuyendo con los años de agricultura en la Pampa Ondulada debido a los menores aportes de residuos, al aumento de la temperatura del suelo y a la destrucción de agregados (Álvarez y Steinbach., 2006b). Esta disminución fue de alrededor del 50% del contenido inicial luego de 80 años de agricultura continua (Andriulo y Cordone, 1998), lo mismo ha ocurrido en la región de estudio, se aprecian disminuciones de contenidos de MO y, aumentos de pH en comparaciones de suelos prístinos con lotes de historial agrícola intensivo (Rojas, 2014).

Evaluar la calidad de los suelos constituye un gran desafío debido a la compleja interacción que existe entre el suelo y las condiciones ambientales, la que a su vez se modifica como resultado de las prácticas de manejo (Ferreras et al., 2014). Si bien la calidad del suelo no se puede medir directamente, pero es factible su evaluación a partir de cambios en los atributos edáficos. Las definiciones más recientes se basan en la multifuncionalidad del suelo y no sólo en un uso específico de este recurso (Karlen et al., 2006; Bhardwaj et al., 2011).

El objetivo del presente trabajo es evaluar los efectos de diferentes rotaciones de cultivos bajo siembra directa sobre las propiedades físico-químicas del suelo, y el comportamiento de cultivos participantes.

Materiales y métodos

El sitio de estudio se encuentra ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria "Ing. Agr. Emilio Druzianich" INTA Las Breñas, situado sobre la Ruta Nacional 89, en el Departamento 9 de Julio (Provincia del Chaco), sobre los 27° 3' 58.74" latitud sur, 61° 3' 24.24" longitud oeste, a 102 m n m.

El suelo corresponde a la serie Tizón, clasificado como Haplustol óxico, familia limosa fina, mixta, hipertérmica, poco evolucionado, de textura pesada, moderadamente pobre en MO, alta capacidad de intercambio catiónico, penetración efectiva de raíces inferior a 1 m, medianamente alta capacidad de retención de agua hasta los 160 cm de profundidad estudiados; alto contenido en fósforo; débilmente ácido en superficie y ligeramente alcalino en profundidad; rico en

calcio y magnesio, muy rico en potasio; y alto porcentaje de saturación de bases. Sus problemas principales son erosión hídrica moderada, drenaje imperfecto y moderadamente sódico. A pesar de estas limitaciones, es un importante suelo agrícola, que debería tratarse como a los de Capacidad de Uso Clases II, III y IV. El horizonte A varía de 18 a 27 cm de espesor, textura media; el B entre 45 a 55 cm, textura pesada; y el C se presenta a partir de los 44 a 80 cm de profundidad, variando el rango de textura en el límite entre pesada y media, con concentración de calcio a partir de los 60 a 130 cm y alrededor del 20% de durinódulos.

El clima es un factor importante que afecta la formación de los suelos. Altas temperaturas y lluvias escasas resultan en ciclos lentos y ciclos rápidos de cambios químicos y desintegración física del material originario (Ledezma et al., 1994)

El diseño experimental corresponde a parcelas distribuidas en bloques completos al azar con seis tratamientos y cuatro repeticiones. Las dimensiones de las parcelas son de 16.64 por 40 m, cabe aclarar que no se trata de parcelas contiguas, sino que entre cada una de ellas se hallan trazados los caminos de 5 m. de ancho. Para el análisis de los datos se utilizará el software estadístico InfoStat 2008 (Di Renzo et al., 2008)

La conversión del lote a SD data a partir del año 2003, comenzando con la instalación del ELD de rotaciones a partir del año 2005, realizando una evaluación inicial físico-química completa. Los cultivos participantes en las rotaciones son soja (*Glycine max* L.), maíz (*Zea Mays*), sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench.), girasol (*Helianthus annuus*), trigo (*Triticum aestivum*), y cártamo (*Carthamus tinctorius*) en diferentes combinaciones y agrupados en ciclos de 3 años de duración. Durante el primer ciclo de rotaciones (2005/08) se definieron los 6 tratamientos (**Tabla 1**) tratando de representar situaciones que practican los productores de la zona. A partir del segundo ciclo de rotaciones se siguió el criterio de ir acrecentando la participación de gramíneas de 0%; 25%; 33% y 50% comparadas contra el monocultivo de soja.

Los tratamientos para el primer ciclo (periodo 2005-08): T1: Monocultivo de soja (S/S/S); T2: Trigo-soja (T-S/ T-S/ T-S); T3: Trigo-soja/ Maíz/ Soja (T-S/ M/ S); T4: Trigo-soja/ sorgo/ soja (T-S/ SG/ S); T5: Trigo-soja/ Maíz/ Girasol (T-S/ M/ G); T6: Girasol-soja (G-S/ G-S/ G-S). A partir del segundo ciclo de rotaciones en adelante, los tratamientos fueron: T1 Monocultivo de soja (S/S/S), T2: 25%

de participación de gramíneas en la rotación, incluyendo como cultivo de cobertura trigo de verano (S/G/CC-S), T3: 33% de participación de gramínea en el ciclo de rotaciones (S/SG/S), T4: 50% participación de gramíneas en un sistema intensivo (M/G-SG/S), T5: sistema intensivo con 25% gramíneas (SG/G/C-S) y T6: sistema intensivo con 50% gramíneas (G-CC/M/S) (**Tabla 1**).

Las variables de estudio de suelo medidas en los 12 años del ensayo son:

Físicas

- Densidad aparente con Método del cilindro de Kopecki (Blake and Hartge, 1986).
- RMP con Penetrómetro de cono (Bradford, 1986),
- Infiltración con permémetro de disco de Roldolfo Gil.

Físico-químicas:

- pH relación suelo-agua (0,1 M) 1:2,5 (Jackson, 1970);
- Conductividad eléctrica (Potenciometría, equipo HANNA)

Químicas:

- Materia orgánica: Método de Walkley-Black modificado (Nelson and Sommers, 1996).
- Materia orgánica particulada: Método de fraccionamiento físico de Cambardella et al. (1999).
- Fósforo extractable: Bray-Kurtz II (Dewis y Freitas, 1970).
- Potasio (Fotometría de llama)
- Calcio y magnesio (Colorimetría)

Para la evaluación de rendimientos y biomasa de los cultivos se tomaron dos submuestras por parcelas de 3 m de surcos lineales apareados, en cultivos sembrados a 0,52 m de distancia entre hileras. Se registró el peso de la muestra para las estimaciones correspondientes de biomasa aérea, rendimiento, y materia seca. Cabe destacar que también se realizaron estudios de descomposición de rastrojos (técnica de *litter bags*) para los cultivos participantes del primer ciclo de rotaciones. La trilla se realizó en cosechadora estática en gabinete.

Tabla 1. Distribución de tratamientos para los ciclos de rotaciones definidos (1° Ciclo: 2005/08; 2° Ciclo: 2008/11, a partir de este repite las secuencias de cultivo hasta el presente).

Tratamientos	Año 1	Año 2	Año 3
1°Ciclo	2005/06	2006/07	2007/08
T1 (S/S/S)	Soja	Soja	Soja
T2 (T-S/T-S/T-S)	Trigo/ Soja	Trigo/ Soja	Trigo/ Soja
T3 (T-S/ M/ S)	Trigo/ Soja		Soja
T4 (T-S/ SG/ S)	Trigo/ Soja	Sorgo	Soja
T5 (T-S/ M/ G)	Trigo/ Soja	Maíz	Girasol
T6 (G-S/ G-S/ G-S)	Girasol/ Soja	Girasol/ Soja	Girasol/ Soja
Tratamientos	Año 4	Año 5	Año 6
2°Ciclo	2008/09	2009/10	2010/11
T1 (S/S/S)	Soja	Soja	Soja
T2 (S/G/CC-S)	Soja	Girasol	CC*/Soja
T3 (S/SG/S)	Soja	Sorgo	Soja
T4 (M/G-SG/S)	Maíz	Girasol/ Sorgo	Soja
T5 (SG/G/C-S)	Sorgo	Girasol	Cártamo/ Soja
T6 (G-CC/M/S)	Girasol/CC	Maíz	Soja

*CC: como cultivo de cobertura se utiliza Trigo de verano.

Resultados y discusión

En la discusión de datos sólo remite a variables físicas seleccionadas como densidad aparente e infiltración, y a la variable química MOS.

Caracterización inicial del lote

Como puede apreciarse en la **Tabla 2**, los valores de Dap marcan diferencias entre los sitios evaluados marcando algún efecto del manejo anterior donde existía otro ensayo de rotaciones manejado por dos años y reconvertido al presente ELD analizado. Los valores de MOS se corresponden con contenidos medios representativos de los sitios agrícolas de la región.

Tabla 2. Valores de densidad aparente (Dap, 0-10 cm, g cm³), y contenido de MO (%), al inicio del ensayo determinado por parcelas que se corresponderían a los Tratamientos definidos.

Parcelas	Dap (g cm ⁻³)		Contenido de MO (%)	
			0-5 cm	5-15 cm
1	1.30	A	2.29 a	1.37 a
2	1.34	AB	2.49 a	1.50 a
3	1.28	A	2.18 a	1.53 a
4	1.38	B	2.25 a	1.50 a
5	1.28	A	2.31 a	1.61 a
6	1.34	AB	2.38 a	1.64 a

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p <= 0.05).

Los valores iniciales marcan una velocidad de infiltración bastante elevada para la realidad de los lotes agrícolas que por la presencia de limos suele arrojar valores más bajos, incluso comparado con situaciones prístinas (**Figura 1**).

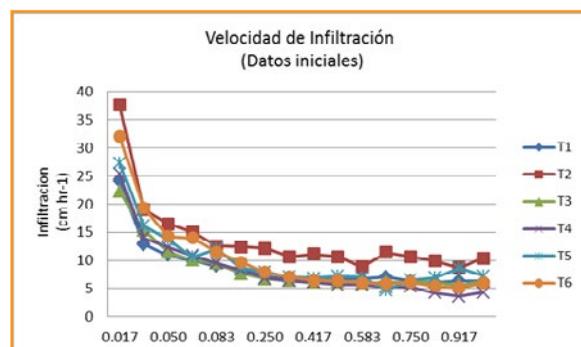


Figura 1. Datos iniciales de velocidad de infiltración medido con Permeámetro de Gil.

Primer ciclo de rotaciones

En el primer ciclo de rotaciones, la principal dificultad radicó en el control de malezas que se manifestó claramente en el cultivo de girasol, cuando antecede una gramínea (**Tabla 3**). Los resultados obtenidos en no contar todos los años condiciones para la siembra de trigo y el comportamiento errático en los rendimientos obtenidos de la secuencia G-S, llevó a reformular los tratamientos en búsqueda de la mejor rotación de cultivo que resulte atractiva por la renta que genera, pero a su vez la que menos altere las condiciones de suelo.

Tabla 3. Rendimientos de los cultivos (kg ha⁻¹) participantes del primer ciclo de rotaciones. Datos expresados a humedad de comercialización de cada grano.

Tratamiento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)		
	Año 1 (2005/06)	Año 2 (2006/07)	Año 3 (2007/08)
T1 (S/S/S)	4798 a	4157 a	3957 a
T2 (T-S/T-S/T-S)	3162 a - 4926 a	983 - 3969 a	s.d. - 3853 a
T3 (T-S/M/S)	2860 a - 4883 a	3571 a	2952 a
T4 (T-S/SG/S)	3554 a - 4661 a	3362	3517 a
T5 (T-S/M/G)	3225 a - 4354 a	3742 a	1286 b
T6 (G-S/G-S/G-S)	1700 - 2511 b	s.d. - 4065 a	2048 a - 911 b

No se encuentran diferencias entre tratamientos para las variables Dap y MO, y comparadas con la situación inicial, no se presentan cambios en valores de MOS, si en los de Dap donde se aprecia incrementos de los valores (**Tabla 4**). Los tratamientos 2 y 6 son los que presentan mayor velocidad inicial de infiltración (**Figura 2**). Esto puede ser favorecido en el caso del T2 por los mayores valores de MO, y en el caso del T6 asociada a la menor densidad que le corresponde a ese tratamiento.

Tabla 4. Datos de Dap y MOS a finalizar el primer ciclo de rotaciones.

Tratamiento	Dap (g cm ⁻³)	MO (%)	
		0-5 cm	5-15 cm
T1	1.41a	2.45 a	2.03 a
T2	1.44a	2.65 a	2.01 a
T3	1.48a	2.62 a	1.97 a
T4	1.37a	2.47 a	1.81 a
T5	1.48a	2.48 a	1.82 a
T6	1.38a	2.42 a	1.99 a

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p <= 0.05)

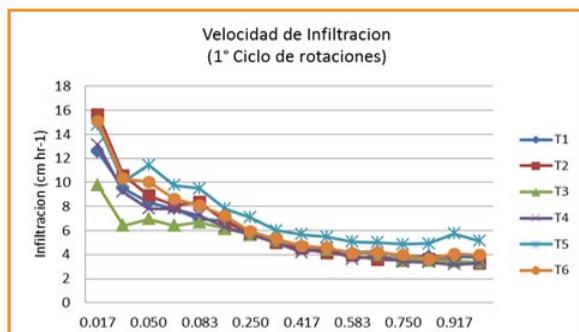


Figura 2. Velocidad de infiltración medida para el primer ciclo de rotaciones.

Segundo ciclo de rotaciones

Durante el segundo ciclo no se pudo cumplir con la planificación de rotaciones definidas porque se atravesó un periodo de sequía histórico, donde se registraron sólo 513 mm en el año, distando bastante de la media anual de 950 mm (**Tabla 5**).

Tabla 5. Rendimientos de los cultivos participantes del segundo ciclo de rotaciones.

Tratamiento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)		
	Año 4 (2008/09)	Año 5 (2009/10)	Año 6 (2010/11)
T1 (S/S/S)	3215 a	3373.4	4088 a
T2 (S/G/CC-S)	3189 a	s.d*	4164 a
T3 (S/SG/S)	3302 a	4929	4154 a
T4 (M/G-SG/S)	4879	s.d/ 4548	3816 a
T5 (SG/G/C-S)	4223	s.d	1719/3674 a
T6 (G-CC/M/S)	1194/s.d	5108	4165 a

*s.d. sin dato por falta de humedad no se realizó la siembra del cultivo correspondiente.

Al cabo del segundo ciclo de rotaciones pueden apreciarse diferencias significativas en Dap para los primeros 5 cm de profundidad entre los T5 respecto del 4 y 6, no hallándose tales diferencias entre los tratamientos para las otras profundidades estudiadas (**Tabla 6**). Respecto de la MOS el análisis estadístico no arroja diferencia entre los tratamientos, pudiendo apreciarse valores a favor de aquellos tratamientos con rotaciones en desmedro del monocultivo de soja.

Tabla 6. Valores de Dap (g cm⁻³) y MOS (%) al cabo del segundo ciclo de rotaciones (2008/11).

Tratamiento	Dap (g cm ⁻³)			MO (%)		
	0-5 cm	5-15 cm	15-30 cm	0-5 cm	5-15 cm	15-30 cm
1	1.19 ab	1.23 a	1.22 a	1.89 a	1.4 a	1.24 a
2	1.18 ab	1.27 a	1.23 a	2.32 a	1.66 a	1.0 a
3	1.17 ab	1.29 a	1.2 a	2.37 a	1.69 a	1.29 a
4	1.2 b	1.21 a	1.25 a	2.74 a	2.21 a	1.74 a
5	1.13 a	1.25 a	1.28 a	2.41 a	1.45 a	1.29 a
6	1.2 b	1.27 a	1.22 a	2.8 a	1.92 a	1.18 a

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p <= 0.05)

En todos los tratamientos puede verse una disminución de la velocidad de entrada del agua, constatándose a campo en todos los tratamientos una disposición laminar de los limos presentes (**Figura 3**). Esta situación se revierte transcurrido el tiempo hasta volver a darse una caída cercana entre los 5 a 10 minutos de lectura para luego incrementar. Podemos decir que se manifiesta un cambio en el patrón de infiltración asociado a acomodación de partículas en el suelo, consecuencia de la alta presencia de limos.

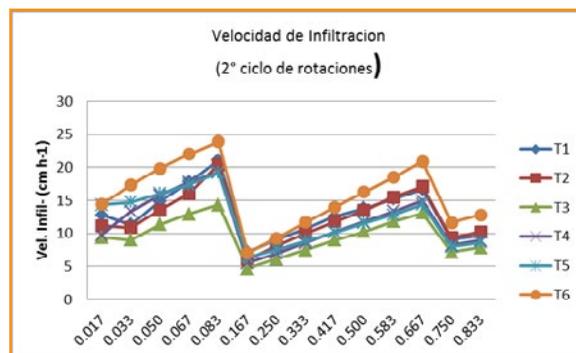


Figura 3. Velocidad de infiltración medida al cabo del segundo ciclo de rotaciones.

Tercer ciclo de rotaciones

Los rendimientos de soja al finalizar el 3° ciclo de rotaciones (2011/14), no reflejan variación alguna en el historial del manejo de rotaciones (**Tabla 7**).

Tabla 7. Rendimientos medios de soja al finalizar el tercer ciclo de cultivo.

Tratamiento	Rendimientos (kg ha ⁻¹)
T1	2974 A
T2	3021 A
T3	3001 A
T4	2752 A
T5	3005 A
T6	3277 A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

La MO resulta un indicador sensible para detectar, en el mediano plazo, los efectos del manejo bajo SD, en particular en muestras muy superficiales (Ron, 2013). Esto refleja el comportamiento de los diferentes tratamientos planteados como mejoradores, aquellos que incluyen más gramíneas durante el ciclo de rotaciones, mostrando las mejores respuestas en los T3 y 4 versus el monocultivo de soja (Tabla 8). Se observan incrementos en el contenido de MO respecto de la condición inicial. Estos cambios favorable del contenido de MO han mejorado también los valores de Dap respecto del cierre del ciclo anterior.

Tabla 8. Valores de Dap (g cm⁻³) y MO (%) al cabo del tercer ciclo de rotaciones (2011/14).

Tratamiento	Dap (g cm ⁻³)	MO (%)	
		0-5 cm	5-15 cm
T1	1.35a	2.00 a	1.8 a
T2	1.33a	2.63 ab	1.87 a
T3	1.24a	3.05 b	1.82 a
T4	1.36a	3.13 b	1.9 a
T5	1.27a	2.77 ab	1.93 a
T6	1.28a	2.73 ab	1.87 a

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

De acuerdo a los valores obtenidos de infiltración a partir del ciclo anterior y en este tercer ciclo, puede notarse el cambio de patrón de infiltración en el que se observan disminuciones en la velocidad inicial que incrementa en los primeros minutos, por observación in situ puede deberse a la reordenación de limos en pequeñas láminas

(Figura 4). Esto también se traduce en aumentos en el valor de la Dap sin que la variación resulte significativa entre los tratamientos, pero resultan menos problemáticos en los tratamientos T6 y T5 en los que participaron gramíneas de altos aportes de rastrojos durante la rotación (Tabla 8).

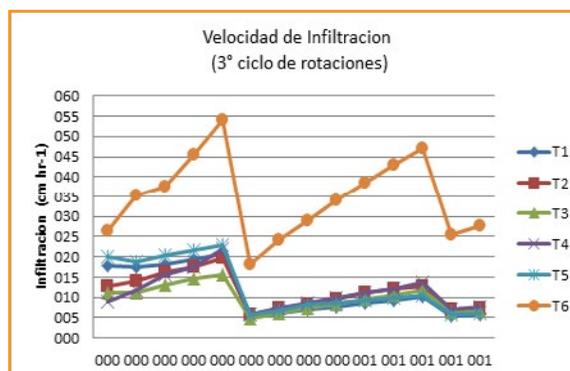


Figura 4. Velocidad de infiltración medida en cm hr⁻¹ al cabo del segundo ciclo de rotaciones.

Conclusiones

Los tratamientos propuestos logran mostrar respuestas positivas en el manejo de rotaciones de cultivos bajo SD en la variable seleccionada MO, mientras que algunos tratamientos muestran valores más bajos de Dap, provocando cambios en la velocidad de infiltración lo que resultaría positivo para el sistema. Tratamientos como el monocultivo de soja provocan efectos contrarios. Muchos autores han hallado respuestas significativas respecto del manejo intensivo bajo SD y rotaciones con participación de cultivos de gramíneas en incrementos de MO para la región de estudio, pero como efecto negativo se aprecian densificaciones superficiales, que repercuten en la infiltración.

Bibliografía

Alvarez, R., Steinbach, H.S. 2006a. Valor agronómico de la materia orgánica. En: Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Ed. Pascale A. J. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina, pp. 1-11.

Alvarez, R., Steinbach, H.S. 2006b. Efecto de la agricultura sobre el nivel de materia orgánica. En: Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Ed. Pascale A. J. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina, pp. 41-53.

Andriulo, A., y Cordone, G. 1998. Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos

- de la región pampeana húmeda. Siembra directa. J. Panigatti, H. Marelli, D. Buschiazio and R. Gil (eds.). Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina, 65-96.
- Bhardwaj, AK; P Jasrotia; SK Hamilton y GP Robertson. 2011. Ecological management of intensively cropped agroecosystems improves soil quality with sustained productivity. *Agric. Ecosys. Environ.* 140: 419-429.
- Cubilla, M. 2014. Manejo del suelo, fertilidad y nutrición de la soja para aumentar la capacidad productiva en la Región Oriental del Paraguay. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* No.13: 2-6.
- Darwich N. El balance físico económico en las rotaciones agrícolas. Proyecto Fertilizar. INTA. www.fertilizar.org.ar, 2003.
- Derpsch, R; T Friedrich; A Kassam & H Li. 2010. Current Status of Adoption of No-Till Farming in the World and Some of Its Main Benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3(1).
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., González L., Tablada M., Robledo C.W. (2008). InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Díaz-Zorita, M., Grosso G.A. 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research* 54, 121-126.
- Ferreras L.A.; Ferrari M.C.; Magra, G.C.; Solá Brignone, F.E.; Rivoltella; L.A. 2014. Evaluación de la calidad del suelo bajo distintos sistemas de cultivo. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas" Producción sustentable en ambientes frágiles. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Forján, HJ y ML Manso. 2012 (eds.). Rotaciones y secuencias de cultivos en la región mixta cerealera del centro-sur bonaerense: 30 años de experiencias. Ediciones INTA. Tres Arroyos, Argentina. 102 pp.
- García, F. 2011. Siembra directa, rotaciones y fertilidad para una agricultura sostenible con énfasis en las condiciones de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. *Rev. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. Arg. no.1: 14-21.
- González et al. 2016. Efecto de rotaciones de cultivos en la evolución del contenido de cationes y el pH de suelos arcillosos bajo siembra directa, en el Distrito de Capitán Miranda-Paraguay. *Tecnol. Agrar.* 2016; 1(1): 51-56.
- Karlen, D. L., E. G. Hurlley, S. S. Andrews, C. A. Cambardella, D. W. Meek, M. D. Duffy and A. P. Mallarino. 2006. Crop Rotation Effects on Soil Quality at Three Northern Corn/Soybean Belt Locations. *Agron. J* 98:484-495
- Ledesma, L. L., J. J. Zurita. 1994. Los suelos del departamento 9 de Julio (Chaco). Convenio entre el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Gobierno de la Provincia del Chaco por intermedio de Ministerio de Agricultura y Ganadería. Programa Estudio y Extensión en Suelos de la Provincia del Chaco.
- Quiroga, A.R., Buschiazio, D.E., Peinemann, N. 1998. Management discriminant properties in semiarid soils. *Soil Science* 163, 591-597.
- Novelli LE; OP Caviglia & RJM Melchiori. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-168: 254-260.
- Rojas, J.M.; Roldán, M.F.; Guevara, G.S. 2014. Análisis multivariado de parámetros de suelo para diferenciar rotaciones en siembra directa. XXIV Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas- Bahía Blanca- 5 al 9 de mayo de 2014.
- Ron, M. M. E. Mandolesi; R. Storniolo; M. L. Manso y H. Forján. 2013. variabilidad del carbono orgánico total en rotaciones en siembra directa del centro sur bonaerense
- Simon, C. P. 2008. Propuestas para un proyecto de intervención con enfoque territorial. Trabajo Final Integrador para optar al Grado de Especialista. Especialización en Desarrollo Rural. FAUBA. 76pp.
- Viglizzo, EF; AJ Pordomingo; MG Castro & FA Hértora. 2003. Environmental assessment of agriculture at a regional scale in the pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment* 87:169-195. ●

Rotaciones de cultivo bajo siembra directa ¿Secuestro de carbono asegurado?

Alicia Irizar^{1*}; Luis Milesi Delaye¹; y Adrián Andriulo¹.

¹Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, INTA
Ruta 32 km 4,5 - CP 2700 - Pergamino, Buenos Aires, Argentina

*Contacto: irizar.alicia@inta.gob.ar

Introducción

A nivel mundial, los suelos contienen aproximadamente el doble del carbono (C) presente en la atmósfera y, en su mayoría, éste se encuentra bajo formas orgánicas (Nieder y Benbi, 2008). Por lo tanto, es innegable que el almacenamiento de C orgánico del suelo (COS) es muy importante y, posiblemente, será el aspecto más significativo del ciclo global de C en las próximas décadas (Jones y Falloon, 2009). La capacidad de almacenar COS depende fuertemente del COS inicial (Huggins et al., 1998; Senthilkumar et al., 2009) y de las variaciones en las prácticas agronómicas y en el clima. Sin embargo, existe una gran incertidumbre acerca del futuro almacenamiento de COS. La existencia de ensayos de larga duración en sitios representativos de las distintas regiones, que controlan importantes fuentes de variación y que disponen de bases de datos confiables, permitirían reducir parte de esa incertidumbre.

Cuanto más elevadas son las reservas iniciales de COS, mayores son las pérdidas de C del suelo (Nieder et al., 2003). En general, suelos con bajos niveles iniciales de COS tendieron a ganar ligeras cantidades de C luego de su agriculturización, y suelos con niveles elevados de COS perdieron por lo menos el 20% de los valores iniciales (Mann, 1986). Andriulo et al. (1999) encontraron que partiendo de una pastura original con 68 Mg COS ha⁻¹ en la Pampa Ondulada, las reservas de COS se redujeron a 49 Mg ha⁻¹ luego de 13 años de soja continua con laboreo convencional, significando una pérdida del 30% del COS en una masa de suelo de 2500 Mg ha⁻¹.

A su vez, en sistemas bajo agricultura continua, la secuencia de cultivo se encuentra, junto al sistema de labranza, como uno de los principales reguladores del ciclado y el almacenamiento de COS (Paustian et al., 1997). La secuencia de cultivo altera el momento, la ubicación, la cantidad y la calidad de los aportes de residuos de cultivo, afectando el tamaño, la tasa de reciclado

y la distribución vertical de los compartimentos de C y nitrógeno (N) (Franzluebbers et al., 1994). Además, la intensificación de la rotación actúa favorablemente sobre el balance de COS (Wright y Hons, 2005; Dou et al., 2007). En climas más cálidos y húmedos, permite realizar un uso más eficiente de las condiciones ambientales, y al producirse mayor biomasa de residuos a través del año, existen, en el largo plazo, mayores oportunidades para ingresar C al suelo vía fotosíntesis y de lograr mayores reservas de COS (Franzluebbers, 2004). Por otro lado, al existir un aumento de tiempo de ocupación del suelo por raíces vivas, los exudados radicales estimulan la actividad microbiana, favoreciendo la agregación (Puget y Drinkwater, 2001; Deneff y Six, 2006). A su vez, la rotación de residuos de diferente calidad produce el mismo efecto (Luo et al., 2010).

Los cambios producidos en los sistemas de cultivo de la Pampa Ondulada en las últimas décadas fueron masivamente adoptados sin una evaluación previa de su posible impacto sobre el COS en el largo plazo. Por ello, resulta imperativo evaluar la efectividad de los diferentes sistemas de cultivo para aumentar las reservas de COS y mitigar el efecto invernalero en la región (Irizar, 2010). El objetivo de este trabajo fue evaluar el cambio de largo plazo en las reservas de COS en cuatro secuencias de cultivo: maíz-trigo/soja (M-T/S), trigo/soja (T/S), monocultivo de maíz (M) y de soja (S) bajo siembra directa (SD), en un Argiudol típico de la Pampa Ondulada.

Materiales y métodos

En este estudio se utilizaron experimentos de larga duración que se encuentran localizados a 33° 57' de latitud sur y 60° 33' de longitud oeste dentro de la Estación Experimental Agropecuaria Pergamino de INTA. El clima es templado húmedo, siendo la precipitación media anual del

período 1910-2015 de 988 mm y la temperatura media anual del período 1967-2015 de 16.5°C (Base de datos de la EEA Pergamino de INTA). El suelo corresponde a un Argiudol típico de textura franco limosa serie Pergamino sin fases por erosión con pendiente <0,5% (INTA, 1972).

Los ensayos se instalaron escalonados en el tiempo. En 1979 se inició la rotación M-T/S (Ensayo 1 y Ensayo 2). Luego, en 1983, se agregó la rotación T/S y en 1987 se incorporaron los monocultivos de soja y de maíz, habiendo transcurrido para cada secuencia de cultivo, desde el inicio hasta el año 2012, 33, 29 y 25 años para M-T/S, T/S, S y M, respectivamente. Cada secuencia de cultivo presenta un diseño de bloques completos aleatorizados. La dimensión de la parcela principal es de 14 m de ancho y 45 m de largo. En las parcelas principales se encuentran aleatorizados los sistemas de labranza. A su vez, las parcelas principales se dividieron en dos subparcelas de 7 m de ancho y 45 m de largo, en las que se aplicaron dos dosis de fertilizante nitrogenado: 0 kg N ha⁻¹ (NF) y 90 y 100 kg N ha⁻¹ (F) en promedio, para trigo y maíz, respectivamente. Además, los cultivos de maíz, trigo y soja de 1° siembra, se fertilizan a la siembra con 12 kg P ha⁻¹. En este trabajo para evaluar en cambio en las reservas de COS solamente se trabajó en aquellas parcelas que se encuentran bajo SD con aplicación de fertilizante nitrogenado.

En Junio de 2012 las muestras de suelo fueron tomadas a tres profundidades: 0-5, 5-10 y 10-20 cm. Se eligieron al azar cuatro sitios de submuestreo en cada parcela y se extrajeron muestras compuestas en cada sitio. Las muestras extraídas se secaron en estufa y se tamizaron con un tamiz de 2 mm de diámetro de malla. Se realizó la determinación de COS por combustión seca con un analizador elemental de C (marca LECO). A su vez, en los mismos puntos de muestreo se determinó la densidad aparente (dap) por el método del cilindro (Burke et al., 1986). Por otro lado, se contó con las concentraciones de COS a tres profundidades (0-5, 5-10 y 10-20 cm) de la situación de partida de cada secuencia de cultivo (Galetto et al., 1992 y datos no publicados) y como no se tenían los valores iniciales de dap, ésta se estimó utilizando las ecuaciones propuestas por Chen et al. (1998). Debido a que existieron diferencias significativas en dap entre los momentos evaluados, las reservas de COS se expresaron a una masa de suelo equivalente de 2500 Mg ha⁻¹. El retorno de C por los residuos de

cultivo que vuelven al suelo se calculó a partir de los rendimientos promedio históricos en grano (datos no mostrados), expresados en materia seca. Para ello, se utilizaron índices de cosecha de 0.50, 0.34 y 0.38 para maíz, trigo y soja, respectivamente (Alvarez y Steinbach, 2006). Además, se asumió que la masa radical es 30% para maíz, trigo y soja en relación a la biomasa aérea total e incluyendo la rizodeposición (Bolinder et al., 2007) y se utilizaron relaciones C/N de los residuos de los cultivos de 57, 64 y 41 para maíz, trigo y soja, respectivamente.

Para comparar las reservas de COS de la situación de partida de cada secuencia de cultivo con las reservas presentes en el año 2012 se utilizó la prueba t de Student - p< 0.05 (SAS, 2001). Además, se utilizó el análisis de regresión para determinar la relación existente entre el cambio en las reservas de COS y el COS al inicio de las secuencias de cultivo. Se comprobó si la pendiente de la función de regresión era significativamente distinta de cero (p<0.05) mediante la prueba t de Student para determinar si la variable regresora influía en la variable respuesta (SAS, 2001).

Resultados y discusión

La **Tabla 1** presenta la magnitud y el sentido de los cambios de las reservas de COS con diferentes secuencias de cultivo bajo SD. El COS disminuyó en las rotaciones M-T/S Ensayo 1 y 2 y T/S y en el monocultivo de soja. En cambio, en el monocultivo de maíz se mantuvo constante con respecto a la situación de partida.

Tabla 1. Variación de largo plazo de las reservas de carbono orgánico del suelo (COS) con respecto al COS de inicio de cada secuencia de cultivo, expresados en Mg ha⁻¹ a una masa de suelo equivalente de 2500 Mg ha⁻¹.

"Secuencias de cultivo"	C aportado	COS inicial	COS 2012	Diferencia
Mg C ha ⁻¹				
M-T/S Ensayo 1	5.8	51.8	43.2	-8.6*
M-T/S Ensayo 2	5.4	45.3	41.6	-3.07*
T/S	6.2	49.2	42.5	-6.7*
M	4.7	41.3	40.2	-1.1
S	3.1	40.5	37.2	-3.3*

C aportado: carbono anualmente aportado por los residuos de los cultivos; COS: carbono orgánico del suelo; M-T/S: maíz-trigo/soja (E1: ensayo 1; E2: ensayo 2); T/S: trigo/soja; M: monocultivo de maíz; S: monocultivo de soja. * diferencias significativas entre COS 2012 vs. COS inicio (p<0.05).

La **Tabla 1** muestra que en el monocultivo de maíz con un aporte medio anual de $4.7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ se pueden mantener las reservas de COS en 40.7 Mg ha^{-1} (COS: 1,6%). En cambio, en M-T/S y T/S, si bien los aportes de C son superiores, los mismos no resultan suficientes para mantener las elevadas reservas de COS al inicio de las rotaciones. A su vez, el monocultivo de soja no puede mantener las bajas reservas de COS presente al inicio del mismo, debido, en parte, al bajo aporte de C por parte del cultivo de soja ($3.1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Este comportamiento diferencial en el cambio de COS estuvo en relación directa con el contenido inicial del mismo (**Figura 1 A y B**). Numerosos autores han reportado mayores pérdidas para suelos con elevados contenidos de COS (Mann, 1986; Nieder et al., 2003; Huggins et al., 2007).

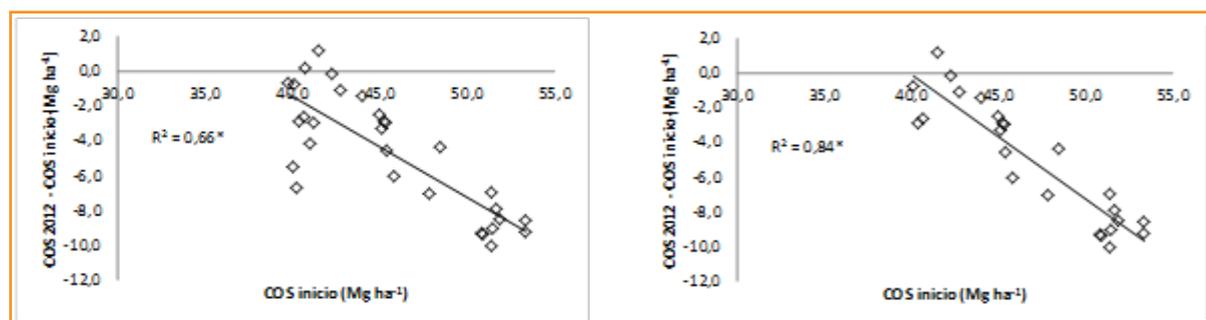
La **Figura 1 B** muestra que la relación entre los cambios en las reservas de COS y el COS al inicio de las secuencias de cultivo mejora cuando no se tiene en cuenta el monocultivo de soja. Esto estaría demostrando que el almacenaje de COS no sólo depende del COS inicial, sino también de la cantidad de C anualmente aportado, de la calidad de los residuos que se aportan y de otros factores adicionales (periodicidad de los aportes, duración de los períodos de barbecho, etc.) que actúan modificando los límites de almacenamiento (Paustian et al., 2000; Huggins et al., 2007; Irizar, 2010). Para el caso particular del monocultivo de soja, existen varios factores importantes que controlan la degradación del C: a) la composición de su sustrato, la cual lleva a que una gran cantidad de éste se encuentre disponible para ser atacado por los microorganismos, b) la materia orgánica humificada con muy baja protección física, debido a que el acceso de los

microorganismos descomponedores al interior de los agregados se ve facilitado (Dungait et al., 2012), y c) pH cercanos a la neutralidad que podrían estimular la actividad microbiana descomponedora de los residuos (Huggins et al., 2007).

Por otro lado, en base a los resultados obtenidos, se encontró que resulta imposible mantener, en el lapso de tiempo analizado, reservas de COS superiores a 50 Mg ha^{-1} con aportes de C anuales cercanos a 6 Mg ha^{-1} . Por lo tanto, aún combinando rotaciones de cultivos con aplicación de fertilizante nitrogenado y SD, que contribuyan a más elevados aportes de C, no es posible mantener estas reservas. Sin embargo, en los suelos bajo agricultura continua de la Pampa Ondulada, con valores medios de COS de 40 Mg ha^{-1} (1.6%) en el espesor 0-20 cm y sin fases por erosión, la mejor tecnología disponible (secuencias de cultivo intensificadas bajo SD) podría aumentar las reservas de COS. Este aumento de COS traería aparejado una mayor fertilidad del suelo y mayor productividad de la tierra, mejoras en la calidad del agua y del aire y un aumento en la biodiversidad (Lal et al., 1998; Weil y Magdoff 2004). Sin embargo, de continuarse con la secuencia de cultivo más generalizada en la región, con predominancia del cultivo de soja de primera siembra, las reservas actuales de COS continuarán disminuyendo. De todas formas, debería tenerse en cuenta que existen factores adicionales, ya discutidos anteriormente, que actúan modificando estos límites.

Conclusiones

El almacenamiento de COS dependió de la cantidad de COS inicialmente presente en la secuencia de cultivo, de los aportes diferenciales



* pendiente (b1) de la línea de regresión $\neq 0$ ($p < 0,05$)

Figura 1. Relación entre el cambio en las reservas de carbono orgánico del suelo (COS) y la reserva inicial de COS en el largo plazo bajo diferentes secuencias de cultivo: maíz-trigo/soja Ensayo 1 y 2, trigo/soja y monocultivo de maíz y de soja (A) y sin incluir el monocultivo de soja (B), expresados en Mg ha^{-1} a una masa de suelo equivalente de 2500 Mg ha^{-1} .

de C, de los retornos diferentes de N por parte de los residuos de cultivo y de otros factores adicionales (periodicidad de los aportes, duración de los períodos de barbecho, protección física del C dentro de los agregados y actividad microbiana) que actúan modificando estos límites.

Las rotaciones M-T/S y T/S bajo SD permitirían incrementar las reservas actuales de COS en la Pampa Ondulada. Sin embargo, si se continúa con la secuencia de cultivo más generalizada en la región, con predominancia del cultivo de soja de primera siembra, las mismas continuarían disminuyendo.

Bibliografía

- Alvarez, R y H Steinbach. 2006. Balance de carbono en suelos cultivados. Pp. 55-68. En: Pascale, JA (ed). *Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.
- Andriulo, A; J Guérif y B Mary. 1999. Evolution of soil carbon with various cropping sequences on the rolling pampas. Determination of carbon origin using variations in natural ^{13}C abundance. *Agron. J.* 19: 349-364.
- Burke, W; D Gabriela y J Bruma (eds). 1986. *Soil structure assessment*. A.A. Balkema. Rotterdam, Holanda. 92 pp.
- Chen, Y; S Tessier y J Rouffignat. 1998. Soil bulk density estimation for tillage systems and soil textures. *Trans. ASAE.* 41: 1601-1610.
- Denef, K y J Six. 2006. Contributions of incorporated residue and living roots to aggregate-associated and microbial carbon in two soils with different clay mineralogy. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 774-786.
- Dou, F; AL Wright y FM Hons. 2007. Depth distribution of soil organic C and N after long term soybean cropping in Texas. *Soil Till. Res.* 94: 530-536.
- Dungait, JAJ; Hopkins, DW; Gregory, AS y Whitmore, AP. 2012. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology*, 18, 1781-1796.
- Franzluebbers, AJ; FM Hons y DA Zuberer. 1994. Long term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1639-1645.
- Franzluebbers, AJ. 2004. Tillage and residue management effects on soil organic matter. Pp. 227-268. In: Magdoff, F y RR Weil (eds). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 33431.
- Galetto, MLR de; L Blotta; V Zeljkovich y O Hansen. 1992. *Sistemas de labranzas en la rotación maíz-trigo-soja. Evaluación de las propiedades químicas del suelo*. En: *Carpeta de Producción Vegetal*. Tomo X. Informe n° 85. EEA Pergamino de INTA.
- Huggins, DR; GA Buyanovski ; GH Wagner; JR Brown; RG Darmody et al. 1998. Soil organic C in the tallgrass prairie-derived region of the corn belt: effects of long-term management. *Soil Till. Res.* 47: 219-234.
- Huggins, DR; RR Allmaras; CE Clapp ; JA Lamb y GW Randall. 2007. Corn soybean sequence and tillage effects on soil carbon dynamics and storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 145-154.
- INTA. 1972. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja Pergamino (3360-32). 106 pp. + anexos.
- Irizar, A. 2010. Cambios en las reservas de material orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas: efecto de la secuencia de cultivo, del sistema de labranza y de la fertilización nitrogenada. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- Jones, C y P Falloon. 2009. Sources of uncertainty in global modelling of future soil organic carbon storage. 283-310. In: Baveye, Mysiak y Laba eds. *Uncertainties in environmental modeling and consequences for policy making*. NATO, Springer. Vrsar, Croatia, 401 p.
- Lal, R; J Kimble; RF Follet y CV Cole (eds). 1998. *The potential of U.S. Cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 33431. 104 pp.
- Luo, Z; E Wang y OJ Sun. 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139: 224-231.
- Mann, LK. 1986. Changes in soil carbon storage alter cultivation. *Soil Sci.* 142: 279-288.
- Nieder, R; DK Benbi y K Isermann. 2003. Soil organic matter dynamics. Pp. 345-408. In: Benbi, DK y R Nieder (eds). *Handbook of processes and modeling in the soil plant system*. New York: Haworth.
- Nieder, R y DK Benbi. 2008. Introduction. Pp. 1-4. In: Nieder, R y DK Benbi (eds). *Carbon and nitrogen in the terrestrial environment*. Springer.
- Paustian, K; HP Collins y E Paul. 1997. Management controls on soil carbon. Pp. 15-49. In: Paul, EA; K Paustian; ET Elliot y CV Cole (eds). *Soil organic matter in temperate agroecosystems: long-term experiments in North America*. CRC Press Lewis Publishers, div. of CRC Press, Boca Raton, Florida, 33431.
- Paustian, K ; J Six ; ET Elliot y HW Hunt. 2000. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochem.* 48: 147-163.
- Puget, P y LE Drinkwater. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 771-779.
- SAS Institute Inc. 2001. *SAS/STAT User's guide, Version 8.2. 4th edition*. Vol. 2. Cary, NC: SAS Institute Inc. 846 pp.
- Senthikumar, S; B Basso; AN Kravchenko y GP Robertson. 2009. Contemporary evidence of soil carbon loss in the U.S. Corn Belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 2078-2086.
- Weil, R y F Magdoff. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. Pp. 1-43. In: Magdoff, F y RR Weil (eds). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 33431.
- Wright, AL y FM Hons. 2005. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Biol. Biochem.* 69: 141-147. ●

Importancia de las gramíneas en secuencias agrícolas con alta incidencia de oleaginosas en la región semiárida pampeana

Romina Fernández^{1,*}, Daniel Fernández², Ileana Frasier¹, Mauricio Uhaldegaray¹, Agustín Oderiz¹, Eric Sherger¹, y Alberto Quiroga¹

¹ Grupo Suelos y Gestión del Agua, INTA Anguil. La Pampa, Argentina.

² Miembro CREA.

*Contacto: fernandez.romina@inta.gob.ar

La mayoría de las regiones semiáridas y subhúmedas secas del mundo sufrieron un rápido y creciente cambio en el uso de la tierra que convirtió los pastizales naturales en campos cultivados para la producción de grano, aceite, biocombustibles y papel (Nosetto et al., 2011; Zach et al., 2006). Este cambio en el uso provocó pérdidas de C de los suelos (Fernández et al., 2016; Zach et al., 2006; Elliott, 1986) y graves impactos negativos sobre la calidad de los mismos, afectando de manera importante procesos físico-hídricos.

Los sistemas de producción se han ido distanciando del "método de la naturaleza", caracterizado en la región por una vegetación prístina polifítica, con especies que se adaptan a distintas situaciones, con capacidad de explorar el perfil de suelo entre 3 y 5 m, con relaciones biomasa de raíz/biomasa aérea de 3 a 6 y con una amplia distribución en el tiempo de periodos críticos (Quiroga et al., 2015). El sistema radicular de la mayor parte de los cultivos anuales que han reemplazado a la vegetación prístina exploran comparativamente la mitad del perfil (1.5 -2 m) y, consecuentemente, acceden a la mitad de agua útil, es decir, son más dependientes de la frecuencia de las precipitaciones.

Buscando sustentabilidad económica, las empresas han incrementado la carga animal (especialmente en el ciclo de años con mayores precipitaciones) y esto ha llevado a situaciones de sobre pastoreo de los recursos forrajeros anuales y perennes. Además, en la región semiárida pampeana se utilizan como recursos forrajeros los rastrojos de cultivos agrícolas y la mayor participación de girasol y soja ha significado un menor aporte de carbono (C) al suelo por parte de la secuencia de cultivos anuales. También la ganadería ha experimentado cambios, incrementándose la cosecha mecánica de forraje y el traslado del mismo a corrales acentuando el balance negativo de C y condicionando la baja

cobertura de los suelos.

Debido a la necesidad que existe en la región semiárida de abordar la problemática de la degradación física de suelos que limita la captación de agua y condiciona por sectores (manchoneo) el desarrollo de los cultivos, se puso en marcha en el año 2009 un ensayo de larga duración. En el mismo se evaluó el contenido de materia orgánica, indicadores físico-hídricos y rendimiento de cultivos en rotaciones de soja continua (SC), respecto de una secuencia de cultivos que incluye también soja, pero alterna con maíz y centeno como cultivo de cobertura (R). Además, se monitorearon los indicadores físico-hídricos en suelo bajo vegetación natural de monte de caldén (VN). Esta experiencia fue establecida sobre un Paleustol petrocálcico de la Planicie con Tosca, que al inicio de la misma presentó un 60% menos de infiltración (simulador de lluvia) y un alto porcentaje de encostramiento superficial (37%), respecto del mismo suelo bajo vegetación natural. El uso consuntivo promedio por parte de la soja en las dos rotaciones fue similar, pero la eficiencia en el uso del agua fue mayor en soja en rotación (7 kg de grano/ha mm) con respecto a soja continua (5.7 kg de grano/ha mm). De esta manera, la utilización de gramíneas en la rotación propició un incremento del rendimiento de soja de 600 kg/ha (**Figura 1**), además de mejorar el control de malezas y establecimiento del cultivo. En la **Foto 1** se puede observar el desarrollo de la soja en ambas rotaciones. Debido a lo expuesto se enfatiza que la rotación de cultivos constituye una importante característica de los sistemas de producción ya que facilita el manejo de malezas, enfermedades y fertilidad del suelo. Además, permite estratificar el uso del agua y nutrientes del suelo a través de diferentes profundidades de raíces y mejorar la eficiencia en el uso del agua de los cultivos (Moroke et al., 2005; Anderson et al., 2002; Copeland et al., 1993).

La implementación de prácticas conserva-

cionistas en regiones semiáridas resulta fundamental debido a la fragilidad de los suelos y su menor resiliencia respecto de climas más húmedos (Fultz et al., 2013; Hevia et al., 2003). Covas (1989) señaló que la rotación con pasturas perennes alternado por iguales periodos con cultivos anuales, es la base para preservar la productividad de los suelos de la “pampa semiárida”. Puede inferirse que durante el periodo de pasturas perennes nos acercamos al “método de la naturaleza” y recuperamos fertilidad (Bono y Fagioli, 1991). Luego, durante el periodo de cultivos anuales utilizamos parte de esa fertilidad con mayor o menor intensidad dependiendo del sistema de labranza y de las especies que integran la rotación.

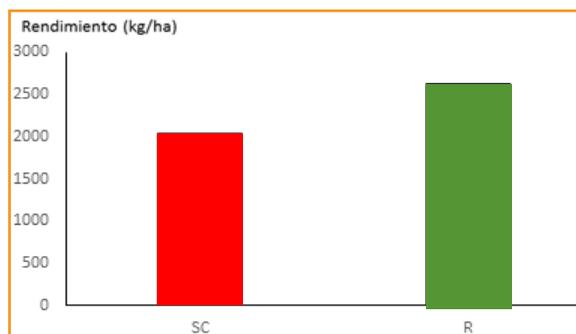


Figura 1. Rendimiento de soja en rotación (R) y en monocultivo (SC).

La práctica de uso influyó significativamente en los contenidos de MO, y las mayores diferencias se encontraron entre el uso en VN con respecto a los suelos bajo agricultura (Tabla 1). En relación a los contenidos de MO en ambas rotaciones con soja, los resultados fueron similares en los 8 años de efectos acumulados y resultaría nece-

sario inferir acerca de las fracciones más lábiles de la MO.

Asociado a la utilización de gramíneas en la rotación se encontró una reducción en el porcentaje de encostramiento superficial, que varió de un 37% en la rotación con soja continua a un 17% en la rotación con gramíneas. Por otra parte, se puede inferir que las gramíneas fueron efectivas en incrementar la porosidad en los primeros 10 cm del perfil, la cual se correspondió con una mayor conductividad hidráulica (K, cm/h). Esta variable presentó valores inferiores bajo soja continua (7.9 cm/h) respecto de soja en rotación (11.7 cm/h), comprobándose además que el uso en vegetación natural presentó el mayor valor promedio (18 cm/h). Los resultados obtenidos también mostraron que los valores de K fueron menos variables en la rotación con gramíneas y en suelo bajo vegetación natural con respecto a soja continua.

La velocidad de ingreso del agua al perfil a tasa constante (infiltración básica, IB) también fue influenciada positiva y significativamente por la inclusión de gramíneas, incrementándose en un 70% respecto de la rotación soja continua. Los valores de densidad aparente y densidad aparente máxima (obtenida mediante test Proctor) fueron mayores en la rotación de soja continua, aunque no se diferenciaron estadísticamente con respecto a los valores hallados en soja en rotación con gramíneas (Tabla 1). Se destaca la estrecha relación entre distintas propiedades físicas: K del estrato superficial e infiltración ($r^2=0.93$) y entre densidad aparente e infiltración ($r^2=-0.79$). Estos cambios permiten inferir sobre una mayor eficiencia en los procesos de captación, almacenaje y uso del agua.



Foto 1. Cultivo de soja en a) rotación y b) soja continua.

Tabla 1. Materia orgánica (MO), densidad aparente (Dap), densidad aparente máxima (Dap max), infiltración básica (IB), conductividad hidráulica (K), porosidad total (PT), en el cultivo de soja continua (SC), soja en rotación (R) y vegetación natural (VN).

	SC	R	VN
MO (%)	2.0	2.1	7
Dap (gr/cm ³)	1.25	1.23	0.90
Dap max (gr/cm ³)	1.42	1.38	1.0
IB (mm/min)	0.6	1.1	2.0
K (cm/h)	7.9	11.7	18

El efecto positivo de incluir gramíneas en la rotación se evidenció sobre las propiedades físico-hídricas, permitiendo incidir sobre una mayor eficiencia en los procesos de captación, almacenaje y uso del agua que han dado lugar a un mayor rendimiento del cultivo. Cuánto dura este efecto y con qué frecuencia deben incluirse cultivos de cobertura en la rotación son algunos interrogantes a los que deberá responder la experiencia de larga duración.

Agradecimientos

La experiencia de larga duración que se encuentra en marcha es posible llevarla adelante a partir del apoyo del establecimiento "Los Pi-quillines" perteneciente al CREA Atreucó (Zona Oeste Arenoso).

Bibliografía

- Anderson R., D. Tanaka y S. Merrill. 2002. Yield and water use of broadleaf crops in a semiarid climate. *Agric. Water Manage.* 58: 255-266.
- Bono A. y M. Fagioli. 1994. Eficiencia de la alfalfa en la recuperación de la fertilidad nitrogenada del suelo en la región semiárida pampeana. EEA INTA Anguil, Pub. Téc. 45: 11pp.
- Copeland P., R. Allmaras, R. Crookston y W. Nelson. 1993. Corn-soybean rotation effects on soil water depletion. *Agron. J.* 85: 203-210.
- Covas G. 1989. Evolución del manejo de los suelos en la región pampeana semiárida. Actas Primeras Jornadas de Suelos de Regiones Semiáridas, Santa Rosa, La Pampa. 1-12pp.
- Elliott, E. 1986. Aggregate Structure and Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Native and Cultivated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 627.
- Fernández R., A. Quiroga, C. Álvarez, C. Lobartini y E. Noellemeier. 2016. Valores umbrales de algunos indi-

- cadores de calidad de suelos en molisoles de la región semiárida pampeana. *Ciencia del Suelo.* 34: 279-292.
- Fultz, L., J. Moore-Kucera, T. Zobeck, V. Acosta-Martínez, D. Wester y V Allen. 2013. Organic carbon dynamics and soil stability in five semiarid agroecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 181: 231-240.
- Hevia, G., D. Buschiazzi, E Hepper, A Urioste y E. Antón. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. *Geoderma* 116: 265-277.
- Moroke T., R. Schwartz, K. Brown y A. Juo. 2005. Soil water depletion and root distribution of three dryland crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:197-205.
- Nosetto, M., E. Jobbágy, A. Brizuela y R Jackson. 2011. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 154: 2-11.
- Quiroga A., C. Gaggioli, R. Fernández y E. Noellemeier. 2015. Contribución al manejo sustentable de suelos en zonas semiáridas. El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. Tomo 1. Ed R. Casas, G. Albarracín. PROSA-FECIC. ISBN 978-950-9149-39-7 Pág. 167-181.
- Zach, A., H Tiessen y E. Noellemeier. 2006. Carbon Turnover and Carbon-13 Natural Abundance under Land Use Change in Semiarid Savanna Soils of La Pampa, Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70. 1541-1546.

Vuelven las pasturas: Manejo y fertilización para nuevos modelos ganaderos

María Alejandra Marino

Unidad Integrada FCA-INTA Balcarce, Buenos Aires, Argentina

Contacto: marino.mariaa@inta.gob.ar

Introducción

Después de varias décadas de desplazamiento de la ganadería hacia áreas consideradas marginales, actualmente en el país se presentan escenarios favorables que reposicionan la actividad impulsando el desarrollo de **nuevos modelos ganaderos**, en muchos casos integrados con cultivos agrícolas en sistemas mixtos. Estos nuevos planteos surgen como alternativas que apuntan a lograr mayor productividad, sostenibilidad y rentabilidad que los tradicionales, y además son más eficientes en el uso de recursos, menos riesgosos y más flexibles ante la variabilidad climática, de precios y de mercados.

Una característica generalizada en los tradicionales planteos ganaderos locales (sobre todo en cría y recría vacuna), es la amplia brecha existente entre los techos productivos y los rendimientos efectivamente logrados. En la región pampeana (clima templado-húmedo), las pasturas perennes templadas pueden producir pasto de calidad durante la mayor parte del año (Agnusdei et al., 2001; Scheneiter y Améndola, 2009). Sin embargo, tanto las gramíneas (festuca, agropiro, cebadilla, raigrás, pasto ovillo, etc.) como las leguminosas (alfalfa, tréboles, lotus, etc.) forrajeras presentan niveles productivos notablemente inferiores a los que les permitiría expresar el ambiente. Esto puede ser en buena medida atribuible a desajustes en el manejo de los recursos forrajeros. Una escasa aplicación de tecnologías y de insumos, provoca recurrentes excesos y déficits en la oferta de forraje que reducen la productividad de los sistemas.

Contrariamente a lo ocurrido en nuestro país, en otras regiones ganaderas templadas del mundo se reconoce la importancia de mantener una base forrajera pastoril, con una alta participación en las dietas del pasto de calidad proveniente de las pasturas perennes. Esto permite obtener elevada productividad animal, incrementa el beneficio económico de los sistemas ganaderos de carne (Mulliniks et al., 2015) y de leche (Fariña et al., 2011) y minimiza el riesgo ambiental de

manera sostenida en el tiempo (Franzluebbers y Sawchik, 2012).

Hoy las pasturas perennes están siendo revalorizadas, pero para lograr aprovechar los beneficios productivos y los servicios ecosistémicos que pueden brindar requieren un manejo adecuado. La aplicación de Buenas Prácticas de Manejo de Pasturas (BPMP) contribuiría a mejorar los niveles de producción tradicionalmente obtenidos en los sistemas ganaderos locales. Las BPMP, conforman un paquete tecnológico con recomendaciones y procedimientos sencillos para implementar en la siembra, fertilización y manejo de la utilización de plantas forrajeras, basados en principios científicos y de alto impacto productivo en los sistemas ganaderos locales (Agnusdei et al., 2013).

Entre los factores que controlan la producción de forraje se destaca la nutrición mineral, y la fertilización de pasturas es una práctica recomendada para aumentar la oferta de pasto. Sin embargo, en nuestro país esta práctica es poco utilizada.

A continuación, se presentarán algunos criterios generales para planificar estrategias de fertilización integradas en las BPMP, que cubran los requerimientos nutricionales para pasturas de alta producción de forraje de calidad, logren elevada productividad animal y aporten a la sustentabilidad en los sistemas ganaderos regionales.

1. Techos productivos de las pasturas perennes en la región pampeana

Tradicionalmente, los sistemas ganaderos de la región pampeana se caracterizaron por una producción forrajera inferior a los techos productivos. Recavarren (2016) relevó producciones de pasturas en el sur de la Pampa Deprimida (Buenos Aires) con valores promedio desde 4300 kg MS/ha/año para pasturas de campo con aptitud ganadera a 7300 kg MS/ha/año para pasturas de campos con mejor aptitud. Las producciones de carne fueron de 100 kg carne/ha/año en cría a

200 kg de carne/ha/año en recría (Recavarren, 2016).

Sin embargo, estos recursos tienen un elevado potencial de producción de forraje que varía entre 7000 - 10 000 kg MS/ha/año en campos ganaderos con limitantes productivas, a 12 000 - 15 000 kg MS/ha/año en lotes de mejor aptitud, o aún superiores cuando se incluyen especies como alfalfa en ambientes sin limitaciones. Eficientemente utilizados estos recursos pueden convertirse en altas productividades secundarias (carne, leche, etc.). En la **Tabla 1** se muestran resultados de producción de carne en la región pampeana para tres casos de recría pastoril, una invernada pastoril y tres ejemplos de recría-invernada base pastoril con suplementación. Entre los principales motivos que explican las diferencias planteadas entre las producciones de los sistemas ganaderos tradicionales y los techos productivos esperables en los nuevos modelos ganaderos se destacan: desajustes en la cosecha del forraje y la generalizada subnutrición de las especies forrajeras por escaso o nulo uso de fertilizantes. Ambos inconvenientes son abordados integralmente cuando se implementan las BPMP. Sin embargo, para cuantificar adecuadamente el impacto de la aplicación de las BPMP y aprovechar sus beneficios productivos, es recomendable - al menos inicialmente - implementar estas BPMP en superficies acotadas que representen una pequeña proporción del establecimiento ("Ganadería por Módulos"). Esto permitirá conocer mejor la dinámica de manejo de los recursos forrajeros de alta producción y adecuar el funcionamiento del sistema en forma integral, lo que incluye con prioridad la capacitación del personal.

Tabla 1. Producción de carne con base forrajera pastoril en la región pampeana Húmeda.

	Especie - Zona	Época/Duración	Carga (cab/ha)	Producción (kg carne/ha)
RECRÍA	Festuca alta, SEB (1)	Otoño-Invierno (mar.-ago.)	3.4	369
	Agropiro, SEB (2)	Primavera (Sept.-dic.)	5	370
	Agropiro, SEB (3)	Primavera (Oct.-dic.)	12.5	604
RECRÍA-INVERNADA	Alfalfa - Festuca, P (4)	Anual	4 - 5.5	731 - 848
	Alfalfa-gramínea, PN (5)	Anual	--	1032
	Alfalfa-gramínea, CC (6)	Anual	4	848
	Festuca-Trébol-Alfalfa, SEB (7)	Anual	4.5	790

1) Recavarren, 2012; 2) Arnaude, 2013; 3) Planiscich, 2015; 4) Scheneiter y Amendola, 2009; 5) Kloster et al., 2003; 6) De León y Giménez, 2008; 7) Hara, 2017. Zona sudeste bonaerense (SEB), Pampeana norte (PN), Centro de Córdoba (CC) y Pergamino (P).

2. Buenas Prácticas de Manejo de Pasturas: Utilización del forraje

Los nuevos planteos ganaderos de carne o leche reconocen la importancia de contar con pasturas de alta producción en la cadena forrajera. Para manejar convenientemente estos recursos deben considerarse algunos aspectos ecofisiológicos de las plantas forrajeras (Agnusdei et al., 2013; Chapman, 2016). El forraje cosechado está conformado básicamente por hojas, y en la mayoría de las gramíneas forrajeras templadas cada macollo puede sostener tres hojas vivas (**Figura 1**).

Estas hojas tienen una vida relativamente corta de 300 - 400°Cd (equivalente a 40-60 días en invierno y 25 días o menos en primavera-verano), pasado ese tiempo la hoja muere, lo que implica que el forraje se pierde por senescencia (**Figura 1**). Asimismo, a medida que avanza el período de crecimiento (rebrote) las hojas crecen y la disponibilidad de materia seca aumenta, con una progresiva pérdida de calidad nutritiva para los animales (Agnusdei et al., 2013). Entonces, para cosechar eficientemente el forraje producido es necesario llevar a cabo defoliaciones periódicas antes que la pérdida por senescencia iguale o supere el crecimiento foliar (producción de forraje de calidad). En pasturas correctamente manejadas (es decir cespitosas, densas y foliosas), el estado de tres hojas vivas indica que las pasturas están interceptando la totalidad de la luz solar incidente y pasado ese tiempo no se generará más forraje de calidad (**Figura 2**, Chapman, 2016). Luego de una defoliación, el rebrote subsiguiente reiniciará un nuevo ciclo de crecimiento de forraje de calidad. Considerando esta dinámica, sin deficiencias hídricas pronunciadas ni limitaciones nutricionales, en gran parte de la región las pasturas perennes podrían ser cosechadas 8 a 10 veces al año. A modo de ejemplo, si en cada defoliación se cosecha aproximadamente 1 t MS/ha esto equivale a 8 - 10 t MS/ha/año cosechadas y transformadas en producto animal (15 kg MS/kg carne o 1 kg MS/L leche producidos) representarían alrededor de 530 a 670 kg carne/ha/año u 8000 a 10 000 L leche/ha/año. Este objetivo se puede lograr si se cosecha eficientemente el forraje producido.

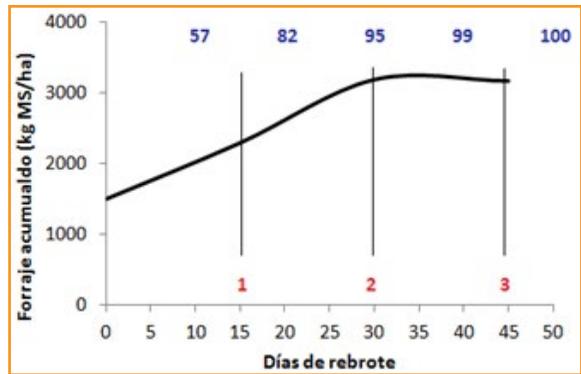


Figura 2. Ejemplo de un rebrote de una pastura de rai-grás perenne seguido de una defoliación (disponibilidad inicial = 1500 kg MS/ha). Por debajo de la curva, los números rojos indican el número de hojas completamente expandidas (1, 2 y 3) y por encima de la curva, los números azules indican los porcentajes de interceptación de radiación solar. Adaptado de Chapman (2016).

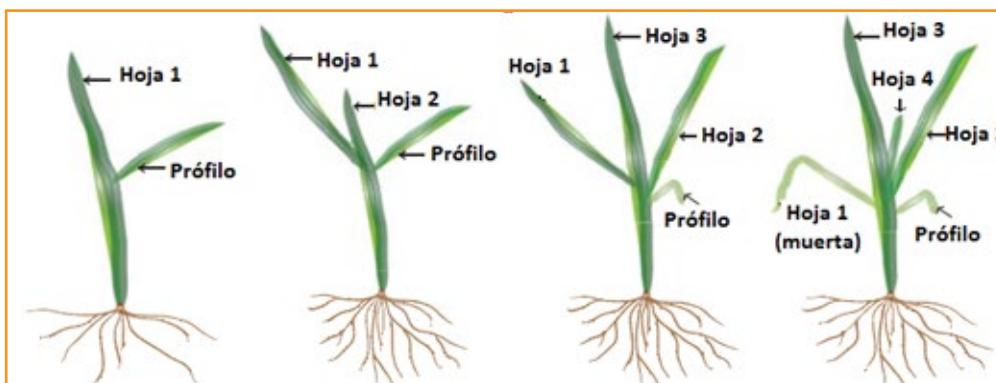


Figura 1. Diagrama de la evolución en el tiempo de la aparición y senescencia de hojas en un macollo de gramínea forrajera (Pródilo: Primera hoja no verdadera de cada macollo).

3. Buenas Prácticas de Manejo de Pasturas: Fertilización

a. Requerimiento de nutrientes

Las especies forrajeras requieren cantidades relevantes de macro y micronutrientes para crecer y producir forraje. Los contenidos de nutrientes en planta son variables según especies, estado fenológico y condiciones de crecimiento (**Tabla 2**).

Las especies leguminosas se pueden proveer de nitrógeno (N) atmosférico a través de la fijación simbiótica (FBN), lo cual les permite mantener el contenido de N en planta aún con bajo aporte de N edáfico (Anglade et al., 2015). En cambio, son dependientes del suministro de fósforo (P) del suelo y, en algunos casos particulares pueden surgir deficiencias de azufre, boro, etc. (Fontanetto et al., 2010).

Por su parte, para las gramíneas forrajeras ya sea puras o en mezclas con leguminosas, no sólo el P sino también el N generalmente restringen la producción de forraje. Parte del N de origen simbiótico provisto por las leguminosas puede ser transferido a las gramíneas, pero este aporte

no es directo y normalmente no cubre sus requerimientos (Marino et al., 2016).

Cabe destacar, que la demanda de nutrientes varía estacionalmente siguiendo el ritmo de crecimiento de cada especie forrajera (**Figura 3**). En general, la demanda de nutrientes se incrementa con las altas tasas de crecimiento en primavera, son intermedias en otoño y mínimas en invierno

Una pastura que produce 10 000 kg MS ha⁻¹ año⁻¹ requiere unos 20-30 kg P/ha y 200-300 kg N/ha, esto puede cubrirse en parte con el aporte del suelo y la diferencia con los valores requeridos debería ser estratégicamente abastecida con fertilizantes según la demanda estacional de nutrientes.

b. Productividad de las pasturas y cantidad de nutrientes requeridos

La demanda de nutrientes de los recursos forrajeros depende de la aptitud del ambiente y el rendimiento esperado. Los nuevos modelos ganaderos ocupan desde los tradicionales campos de aptitud ganadera (con severas limitantes para la realización de cultivos) hasta lotes con pocas o sin limitaciones productivas (**Figura 4**). Para cada condición edáfica existen especies adaptadas para crecer y producir forraje. Sin embargo, en cada situación los rendimientos y, consecuentemente, la demanda de nutrientes varían según el grado de limitación que impone el ambiente edáfico, el clima y el manejo del recurso.

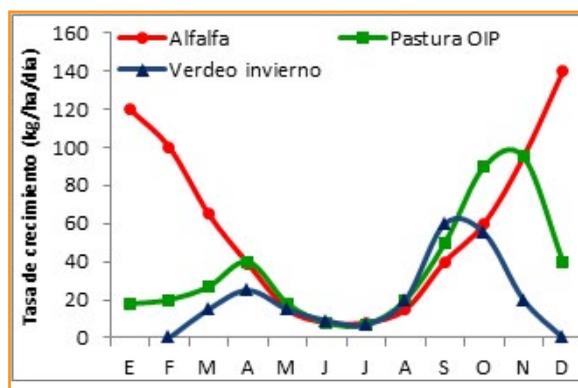


Figura 3. Tasas de crecimiento de especies forrajeras perennes (pasturas de producción otoño-inverno-primaveral -OIT-, alfalfa) y anuales (verdeo invernal) estimadas para el centro de Santa Fe.

Tabla 2. Requerimiento de macronutrientes en especies forrajeras (Marino y Berardo, 2014).

Especie	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio	Azufre
	----- kg t ⁻¹ MS -----					
Alfalfa	33-42	2-4	22-25	13-16	26-3.3	2.8-3.3
Tréboles	22-35	3	20-26	11-14	5-7	2-2.6
Gramíneas (C3)	33-38	2.4-3.4	20-22	4-5	2.2-2.6	2
Gramíneas (C4)	20-26	2.5-3.5	17-23	3-4	2-2.3	2.9-3.1

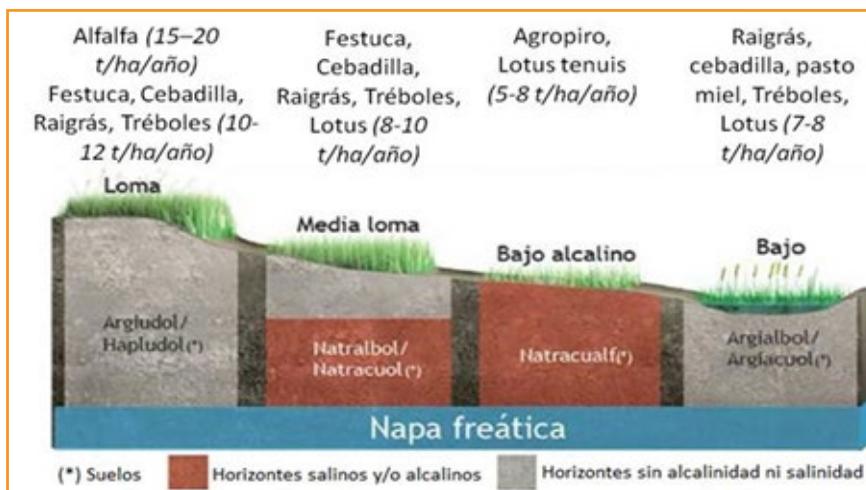


Figura 4. Ambientes edáficos ganaderos, pasturas adaptadas para producir en cada condición y los rendimientos de forraje esperados (Adaptado de Rodríguez y Jacobo, 2012).

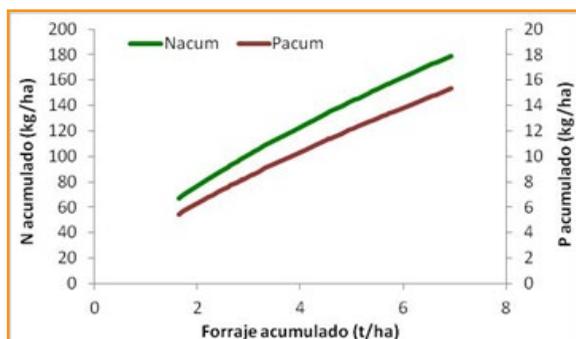


Figura 5. Relación entre el N acumulado ($N_{cr} = 48 \text{ MS } 0.68$, Lemaire y Gastal, 2009) y el P acumulado ($P_{cr} = 3,84 \text{ MS } 0,715$, Marino et al., 2000) en biomasa aérea de festuca en relación a la acumulación de forraje en pasturas de festuca alta.

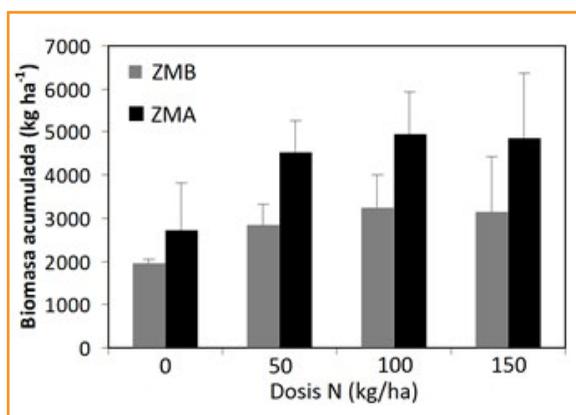


Figura 6. Producción de forraje primaveral de agropiro en función de la zona de manejo (ZMA y ZMB) y la fertilización nitrogenada (0, 50, 100 y 150 kg N/ha).

En la medida que mejora la aptitud del ambiente y aumenta la producción de forraje, se incrementa la cantidad de P y de N absorbidos para cubrir los requerimientos de las plantas. A modo de ejemplo, en la **Figura 5** se presenta para una pastura de festuca alta durante el transcurso de un rebrote (sin otras limitantes agronómicas), las cantidades de N y P absorbidas. Las estimaciones se realizaron a partir de modelos de dilución de N (Lemaire y Gastal, 2009) y P (Marino et al., 2000) críticos.

Adicionalmente, los lotes ganaderos suelen presentar elevada heterogeneidad de suelos, por lo cual su ambientación permitiría delimitar zonas y aplicar estrategias de manejo diferenciales con el objetivo de incrementar la eficiencia en el uso de recursos y aumentar la producción de forraje (Peralta et al., 2015; Cicore et al., 2016). En la **Figura 6** se muestran resultados de la aplicación de N en primavera en un lote de agropiro en el cual se midió la conductividad eléctrica aparente (CEa) con un equipo Veris, y a partir de ella el lote fue dividido en dos zonas de manejo (ZMA y ZMB) (Cicore et al., 2016). En primavera avanzada se registraron respuestas significativas a la fertilización nitrogenada, pero fueron superiores en la ZMA respecto de la ZMB (Figura 6). La variación espacial observada en la respuesta al N aplicado en primavera tardía estaría asociada a que, en una época con deficiencias hídricas, el agropiro en la ZMA habría contado con mayor disponibilidad de agua que en la ZMB. Estos datos muestran que manejar homogéneamente el lote podría haber sido ineficiente. Sin fertilización nitrogenada la productividad del lote habría sido baja aún en la ZMA, mientras que la aplicación de una alta dosis de N a todo el lote habría sido desaprovechada en la ZMB.

c. Demanda de nutrientes según las condiciones climáticas

La temperatura es uno de los factores determinantes del crecimiento vegetal. Para especies forrajeras templadas a 10°C (media diaria del aire), las plantas comienzan a crecer activamente, y entre 20 y 25°C se logra óptimo crecimiento. Por debajo de 4-5°C, las forrajeras templadas se mantienen vivas, pero no crecen. En base a esto, en la región pampeana, sin deficiencias hídricas ni nutricionales, las pasturas perennes podrían crecer y producir forraje al menos siete meses del año con valores mínimos sólo en la época invernal.

Cuando la temperatura es favorable, la disponibilidad de agua (balance entre lluvias, almacenaje de agua en el suelo y evapotranspiración de la cubierta) ejerce el control sobre el crecimiento de las plantas forrajeras. En la **Figura 7** se muestran datos climatológicos del centro de la provincia de Santa Fe (EEA INTA Oliveros). La temperatura media del aire permanece por encima de 10°C durante todo el año (**Figura 7a**). Sin embargo, con aproximadamente 1000 mm anuales, el balance hídrico (lluvias - evapotranspiración potencial) puede ser negativo desde mediados de la primavera y durante el verano (**Figura 7b**), esto limita las tasas de crecimiento y la demanda de nutrientes.

d. Oferta de nutrientes del ambiente

Considerando la variación espacial en los contenidos de P (Sainz Rozas et al., 2012) y de

materia orgánica (Sainz Rozas et al., 2010) en los suelos de la región pampeana, puede asumirse que en condiciones naturales la disponibilidad de P y N puede resultar insuficiente para cubrir los requerimientos de recursos forrajeros de alta producción.

Por otra parte, la cantidad de N en el suelo está asociada con el contenido de materia orgánica de los suelos y su disponibilidad varía estacionalmente en función de la mineralización (Echeverría y Bergonzi, 1995). En general, la cantidad de N mineralizado aumenta en la época cálida, pero cuando las forrajeras templadas inician su activo crecimiento a la salida del invierno-inicio de la primavera, la disponibilidad en los suelos es generalmente mínima.

Como se mencionó, otra fuente de N para las leguminosas forrajeras es la FBN. La cantidad de N fijado depende del crecimiento de las leguminosas, pero ante una biomasa determinada existe una amplia variabilidad explicada por factores como la especie y el suministro de N edáfico (Soussana y Tallec, 2010). Anglade et al. (2015) establecieron que la cantidad de N derivado de la atmósfera en leguminosas forrajeras presenta una estrecha relación positiva y lineal con la acumulación de N en la biomasa aérea (**Figura 8**). Consecuentemente, cualquier factor que influya el crecimiento de las plantas (clima, suelo, disponibilidad de nutrientes, enfermedades o plagas) afectará la cantidad de N fijado. Estos autores indican que, por cada kg de N presente en la biomasa aérea de las leguminosas, 0.75 - 0.80 kg N corresponden a la FBN, cubriendo sus requerimientos de N. En este

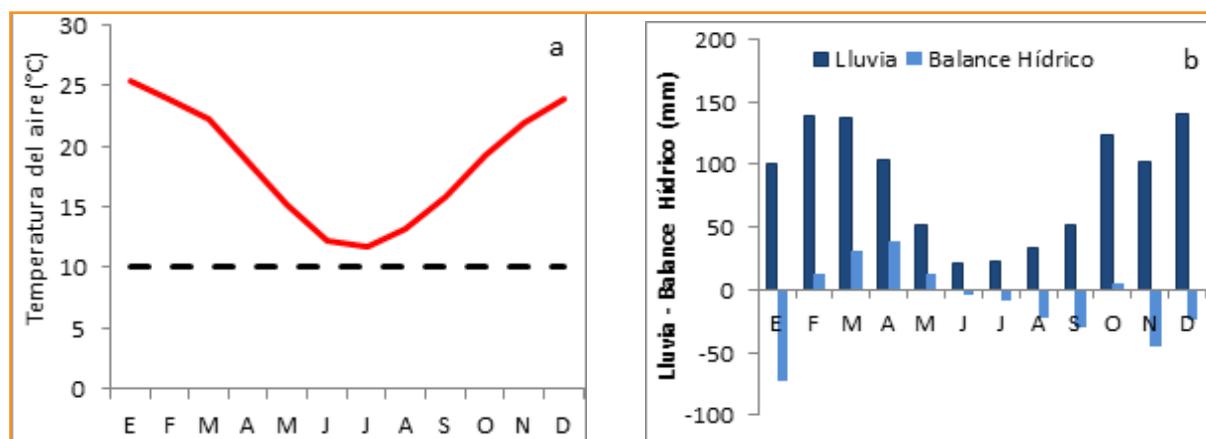


Figura 7. a) Promedio mensual de la temperatura media diaria del aire (°C, línea roja continua) y umbral térmico de crecimiento (línea negra discontinua) y b) Lluvias y balance hídrico (lluvias - evapotranspiración potencial) para el sudeste de Santa Fe (EEA INTA Oliveros. Fuente SIGA - INTA).

punto, la bibliografía coincide en establecer la importancia de la FBN no sólo para la producción de forraje sino también para el sistema productivo (Ledgard, 2009; Anglade et al., 2015). Pero si bien este aporte podría influir sobre la fertilidad del sistema suelo-planta (Ledgard, 2009), no cubrirá la totalidad de los requerimientos de N de pasturas consociadas con gramíneas de alta producción.

e. Diagnóstico del estado nutricional de recursos forrajeros

Al igual que para cultivos agrícolas, para ajustar los requerimientos de fertilización es indispensable tener información sobre la oferta desde el suelo y el estado nutricional de los recursos forrajeros. Sin embargo, su determinación puede ser compleja debido a la diversidad de especies y su consociación en pasturas mixtas, la variación estacional del crecimiento en recursos perennes, la forma de utilización (pastoreo o corte), la presencia de deyecciones que pueden contaminar las muestras, etc. Las metodologías más utilizadas son los análisis de suelos y/o de plantas.

La determinación del contenido de nutrientes disponibles en el suelo al momento de la siembra de especies forrajeras no difiere de la metodología empleada en cultivos agrícolas, tanto en sistemas de labranza convencional como en siembra directa. Para P se recomienda la fertilización sobre todo cuando la disponibilidad edáfica es baja (< 15 ppm según el método de Bray). Por su dinámica en el suelo, puede considerarse su aplicación para cubrir los requerimientos de las

plantas en períodos relativamente prolongados (por ejemplo, un ciclo de crecimiento anual).

En pastizales naturales y en pasturas perennes ya implantadas, la disponibilidad de algunos nutrientes como N y S suelen ser bajos debido a que en la medida en que pasan a la fracción disponible son absorbidos por las plantas o inmovilizados en la biomasa microbiana. En estos casos, la utilización de algún parámetro que permita estimar la disponibilidad de N o su mineralización durante el período de crecimiento (como el método de N incubado en anaerobiosis, Echeverría et al., 2000) podría resultar de utilidad para mejorar el diagnóstico.

El análisis de planta aporta información precisa sobre el contenido de nutrientes en la biomasa aérea de los recursos forrajeros. Para realizarlo correctamente es necesario considerar aspectos que afectan la concentración de los nutrientes en las plantas como es el estado de desarrollo (Marino et al. 2004; Lemaire y Gastal, 2009; Agnusdei et al., 2010), la parte u órgano seleccionado y otros factores como ocurrencia de déficit hídrico (Errecart et al., 2014), enfermedades, etc.

Actualmente, existen métodos alternativos rápidos y no destructivos para estimar indirectamente el estado de nutrición nitrogenada de las plantas. Medidores portátiles (como Minolta SPAD-502) permiten obtener una estimación del contenido de clorofila en las hojas. Esta técnica fue probada localmente en pasturas de agropiro (Di Salvo, 2001) y de festuca (Di Salvo, et al., 1999; Errecart et al., 2012).

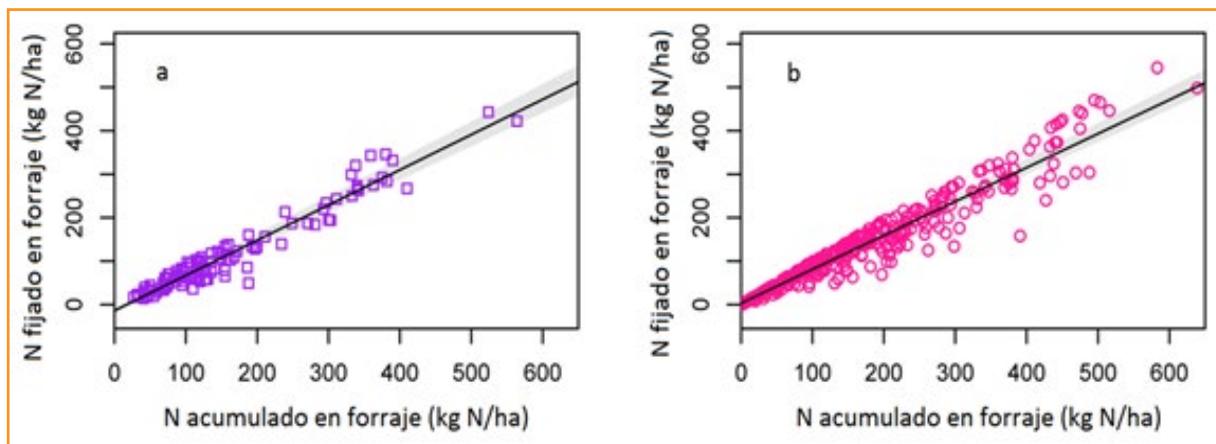


Figura 8. Relaciones entre N acumulado en forraje y cantidad de N fijado en alfalfa (a) y trébol (b). Las líneas indican las regresiones lineales ajustadas y los polígonos sombreados el intervalo de confianza 95% (Anglade et al., 2015).

f. Impacto de la deficiencia de nutrientes en sistemas ganaderos

En la región, las principales deficiencias de nutrientes están asociadas con niveles insuficientes de P y de N para satisfacer la demanda de las plantas. Estas deficiencias suelen afectar:

- a) las tasas diarias de crecimiento y, por ende, la producción estacional de forraje;
- b) la densidad de plantas, el desarrollo radical y la capacidad para competir con las malezas;
- c) la eficiencia de uso del agua disponible (lluvias y almacenada en el suelo)
- d) la fijación simbiótica del N atmosférico en leguminosas;
- e) el contenido de proteína en el forraje;
- f) la persistencia de las pasturas;
- g) la estabilidad productiva a través de los años;
- h) el aporte de materia orgánica al suelo (raíces y forraje no consumido).

Se reconoce que la deficiencia P y N suele ser uno de los principales factores limitantes del crecimiento de las plantas y de la producción de forraje. Sin embargo, desajustes al momento de la fertilización (nutriente aplicado, momento de aplicación, dosis, etc.) así como ineficiencias en el aprovechamiento del forraje suelen disminuir las respuestas esperadas. Cabe destacar que el uso inadecuado de estos insumos no sólo resulta costoso en términos económicos, sino que puede perjudicar la producción de forraje y al medio ambiente.

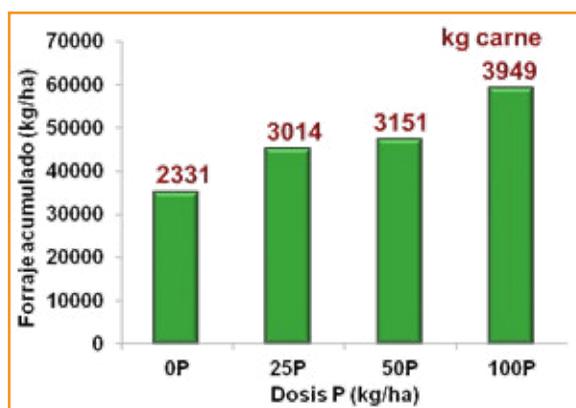


Figura 9. Producción de forraje (acumulado tres años) en una pastura de alfalfa según la dosis de P aplicado. Los números sobre las barras indican la producción de carne (considerando una eficiencia de conversión de 15 kg MS/kg carne) (Adaptado de Berardo y Marino, 2000).

g. Respuesta a la aplicación de P y de N

- Fertilización fosfatada

En pasturas perennes deficientes en P, la respuesta a la fertilización debe cuantificarse teniendo en cuenta la producción acumulada por más de un año, ya que este nutriente permite aprovechar un "efecto residual" que se registra no sólo en el año de su aplicación sino también en los años posteriores. En la región, considerando la producción de dos o tres años, serían esperables respuestas de 250 - 300 kg MS/kg P aplicado si otras limitantes edáficas, hídricas o de manejo no restringen el crecimiento de las plantas (Marino y Berardo, 2014). En la **Figura 9** se muestra la producción de forraje de tres años en una pastura de alfalfa con dosis de P aplicadas a la siembra. Además, se muestran los valores de producción de carne (relación 15 kg MS/kg carne) con un incremento estimado en la producción del 69% para la mayor dosis de P aplicada con respecto al tratamiento sin P.

- Fertilización nitrogenada

La deficiencia de un sólo nutriente puede limitar el crecimiento de las plantas a pesar que otros se encuentren en cantidad suficiente. Por lo tanto, se debe considerar la necesidad de realizar una fertilización balanceada que aporte los nutrientes deficitarios para la pastura. En pasturas mezcla de gramíneas y leguminosas es necesario controlar los aportes tanto de P como de N. En la **Figura 10** se muestran las producciones de

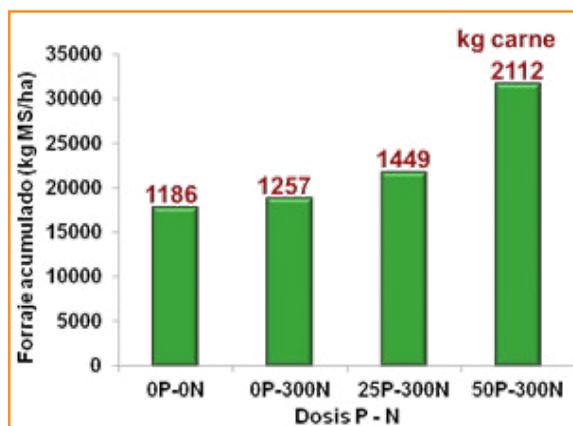


Figura 10. Producción de forraje (tres años) en una pastura mezcla (festuca, pasto ovido, trébol rojo y trébol blanco) según la dosis de P y N. Los números sobre las barras indican la producción de carne (considerando una eficiencia de conversión de 15 kg MS/kg carne). Adaptado de Marino y Berardo, 2000).

forraje obtenidas en tres años de evaluación según dosis variables de P (aplicados a la siembra) y de N (100 kg N/ha/año aplicados a la salida del invierno al voleo sobre la cubierta vegetal). Para pasturas base gramíneas, el tratamiento con la mayor dosis de P y aplicación anual de N representa una producción de carne 78% mayor que el tratamiento sin fertilización (0P-0N) (**Figura 10**). Con bajos niveles de P en el suelo, la respuesta a la fertilización nitrogenada estaría restringida, al igual que para las aplicaciones de P sin agregado de N. La mayor respuesta a la fertilización se registró con la aplicación balanceada de P + N. Esto también ha sido demostrado en otras zonas de la región para pasturas de alfalfa en el centro-este de Santa Fe con la aplicación de P, S, Ca y Mg (Fontanetto et al., 2010) o con N y P para verdeos invernales en La Pampa (Quiroga et al., 2007).

Además de reducir la producción de forraje/ha, las deficiencias de P o N disminuyen las tasas de crecimiento de las especies forrajeras. Por esto,

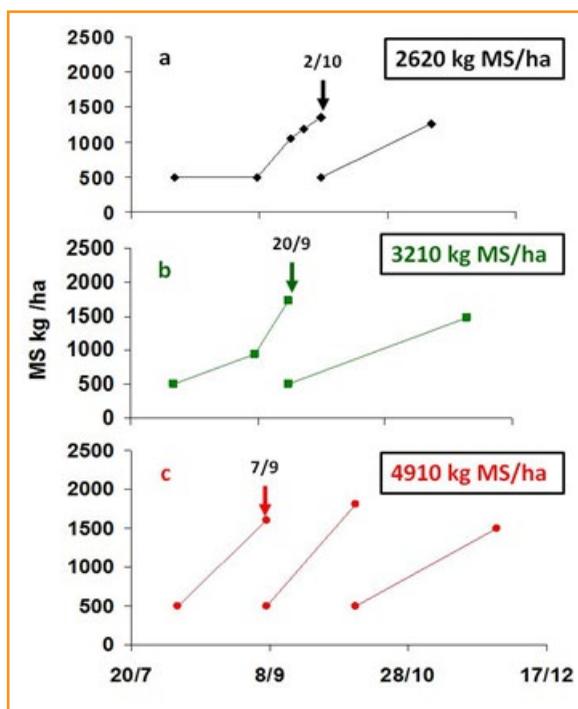


Figura 11. Utilización del forraje producido en raigrás anual con aplicación de P no limitante (a), P + 50 kg N/ha (b) y P + 150 kg N/ha. Aplicación de N a fin de invierno. Las flechas indican las fechas de primera utilización post-fertilización. Las cifras en los recuadros son las acumulaciones de forraje (kg MS/ha) para el período invierno-primaveral.

las pasturas base gramíneas convenientemente nutridas con N "anticipan" la oferta de forraje 20 - 30 días (según la dosis utilizada y el momento de aplicación), con respecto a pasturas con deficiencias nutricionales. Este adelantamiento del pastoreo (o de la utilización con cortes) es un factor clave para el manejo en los establecimientos pastoriles sobre todo en épocas críticas como la salida del invierno. Para aprovechar esa disponibilidad anticipada de forraje producto de la fertilización, se debe ajustar la carga animal a la oferta de forraje. En la **Figura 11** se muestra el crecimiento de raigrás anual con P no limitante y el agregado de dos dosis de N aplicadas a la salida del invierno (Balcarce). Como muestran las flechas, el tratamiento con aplicación de P+50N adelanta la fecha de primera utilización y aumenta la producción acumulada de forraje con respecto al tratamiento que recibió sólo P. Con la aplicación de P y una dosis más elevada de N (P+150N), el adelantamiento y la producción acumulada de forraje son mayores, y se obtiene una cosecha adicional del recurso avanzada la primavera. Sin una ajustada cosecha del forraje extra producido por la fertilización se habría subestimado la respuesta obtenida.

A diferencia de lo que ocurre con el P, el manejo del N en pasturas de alta producción debe considerar su elevada movilidad en el sistema suelo-planta y su aplicación se debe realizar considerando el crecimiento esperado a corto plazo, es decir para cada estación de crecimiento. Las respuestas en la producción de forraje son de diferente magnitud según la época de aplicación del N y de las condiciones climáticas (básicamente temperatura y agua) en el momento de la fertilización y durante el período de crecimiento. Las mayores respuestas al agregado de N suelen registrarse a la salida del invierno debido que las condiciones climáticas en el comienzo de la primavera favorecen el crecimiento de las plantas en una época de mínima disponibilidad de N edáfico. Las menores respuestas de fertilizaciones nitrogenada en la época otoño-invernal podrían asociarse también con las bajas temperaturas y al escaso crecimiento durante la estación fría. Sin limitaciones de P ni hídricas y con una eficiente cosecha del forraje, se han registrado respuestas de 1 - 2 kg carne/kg N aplicado a la salida del invierno y alrededor de 0.5 kg carne/kg N aplicado en otoño. Es importante mencionar que, aunque las respuestas al N aplicado en

otoño son inferiores a las de aplicaciones de fin de invierno-inicio de primavera, la importancia de las primeras radica en el incremento de la producción de las pasturas en la época invernal, un período crítico para los sistemas ganaderos. Resultados similares se obtuvieron en pasturas de agropiro.

La fertilización otoñal puede ser una opción válida cuando las condiciones climáticas favorecen el crecimiento en esa época más que en primavera (asociado a la distribución de las precipitaciones), o en pasturas con especies que crezcan en otoño-invierno y se encuentren limitadas por el suministro de N edáfico. Un ejemplo de este caso son las gramíneas de ecotipo mediterráneo (festuca mediterránea o falaris) en pasturas puras o mezclas con leguminosas como alfalfa (Marino et al., 2016).

Por último, al manejar la fertilización nitrogenada en pasturas se debe considerar que, a diferencia de los cultivos agrícolas que en su mayoría se cosechan en un único momento del ciclo productivo, las pasturas requieren cosechas periódicas a fin de mantener cubiertas productivas la mayor parte del año. Fertilizar las pasturas con una cantidad uniforme de N unificaría la oferta de forraje en un mismo momento y reduciría la eficiencia de cosecha. Los sistemas ganaderos deben ofrecer forraje continuamente y la fertilización diferenciada puede contribuir al escalonamiento en la oferta de forraje (Agnusdei et al., 2013). En períodos en los que se necesita aumentar y adelantar el forraje disponible, con condiciones climáticas favorables se puede aumentar la dosis de fertilización en superficies acotadas que se utilicen eficientemente (ejemplo fin del invierno en el sudeste bonaerense). En cambio, en épocas que se prevean excedentes forrajeros (ejemplo primavera avanzada), o cuando los pronósticos climáticos no son favorables (sequías o excesos hídricos) se desaconseja la aplicación de N.

Consideraciones finales

Para aumentar la eficiencia de uso de fertilizantes en los nuevos modelos ganaderos pampeanos sería importante:

- Establecer, al menos inicialmente, módulos para manejo de pasturas de alta producción (Ganadería por Módulos) en una pequeña proporción del establecimiento. Esto permitiría poder utilizar eficientemente el forraje

producido y cuantificar los beneficios de la implementación de las BPMP.

- Planificar la producción y distribución de la oferta forrajera de pasturas y verdes.
- Aplicar N y P en función de la demanda de las plantas y de la cantidad disponible en cada ambiente.
- Priorizar la fertilización en ambientes con menos limitaciones para la producción de las pasturas.
- Tener presente que el éxito de la fertilización de recursos forrajeros depende de su integración con las BPMP.

Bibliografía

- Agnusdei, M.G., Colabelli, M.R., Fernández Grecco, R.C. 2001. Crecimiento estacional de forraje de pasturas y pastizales naturales para el sudeste bonaerense. Boletín técnico n° 152.
- Agnusdei, M.G., Assuero S.G., Lattanzi, F.A., Marino, M.A. 2010. The use of the Nitrogen Nutrition Index to predict responses to N fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 88 (2):215-230.
- Agnusdei, M.G., Marino, M.A. y Errecart, P. 2013. Buenas prácticas de manejo de pasturas. Pasturas 2013: Claves para producir más y mejor. 39-55. Jornada Técnica. 8 de abril 2014, C.A.B.A.
- Anglade, J., Billen, G. y Garnier, J. 2015. Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: Incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere* Vol. 6(3): 1-24.
- Arnaude, M., Di Marco, O.N. y Agnusdei, M.G. 2015. Agropiro: una cuestión de manejo. *Visión Rural*. Año XIX 93: 5-7.
- Berardo, A. y Marino, M.A. 2000. Producción de forraje de alfalfa bajo diferentes niveles de nutrición fosfatada en el sudeste bonaerense. *Rev. Arg. Prod. Anim.* Vol 20 N° 2:93-101. ISSN 0326 - 0550.
- Chapman, D. 2016. Using Ecophysiology to Improve Farm Efficiency: Application in Temperate Dairy Grazing Systems. *Agriculture* 2016, 6, 17; doi:10.3390/agriculture6020017
- Cicore, P.L., Tancredi, M., Berone, G.D., Peralta, N.R., Marino, M.A. y Costa, J.L. 2016. Respuesta de Agropiro alargado al nitrógeno en función de zonas de manejo delimitadas mediante la conductividad eléctrica aparente. *Rev. Arg. Prod. Anim.* Vol. 36 Supl. 1:309.
- De León, M. y Giménez, R. 2008. Invernada intensiva basada en pasturas de alfalfa. Cartilla Digital Manfredi. ISSN On line 1851-7994. Estación Experimental Agropecuaria Manfredi. Ediciones INTA.
- Di Salvo, M., 2001. Estimación del estado de nutrición nitrogenada de pasturas de agropiro y festuca mediante un índice de verdor. Tesis M.Sc. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias, Balcarce, Argentina, p. 66.

- Di Salvo, M., Lattanzi, F., Echeverría, H., 1999. Relación entre el índice de verdor y la concentración de nitrógeno en *Festuca arundinacea*. Schreb. Rev. Arg. Prod. Anim. 19, 291-299.
- Echeverría, H.E. y Bergonzi, R. 1995. Estimación de la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. CERBAS, Centro Regional Buenos Aires Sur. INTA EEA Balcarce. Boletín Técnico N° 135. 15p.
- Echeverría, H.E., San Martín, N.F. y Bergonzi, R. 2000. Métodos rápidos de estimación de nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos. Ciencia del Suelo 18 (1): 9-16.
- Errecart, P.M., Agnusdei, M.G., Lattanzi, F.A., Marino, M.A. 2012. Leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings as predictors of tall fescue nitrogen nutrition status. Field Crops Research 129: 46-58.
- Errecart, P.M., Agnusdei, M.G., Lattanzi, F.A., Marino, M.A., Berone, G. 2014. Critical N concentration declines with soil water availability in Tall Fescue. Crop Science 54 (1):1-13. On line ISSN: 1435-0653 Print ISSN: 0011-183X.
- Fariña, S.R., García, S.C. y Fulkerson, W.J. 2011. A complementary forage system whole-farm study: forage utilisation and milk production. Animal Production Science, 2011, 51, 460-470.
- Franzluebbers, A. y Sawchik, J. 2012. Agronomic and Environmental Impacts of Grass-Crop Rotations. II International Symposium on Integrated Livestock-Crop Systems. ICLS 2012, Porto Alegre, Brazil, Session I.
- Hara, S.M. 2017. Evaluación integrada de un sistema de invernada intensiva de base pastoril: estudios en módulo y modelación. Tesis Magister Scientiae. en Producción Animal. Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Kloster, A.M. 2011. Productividad de carne sobre pasturas mixtas de alfalfa y festuca en el sudeste de Córdoba. Revista Aapresid. Planteos Ganaderos en SD. Vol.1: 61-66.
- Ledgard, S., Schils, R., Eriksen, J. y Luo, J. 2009. Environmental impacts of grazed clover/grass pastures. Irish Journal of Agricultural and Food Research 48: 209-226.
- Marino, M. A. y Berardo, A. 2000. Fertilización fosfata de pasturas en el sudeste bonaerense. II - Efecto de la aplicación de nitrógeno sobre la respuesta a fósforo. Rev. Arg. Prod. Anim. Vol 20 N° 2:113-121. ISSN 0326 - 0550.
- Marino, M.A. y Berardo, A. 2014. Capítulo 20: Pasturas y pastizales naturales. En: Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ed.: Hernán E. Echeverría, Fernando O. García. Ediciones INTA. 908 p. ISBN 978-987-521-565-8. Pág.: 555-583.
- Marino, M.A., Cantarella A., Agnusdei, M. y Echeverría, H.E. 2000. Crecimiento invierno-primaveral de agropiro y festuca. 2. Dilución de fósforo en la biomasa aérea acumulada. Rev. Arg. Prod. Anim. Vol 20 Sup. 1: 157-158. ISBN-ISSN 0326-0550.
- Marino, M.A., Berone, G.D., Clausen, L. y Nuñez Luca-nera, M. 2016. Producción de pasturas alfalfa-festuca mediterránea según el momento de fertilización nitrogenada en el sudeste bonaerense. Rev. Arg. Prod. Anim. Vol 36 Supl. 1: 295-411. ISBN-ISSN 0326-0550.
- Mulliniks, J.T., Rius, A. G., Edwards, M. A., Edwards, S. R., Hobbs, J. D. y Nave, R. L. G. 2015. Improving efficiency of production in pasture- and range-based beef and dairy systems. J. Anim. Sci. 2015.93 doi:10.2527/jas2014-859.
- Peralta, N.R., Cicore, P.L., Marino, M.A., Marques da Silva, J.R. y Costa, J.L. 2015. Use of geophysical survey as a predictor of the edaphic properties variability in soils used for livestock production. Spanish Journal of Agricultural Research 13(4): 1-8. eISSN: 2171-9292 <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2015134-8032>
- Planiscich, A.M. 2015. Pastoreo de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*) en base a criterios ecofisiológicos: efecto sobre la pastura y la respuesta animal. Tesis Magister Scientiae. en Producción Animal. Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Mar del Plata. 70 p.
- Quiroga, A., Fernández, R. y Saks, M. 2007. Verdeos de invierno: requerimientos de agua y nutrientes y experiencias de fertilización en la región semiárida pampeana. EEA INTA Anguil, Anguil, La Pampa, Argentina.
- Recavarren, 2012. Manejo ecofisiológico de festucas puras en la Depresión de Laprida. Pasturas 2012. Jornada Técnica, Mar del Plata 23 de marzo de 2012.
- Recavarren, P. 2016. La producción agropecuaria en Olavarría, Benito Juárez, Laprida y Gral. La Madrid: evolución y desafíos a futuro. Ediciones INTA, 2016. ISBN 978-987-521-767-6
- Rodríguez, A., y E. Jacobo. 2012. Manejo de pastizales naturales para una ganadería sustentable en la pampa deprimida 1a ed. - Buenos Aires: Fund. Vida Silvestre Argentina. 98 p.
- Sainz Rozas, H., Echeverría, H. y Angelini, H. 2012. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. Informaciones Agronómicas N°2: 6-12.
- Sainz Rozas, H., Echeverría, H. y Angelini, H. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. RIA Vol. 38(1): 33-39.
- Scheneiter, O y Amendola, C. 2009. Producción de carne en mezclas de alfalfa y festuca alta con diferente patrón estacional de acumulación de forraje. Rev. Arg. Prod. Anim. 29 (2): 119-129.
- Sevilla, G. y Agnusdei, M.G. 2016. Efecto del agregado de fósforo y nitrógeno en el crecimiento de cultivos de alfalfa en rebrotes de primavera y verano en un suelo vertisol de Entre Ríos. RIA 42(1): 93-101.
- Soussana, J.E.; Tallec, T. 2010. Can we understand and predict the regulation of biological N₂ fixation in grassland ecosystems? Nutrient Cycling in Agroecosystems 88, 197-213. ●

Nutrición intensiva para planteos ganaderos intensivos

Gustavo A. Duarte* y Valeria Parra

Consultora DZD Agro S.R.L.

*Contacto: gaduarte@jsnet.com.ar

En este momento hay más de 7 mil millones de humanos que nos movemos sobre la tierra. Representa una enorme cantidad de bocas que alimentar. Para alcanzar a su mantenimiento de alimentación, a lo largo de siglos hemos transformado aproximadamente el 40% de la superficie total del planeta en campos de maíz y con ganado. El resultado de este cambio, es principalmente la generación de productos derivados de la agricultura y de su transformación en carne. Abundan las estimaciones que indican la población mundial para el año 2050 aumentaría a 9,6 mil millones y, de acuerdo a la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO), si queremos evitar la desnutrición masiva, tendremos - entre otras acciones - que incrementar la producción de alimentos en un 70%.

El problema es que la mayor parte de la tierra que podemos trabajar para la producción de alimentos ya está siendo cultivada. Resta alcanzar las cimas de las montañas, las arenas de los desiertos o los hielos de la Antártida. Para este crecimiento en superficie quedaría como única tierra factible de cultivar la derivada de la tala y la quema de selvas tropicales o de la transformación de los humedales... Difícilmente intentemos tal cambio en el planeta. Por lo tanto, tendremos que incorporar algunos cambios a gran escala en la forma en que cultivamos, en general, y, en particular, en la generación de recursos forrajeros para la producción ganadera y su efectiva transformación en carne. En esta presentación discutiremos algunos elementos a considerar para el logro de planteos intensivos de producción ganadera sustentados por la integración de sistemas intensivos de nutrición de su cadena forrajera.

Las praderas, tanto por sus aportes energéticos como nutricionales específicos son naturalmente el principal recurso alimenticio para el crecimiento de los rumiantes en pastoreo. La región pampeana cuenta con condiciones climáticas, edáficas y ecológicas que le permiten producir potencialmente grandes cantidades de biomasa, y, por consiguiente, de carne y leche. Esto se logra utilizando racionalmente los recursos forrajeros. Para explorar estas condiciones ventajosas, y obtener una alta producción de biomasa de calidad,

es indispensable conocer, además de los requerimientos de los animales, los requerimientos nutricionales del forraje, la disponibilidad de nutrientes en el suelo, y la interacción de estos factores con las condiciones climáticas de la región (**Figura 1**).

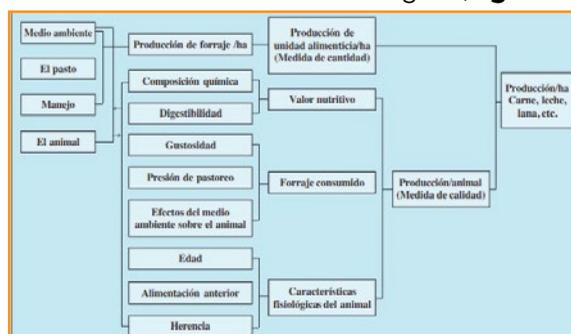


Figura 1. Representación de las relaciones naturales entre pasto, animal y manejo que determinan la producción animal (IPNI, 2003).

Son abundantes los estudios regionalmente desarrollados que sustentan variados planteos de manejo de la fertilización de pasturas, naturales e implantadas, procurando mejoras en su producción primaria neta. Estos estudios se encuentran disponibles en variadas publicaciones de revisión y destacan la contribución directa de la utilización de herramientas de diagnóstico de necesidades de fertilización para ajustar correcciones de fósforo, la aplicación estratégica de fertilización nitrogenada de tapices de gramíneas en complemento con otros nutrientes tales como el azufre y la inoculación con rizobios en la siembra de leguminosas (Quintero y Boschetti, 2008; Díaz-Zorita, 2008; Marino y Berardo, 2014). En la mayoría de las áreas pampeanas de producción de forrajes, la oferta natural de nutrientes limita la normal producción de las plantas y se recomienda la aplicación de fertilizantes para aumentar sus rendimientos. Es por esto que, entre los cambios a considerar para mejorar los resultados en los desafiantes sistemas ganaderos actuales, es de importancia considerar la integración en el uso de nutrientes más allá de sus aportes a la producción de biomasa con un enfoque dirigido a la oferta nutricional. Alcanzar y mantener un adecuado nivel de fertilidad de los suelos e incorporar un

programa equilibrado de nutrición vegetal es una parte importante del manejo de pasturas y otros recursos ligados a su conversión en carne

La calidad nutricional del pasto se mide por su digestibilidad, contenido de proteínas y de materia seca, estos factores son influenciados por la nutrición de las plantas. La digestibilidad depende de la fase de desarrollo y la nutrición. Por ejemplo, pasturas jóvenes con fuerte masa foliar tienen niveles de digestibilidad y materia seca más altos que las que han empezado a producir tallos florales, o contienen abundante material muerto. El nivel de proteínas, uno de los elementos base a considerar para la eficiente transformación forrajera en carne, depende entre otros elementos del estadio de desarrollo del forraje y es afectado por la condición general de nutrición del vegetal, en particular nitrogenada. Estacionalmente, los niveles de proteínas en los forrajes tienden a incrementarse hacia el fin del invierno. Además, la producción de proteínas depende de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo que puede ser absorbido por las plantas, además de los niveles de potasio y azufre, y del pH del suelo. En general, al mejorar la disponibilidad y captación de estos nutrientes y la presencia de condiciones de reacción del suelo próximas a la neutralidad contribuyen a lograr mayores concentraciones de proteínas en los forrajes producidos.

Las pasturas templadas de la región pampeana incluyen gramíneas (festuca, agropiro, raigrás, cebadilla, etc.), leguminosas (tréboles, alfalfa, lotus, etc.) o mezclas de especies ("pasturas consociadas"). La producción de forraje en ambientes ganaderos marginales varía entre 5000 y 7000 kg de materia seca/ha/año llegando a 12000-15000 kg de materia seca/ha/año en ambientes sin limitaciones productivas o sitios con reconocida aptitud agrícola. En general, entre el 60- 70% de la oferta anual de pasto se produce durante la primavera o en primavera-verano. El uso ineficiente de los recursos ambientales (básicamente radiación solar, temperatura, agua y nutrientes) disminuye la capacidad productiva. Entre las principales causas de las limitaciones observadas en el techo productivo, no solo en términos de cantidad lograda sino de calidad de los recursos forrajeros se destacan las deficiencias nutricionales. Es reconocido que para crecer y producir forraje las pasturas requieren de aportes continuos de nutrientes (**Tabla 1**). También es frecuente identificar, en las condiciones frecuentes de producción argentinas, que la provisión natural directa desde

la disponibilidad en los suelos no sea suficiente para abastecer la demanda de las pasturas o del sostenimiento de procesos naturales de nutrición (ej. fijación biológica de nitrógeno desde el aire). Estas limitaciones además de restringir el eficiente aprovechamiento de recursos productivos (ej. disponibilidad de agua), conducen a deficiencias nutricionales que reducen no solo crecimiento de las plantas si no su calidad forrajera y potencial de transformación en carne.

Para las gramíneas templadas, los nutrientes que generalmente limitan la producción de forraje son el nitrógeno principalmente durante el período de bajas temperaturas desde fin del otoño a mediados de primavera y el fósforo por bajos niveles extractables en los suelos. Para las leguminosas, en cambio, el principal nutriente limitante es el fósforo ya que estas plantas tienen la capacidad de utilizar el nitrógeno atmosférico y el resultado de este proceso está directamente ligado al mantenimiento de crecimiento activo de las plantas donde el P y otros nutrientes (ej. azufre y boro) tienen un papel de relevancia. En síntesis, mejoras generalizadas en la oferta de nitrógeno y de fósforo, en complemento estratégico con elementos como el azufre y el boro, conducen no solo a sostener producción forrajera sino también a consolidar una abundante oferta de proteínas para sustentar una más eficiente transformación en carne.

Tabla 1. Nivel promedio de extracción de nutrientes por pasturas (Marino, 2016).

Nutriente	Alfalfa	Tréboles	Gramíneas
	----- kg/ton MS -----		
Nitrógeno	30-40	30-35	25-30
Fosforo	2.5-3.0	2.5-3.0	2.0-2.5
Azufre	2.0-3.0	2.0-2.5	1.5-2.0
	----- g/ton MS -----		
Boro	20-50	20-45	6-12

El consumo de nutrientes minerales está estrechamente asociado con la tasa de crecimiento de las plantas, por lo tanto, aumenta en la medida que las pasturas producen más forraje. Así, el requerimiento será máximo en primavera y mínimo en invierno. En términos generales se pueden considerar requerimientos de entre 2 y 3 kg fósforo y entre 20 y 30 kg de nitrógeno por tonelada de forraje producido. Esto significa que acumulaciones de forraje próximas a las 12 toneladas de materia seca/ha/año requerirán dinámicos aportes

anuales aproximadamente de entre 24 y 36 kg de fósforo/ha y de 240 a 360 kg de nitrógeno/ha. Cabe destacar que recursos forrajeros de alto potencial productivo como los verdes de verano (ej: maíz, sorgo) muestran elevados consumos instantáneos de nutrientes con niveles de extracción de los sistemas mayores que cuando su destino productivo es solo para cosecha de granos. Además, la alta eficiencia de conversión de productos aéreos (biomasa aérea y granos) aporta en limitada magnitud a la materia orgánica del suelo y al ciclado de nutrientes. En ausencia de otras condiciones limitantes, por ejemplo, hídricas, las respuestas esperables a la aplicación de nutrientes varían entre 10 y 30 kg de materia seca por kg de nitrógeno, entre 100 y 200 kg de materia seca por kg de fósforo y entre 200 y 300 kg de materia seca por kg de azufre. Esta información es de valor para la planificación de la oferta forrajera y atendiendo a alcanzar una oferta uniforme, o predecible, de forraje.

Entre otros de los beneficios de la anticipación en planteos de nutrición de pasturas es el manejo de aportes residuales (o de mantenimiento) de los niveles de fósforo de los suelos. También además del incremento en la cantidad de forraje producido, la fertilización de pasturas permite "anticipar" la producción de forraje que dependiendo de la época del año y condiciones de crecimiento de las pasturas varía en hasta 20 o 30 días con respecto a planteos de producción limitados nutricionalmente. Este adelantamiento en el inicio del pastoreo es un factor clave para el manejo de los establecimientos ganaderos sobre todo en la época crítica como es la salida del invierno.

A nivel sistema productivo nacional, Elizalde y Riffel (2017) plantean que la producción de forraje es insuficiente para hacer un buen aprovechamiento de cultivos de maíz y convertirlo en carne en mayor proporción. Más allá de cuestiones económicas, la principal limitante para el mayor aprovechamiento de los granos en nutrición animal es el forraje necesario para mantener el ciclo ganadero que aporte los animales que finalmente serán los que consuman el grano. En la **Tabla 2** se resumen los requerimientos de materia seca para un rodeo que desteta el 65 % de los terneros, nivel un poco más alto que la media nacional. Los machos se recrían a pasto hasta los 300 kg y luego se engordan a grano en corrales. A su vez, las hembras de descarte se recrían hasta los 220 kg y luego se encierran hasta la venta con 320 kg. Estas demandas requieren, no solo la capacidad de producción de forrajes

en cantidad sino el mantenimiento uniforme de la oferta nutricional, en particular en cuanto a su contenido proteico.

Tabla 2. Cantidad de materia seca requerida para la producción ganadera de ciclo productivo completo, desde el mantenimiento de la población parental hasta la terminación a corral de machos y hembras de descarte (Elizalde y Riffel, 2017)

Materia seca de alimento requerida para:	kg MS/ciclo	%
Cría (forraje para mantenimiento y producción)	5675	58
Recría (forraje para reposición y recría previa al corral)	3324	34
Engorde a corral (6% grano y 2% subproductos)	796	8
Total de materia seca requerida para el ciclo productivo	9795	100

Las conclusiones que alcanzaron Elizalde y Riffel (2017) son que, de cada 100 kg de producción de animales terminados, 92 kg provienen del pasto y 6 kg del grano (o sea una relación de 15:1). Es decir que por cada kg de grano que se destine a su consumo en corrales, se debería producir previamente 15 kg de forraje destinado a mantener el resto del ciclo. Es así que si a nivel nacional se planteara la conversión total del saldo exportable de granos de maíz (aproximadamente 8 millones de toneladas) en carne vacuna sería necesario producir alrededor de 120 millones de toneladas adicionales de materia seca de forraje. Este desafío es un verdadero reto para la ganadería y un significativo cambio en los planteos productivos intensivos e integrales. Considerando que el 85% de la superficie ganadera proviene de montes, islas y campos naturales (alrededor de 120 millones de ha), la producción de estos recursos debería aumentar aproximadamente en 1.000 kg de materia seca/ha de forraje "aprovechable". Siguiendo con este análisis, y considerando que en los campos naturales, la producción media es próxima a 3000 kg de materia seca, los 1000 kg representan un incremento de algo más que el 30%. Lo que sí resulta claro es que la fertilización de recursos forrajeros tiene un papel preponderante en esta mejora, aunque esta práctica por sí sola no llegaría a alcanzar el incremento deseado. En ese sentido, habría que analizar si se dispone de los recursos tecnológicos y económicos necesarios para encarar dicha mejora a nivel país.

Para la mayoría de los cultivos agrícolas la de-

cisión de fertilización en cuanto a la cantidad y el tipo de fertilizante a aplicar están motivados básicamente por tratar de lograr una producción óptima atendiendo al resultado sobre el cultivo en combinación con la oferta desde el suelo. En cambio, la decisión de fertilización de forrajes debe ser más controlada mediante una cuidadosa consideración de diversas metas individuales para el pasto producido más allá de su cantidad y atendiendo también a su calidad y oportunidad como sustento nutricional de transformación en carne. Algunos de los factores a considerar incluyen: i) la producción necesaria para los animales (ej. ajuste oferta:demanda); ii) momento de las necesidades de forraje en relación a factores exógenos limitantes al crecimiento (ej. temperaturas, oferta hídrica); y iii) especies presentes en el tapiz forrajero (ej. composición de pasturas, cultivos anuales, etc.).

Los rendimientos esperados de 9 o más toneladas de materia seca por hectárea son razonables para situaciones donde los suelos tienen una adecuada capacidad de retención de agua y se adoptan las prácticas de manejo intensivo, tales como el uso de pastoreo rotacional. El momento de aplicación de los fertilizantes nitrogenados tiene que coincidir y anticipar al patrón de crecimiento de las gramíneas forrajeras. En la región pampeana estas aplicaciones son de mayor eficiencia hacia el fin del invierno y en anticipación del mayor crecimiento primaveral. La aplicación escalonada de fertilizantes nitrogenados es una opción para situaciones de manejo intensivo, por ejemplo, 75% al inicio de la primavera y el resto hacia el fin del verano con anticipación al otoño.

Es imperioso entonces conocer mediante el análisis de suelo la condición de oferta de los nutrientes. Así una mirada de lo que está sucediendo con los niveles extractables de fósforo en el oeste de Buenos Aires muestra que más del 80 % de los lotes respondería al agregado de fertilizantes si la especie a sembrar fuera la alfalfa (**Figura 2**)

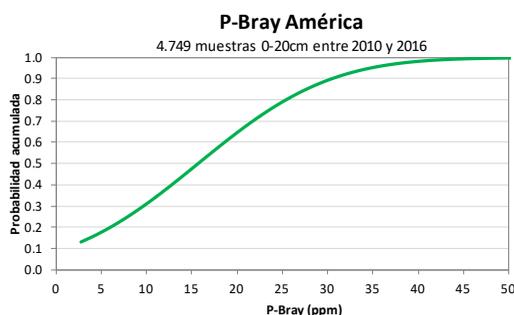


Figura 2. Frecuencia acumulada de resultados de análisis de suelos para P-Bray (Agroassay, 2017)

En síntesis, los planteos intensivos de producción ganaderos se enfrentan con el desafío de cambiar en su organización integrando la planificación en el uso de nutrientes como un factor de manejo para incrementar la producción de forraje y proveer de una oferta continua de calidad nutricional. Abundantes estudios locales destacan que en todos los sistemas de producción de forraje el adecuado manejo de la nutrición con fósforo repercute tanto en mayor oferta de pasto como en su calidad al mejorar la eficiencia en nutrición nitrogenada y producción de proteínas. Aun así, el desafío productivo es de importancia abarcando a la originación de cabezas de ganado directamente ligada a la calidad productiva de pastizales donde al mejorar la disponibilidad de fósforo se fomenta la actividad de leguminosas naturales, se intensifica el ciclado de nitrógeno y la capacidad productiva del sistema integralmente. En ambientes de mayor capacidad productiva, la fertilización le aporta estabilidad a la cadena forrajera de pasturas en la cosecha y transformación continua de nutrientes requiriéndose contemplar su utilización estratégica en términos de nutrientes a aplicar (nitrógeno, azufre, boro) además del fosforo, integrando diversos componentes forrajeros y beneficios adicionales tales como el adelantamiento productivo y el eficiente ciclado de nutrientes. El crecimiento en producción de carne es posible a partir de la integración estratégica en el uso de nutrientes contemplando a lograr modelos dinámicos de combinación de forrajes con alta calidad forrajera.

Bibliografía

- Elizalde, J.C., S. Riffel. 2017. "El pasto: clave para aprovechar el maíz". Valor Carne. 2, Abril 2017.
- IPNI. 2003. Manual de nutrición y fertilización de pastos. J. Bernal y J. Espinosa (ed.). IPNI Norte de Latinoamérica. Quito, Ecuador. Disponible en <http://nla.ipni.net/article/NLA-3058>.
- Marino, A. 2016. El ABC de la nutrición de pasturas consociadas y verdes. Comunicación Técnica FertiLab.
- Marino, M.A., Agnusdei, M. 2009. Nutrición mineral en verdes y pasturas: manejo de alto impacto productivo. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. UNLP.
- Quintero, C. G.G: Boschetti. 2008. Fertilización de alfalfa. En: Melgar, R. y M. Díaz-Zorita, Fertilización de cultivos y pasturas, Ed. Hemisferio Sur-INTA, Buenos Aires. pp. 315-33
- Díaz-Zorita, M. 2008. Fertilización de pasturas mixtas templadas En: Melgar, R. y M. Díaz-Zorita, Fertilización de cultivos y pasturas, Ed. Hemisferio Sur-INTA, Buenos Aires pp. 332-345
- Marino, A., A. Berardo. 2014. Pasturas y pastizales naturales. En: Echeverría, H.E. y F.O. García. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. INTA Ediciones, pp. 555-583.

Manejo de ambientes: Sudeste de Buenos Aires

Pablo Calviño

Asesor y director técnico

Tandil, Buenos Aires, Argentina

Contacto: calvinopablo@gmail.com

Introducción

A medida que se va prestando más atención en cómo se hace la agricultura, es evidente que cada región tiene características productivas diferentes. Pero también cada zona, cada lote y, en muchos casos, cada sector de lote tiene características productivas diferentes (que desde ahora llamaré ambientes productivos).

Cada ambiente productivo presenta características que hacen que tenga diferente:

- Rendimientos alcanzables.
- Variabilidad interanual de rindes.
- Necesidades de manejo (estas últimas a su vez, muy influenciadas por la variabilidad climática, de suelos, de posición topográfica, distancia a mercados y muchas otras variables).

Cómo comenzar a identificar la necesidad de manejos diferentes

Mi recomendación siempre es comenzar a identificar las limitantes más importantes que justifican manejos diferentes. En general, lo que más se ve es que se estudian detalles de nutrición. Este tema es muy importante en varias regiones, pero para comenzar, mi recomendación es siempre analizar primero causas que provocan diferencia en la capacidad de almacenamiento de agua.

A modo de ejemplo, y muy groseramente para diferentes regiones del país, las variables más importantes a mirar son:

- SE y SO de Bs As: Riesgo de heladas y profundidad de suelo. N, P y S.
- N de Bs As: Suelos degradados o erosionados, textura, fertilidad N, P, S y Zn.
- de Bs As: Textura de suelo y agua a la siembra, fertilidad N, P y S y riesgo de heladas.

- Sur de Córdoba: Profundidad y calidad de la napa, textura, N, P y S.
- Chaco: estabilidad estructural, porosidad, % de cobertura y textura.

¿Qué se puede manejar diferente para conseguir el mejor resultado de cada ambiente?

Cada lote tiene necesidades diferentes, a modo descriptivo se pueden cambiar:

- Rotaciones con diferentes cultivos. Buscando el mayor margen, retorno y/o balance de C.
- Fechas de siembra. Puede ser por que determinados sectores tienen mayor contenido de agua en el perfil, o porque hay más riesgo de heladas o porque en ambientes más restringidos se busca ciclos más rústicos, entre otras causas.
- Tipo de híbrido en maíz y girasol y/o variedad en soja y trigo. En la **Figura 1** se puede observar que en los ambientes de mayores rendimientos para el SE y el Norte de Buenos Aires, las diferencias entre variedades de trigo de grupo de calidad 1 con las de 2 y 3 son mayores. Indicando que uno puede hacer.
- Otras, simplemente cambios en nutrición.

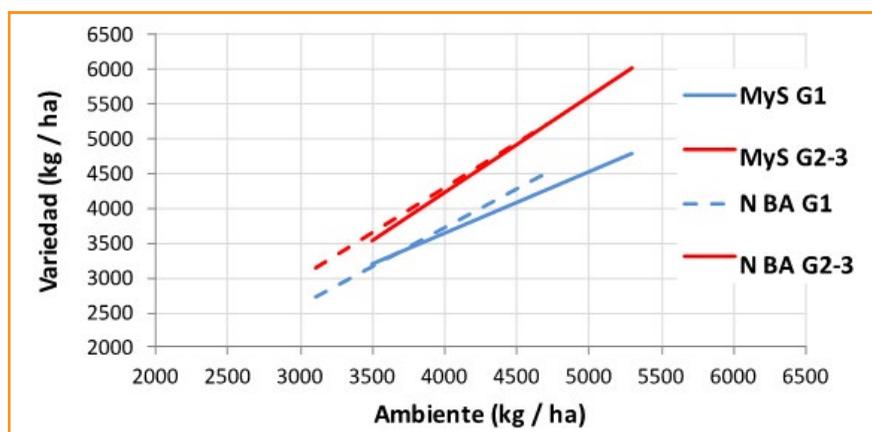


Figura 1. Rendimiento de trigo de variedades de grupo de calidad 1 y 2 - 3 para Mar y Sierras y norte de Buenos Aires. Los datos corresponden a las RET de 2015.

En particular para el sudeste de Buenos Aires

Comenzamos midiendo la influencia de la tosca (variable que considerábamos más importante) sobre los rendimientos. En la **Figura 2** se puede observar que los cultivos presentan diferente sensibilidad a la profundidad de tosca (Maíz > Girasol > Soja > Trigo).

La variable que cuantificamos en segundo término, pero que terminó siendo la más importante, fue el riesgo de heladas. En la Figura 3 se observan las diferencias de temperaturas mínimas entre bajos heladores y medias lomas. A modo de ejemplo, en la fecha que en media loma hay 2% de riesgo de helada en el bajo helador hay un 70% de posibilidades que el cultivo se hele en floración.

Adelantar la fecha de siembra permitió lograr aumentos 300 kg/ha en los rendimientos alcanzables (muchísimo más en los rendimientos promedio), por disminuir el riesgo de heladas y otra variable, no menos importante, se logró adelantar la cosecha en más de 7 días, lo que representa entre 300 a 1000 kg/ha más en la soja de segunda.

Cuantificar estas diferencias permitió no desaprovechar el potencial de los ambientes de media loma y de loma en los cultivos de invierno, y en los cultivos de verano escapar a los riesgos en los sectores más riesgosos.

¿Qué hicimos con esto?

Se armaron diferentes ambientes productivos teniendo en cuenta las variables señaladas (Tabla 1) y rotaciones para los diferentes ambientes (**Tabla 2**).

En los últimos años trabajamos testeando la posibilidad de incorporar maíces tardíos en baja densidad en los ambientes de loma, obteniendo resultados muy alentadores. Por lo cual, las rotaciones de loma también podrían incorporar al maíz. Es interesante aclarar que el balance de C con los rendimientos altos de los cultivos de inviernos y sus dobles cultivos, no necesitaban maíz mirado desde ese punto de vista.

El manejo de los cultivos por ambientes con diferentes rotaciones nos ha generado aumentos cercanos al 30% en los márgenes netos en el total de la superficie agrícola. ●

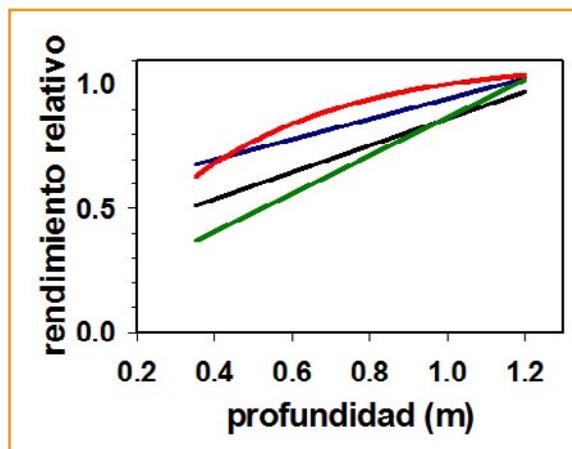


Figura 2. Influencia de la profundidad de suelo sobre los rendimientos relativos a la profundidad máxima de cada cultivo. Extraído de Sadras y Calviño (2001).

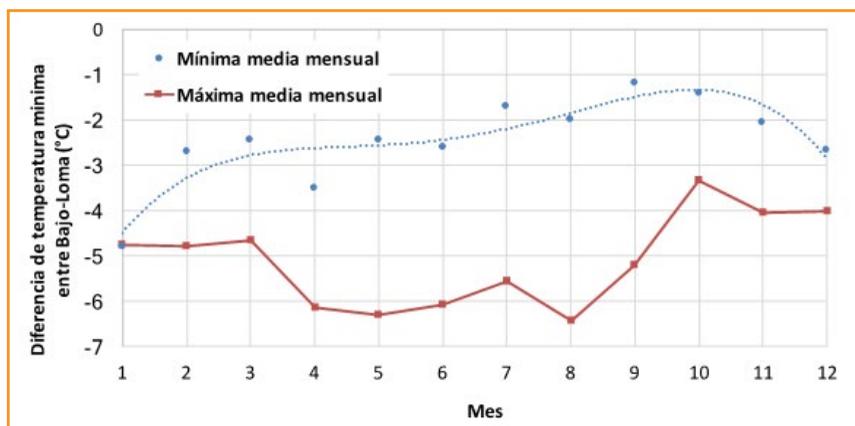


Figura 3. Diferencias en la temperatura mínima media mensual (azul) y en la máxima mínima mensual (marrón).

Tabla 1. Descripción de los ambientes productivos. Variables que los definen.

Aptitud	Limitante		
	Cap. Alm.	Pendiente	Riesgo helada
Maicero con napa	> 250 mm	< 1%	Muy alto
Maicero sin napa	> 250 mm	< 2%	Alto - Medio
Maicero sin napa	> 250 mm	< 2%	Medio
Loma húmeda	> 200 mm	2-3.5%	Bajo - Medio
Loma seca	< 120 mm	> 3.5%	Bajo

Tabla 2. Descripción de las rotaciones que se realizan en cada ambiente productivo.

Aptitud	Rotación		
	Maíz	Maíz	Soja corta / Girasol
Maicero con napa	Maíz	Maíz	Soja corta / Girasol
Maicero sin napa	Maíz	Soja 1ra	Trigo
Maicero sin napa	Maíz	Soja 1ra	Cebada o Trigo/Soja 2da
Loma húmeda	Soja 1ra / Girasol	Cebada o Trigo/Soja 2da	Bajo - Medio
Loma seca	Soja 1ra / Girasol	Cebada/Soja 2da	Bajo

Ambientes del centro de Santa Fe, ¿vale la pena el manejo diferenciado?

Gustavo López^{1,2,*} y Maximiliano Finello²

^{1,2} Gustavo López y Asociados Consultores Agropecuarios

²Asesor CREA San Francisco

*Contacto: glopez@gustavolopezyasoc.com.ar

Cuando se habla de ambientes en agricultura, lo que realmente nos interesa de esos ambientes es cuáles son sus limitantes a la productividad, cómo impactan en los cultivos y, por último, por supuesto, cómo manejarlas lo más eficientemente posible. Si las limitantes a considerar en cada ambiente son diferentes, por supuesto su manejo también lo será. En zonas más "núcleo", como sur de Santa Fe, Buenos Aires, sur de Córdoba, y La Pampa, las limitantes en términos generales están definidas por el relieve (loma, media loma, bajo), la textura del suelo, presencia o no de tosca, o de napa y los contenidos de nutrientes de cada ambiente.

Los argiudoles típicos que predominan desde la ciudad de Rosario hacia el norte de la provincia de Santa Fe tienen además algunas características particulares que definen el comportamiento de los ambientes, de las cuales una muy importante es la profundidad del horizonte Bt. Además, el centro de la provincia, de relieve muy plano, está influido por el ascenso y descenso de napas que configuran también ambientes diferentes y, en muchas áreas, alfisoles con presencia de sodio o de salinidad. Las cuencas de algunos ríos como el Salado o el arroyo Cululú, con relieves más ondulados, también están afectados por diferentes grados de erosión hídrica, lo que generó la pérdida de profundidad del horizonte A.

Estas cuestiones, sumadas a problemas físicos localizados como compactaciones en el perfil del suelo por sobre el horizonte B, falta de infiltración, etc, hacen que en esta zona tomen muchísima relevancia las limitantes físicas a la productividad, donde la infiltración del agua de lluvia en el perfil y la exploración de raíces, se ven afectadas, en mayor o menor medida, y existen por lo tanto diferencias entre ambientes en estas características, además de las químicas.

La complejidad entonces de factores limitantes a la productividad en esta zona y su heterogénea distribución en el terreno, indica que la respuesta a la pregunta del título es afirmativa.

En un establecimiento del centro de la provincia de Santa Fe se realizó un trabajo de ajuste de tecnologías para maíz en la campaña 2014-2015. El objetivo fue comparar el resultado del manejo de maíz sin discriminar ambientes (sembrando todo el campo con la misma tecnología), con un manejo ajustado según las limitantes a la productividad de cada ambiente.

Se detectaron tres ambientes: Ambiente A: mayor potencial (menores limitantes a la productividad), ambiente B: potencial intermedio, y ambiente C: menor potencial (mayores limitantes a la productividad). En estos ambientes se utilizó diferente dosis de fertilizante y densidad de semillas.

Los resultados demostraron que, debido a la mayor eficiencia en el uso de los insumos, el Margen Bruto fue mayor incluso en el ambiente de menor productividad, que realizando un manejo uniforme del campo sin diferenciar ambientes (manejo "promedio"). Los cálculos se realizaron con precios de fin de campaña de maíz 2014-2015.

Sector	MB \$/ha
Ambiente A	1966
Ambiente B	1784
Ambiente C	1604
Testigo	
(manejo "promedio")	552

El trabajo se desarrolló en cuatro etapas:

- 1- Delimitación de los ambientes
- 2- Caracterización de los ambientes
- 3- Ajuste agronómico
- 4- Cultivo por ambientes

Las etapas 1 y 2 pueden realizarse de diferentes formas, nosotros elegimos la que consideramos más completa y correcta. El resultado de estas dos etapas es el conocimiento detallado de cuáles son las limitantes a la productividad que más impactan en el cultivo, y cómo están distribuidas en el campo.

La etapa 3 consiste en el ajuste de las tecnologías, y requiere del conocimiento y el criterio agronómico para decidir qué manejo es el mejor para cada ambiente. La expresión del mejor resultado económico dependerá del logro del mayor rendimiento con el uso justo y necesario de los insumos de mayor impacto.

En el caso de este trabajo en particular, las únicas dos tecnologías ajustadas fueron la densidad de semillas por hectárea y la cantidad de fertilizante utilizado. Esto fue así porque se hizo en un establecimiento que ya tenía su esquema de rotaciones armado y el fertilizante comprado para todo el campo. Por lo tanto, el sector que se "ambientó" ya estaba destinado a maíz de primera, y no teníamos opciones de cambiar el tipo de fertilizante. Pero la idea del manejo por ambientes involucra todas las decisiones de manejo en función a las limitantes detectadas. Es importante diferenciar este concepto del que se entiende por "Agricultura de precisión", que apunta a la eficiencia en el uso de insumos con un nivel de detalle mayor (metros) ajustando dosis por ejemplo de fertilizantes, densidad de siembra o aplicación de enmiendas, metro a metro en el lote. Para esto se requiere maquinaria con el equipo adecuado de dosificación variable. En el caso de este trabajo, como objetivo final, el ajuste que se propone no es solamente de insumos, sino también de procesos. El objetivo es decidir para cada ambiente, por ejemplo, una rotación particular, la elección de las variedades e híbridos, las fechas de siembra, la densidad, la fertilización y otras tecnologías que estén vinculadas a la relación suelo/planta. La suma de cada uno de estos ajustes potenciará el resultado para cada ambiente. Se trabaja a nivel de macroambientes y el resultado final muchas veces implica redefinir los tradicionales límites geométricos de los lotes según los alambrados, por límites según los ambientes. Si dentro de cada macroambiente, se realiza luego además agricultura de precisión, mayor aún será el ajuste de las tecnologías.

Una última aclaración antes de describir cómo se realizó el trabajo es relacionada al criterio de fertilización. En este trabajo se utilizó el criterio de suficiencia, es decir que los fertilizantes aplicados fueron los necesarios para que los nutrientes aportados, sumados a los que contenía el suelo, permitieran lograr los rendimientos esperados. Otro criterio puede ser el de reposición, que procuraría reponer los nutrientes extraídos por el

cultivo. En ese caso probablemente las cantidades de fertilizantes a aplicar hubiesen sido otras, pero la diferenciación por ambientes también hubiese sido tomada en cuenta.

Etapa 1- Delimitación de los ambientes.

El trabajo se realizó en un sector de 630 has que abarcaba tres lotes de un campo ubicado en el centro de la provincia de Santa Fe.

El primer paso fue verificar la existencia de ambientes diferentes dentro del campo y detectar cuáles son sus límites en el terreno. Esta etapa no brinda mayor información que esa, es decir, determina si hay ambientes diferentes, donde están, y cuáles son sus límites, pero no detecta cuáles son las diferencias entre ellos. La imagen satelital del sector ambientado es la **Imagen 1**.



Imagen 1. Imagen satelital del sector estudiado.

La herramienta que utilizamos son las imágenes satelitales Landsat procesadas con un GIS (Sistema de Información Geográfica) para determinar el índice verde. Además nos apoyamos en información existente, como las cartas de suelo. Si en el campo existen mapas de cosecha, o mapas de conductividad (Veris), se utilizan también superponiendo estos mapas a los de índice verde para tener un mayor ajuste de los límites de los ambientes.

Se procesaron imágenes de varios años con diferentes regímenes de precipitaciones. Disponiendo de la historia de cada lote (cultivos), esta herramienta es muy potente, ya que puede inferirse el vigor de los cultivos a través de su índice verde en años húmedos y años secos, y delimitar los ambientes promedio donde los comportamientos son diferentes.

También se realiza un modelo topográfico del

sector para considerar el funcionamiento hidrológico en superficie.

En la **Imagen 2** se observa el mapa de ambientes identificados según índice verde a partir de imágenes satelitales de 6 años.

Etapa 2- Caracterización de los ambientes

Si decidiéramos cambios en el manejo solamente en función del mapa del Índice Verde o de rendimientos, estaríamos tomando decisiones sobre un resultado, sin conocer las causas de ese resultado. El mapa de ambiente nos dice solamente que el ambiente A es diferente al B, y al C, pero no dice por qué son diferentes, el diagnóstico entonces está incompleto. Decidir un cambio de fertilización, por ejemplo, solamente en función de este mapa, sería como si un médico sólo se enfocara en los síntomas y no en las causas de una enfermedad.

La segunda etapa entonces consiste en caracterizar esos ambientes para entender por qué los ambientes son diferentes, y poder tomar decisiones de manejo posterior.

Los indicadores utilizados para realizar el diagnóstico son los siguientes:

FISICOS	Estabilidad Estructural (S)
	Densidad Aparente (Mg/m ³)
	Infiltración (cm/h)
QUIMICOS	Materia Orgánica (%)
	P (ppm)
	pH
	CE (dS/m)
	CIC
	PSI
	PERFIL CULTURAL
Encostramiento. Superficial	
Espesor del horizonte superficial	
Actividad Biológica	
Calidad de la Estructura	
Infiltración Potencial	
Porosidad	
Desarrollo Radical	

En el caso de este trabajo en particular, nos encontramos con características químicas de los suelos muy similares entre los tres ambientes. Si intentamos explicar las diferencias de índice verde o rendimiento de los cultivos a partir de los análisis químicos de suelo, nos encontramos con que no existen limitantes químicas importantes para la productividad de maíz en ninguno de los tres ambientes (excepto Nitrógeno disponible que es uno de los elementos más móviles y se corrige con la fertilización) (**Tabla 1**).

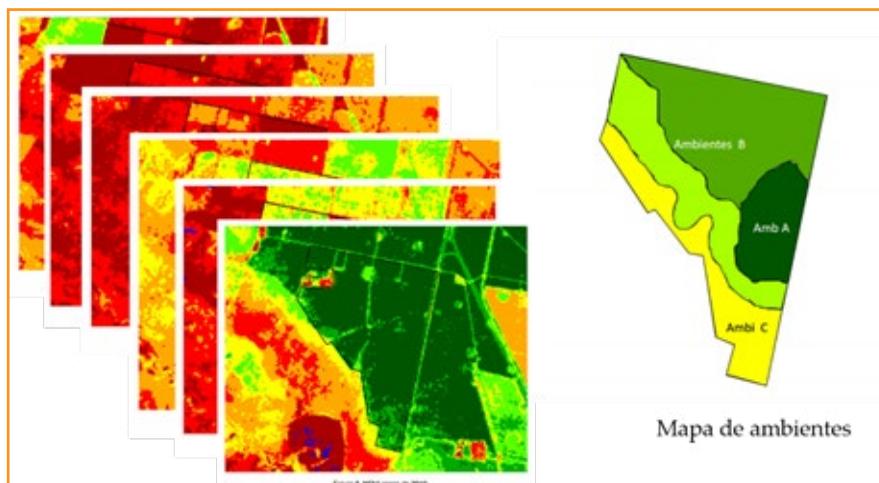


Imagen 2. Mapa de ambientes identificados según índice verde.

Tabla 1. Análisis químico de suelos de los ambientes.

Lote	AMBIENTE A	AMBIENTE B	AMBIENTE C
Fecha análisis	06/08/2014	06/08/2014	06/08/2014
MO (%)	2.43	2.31	2.39
Carbono (%)	1.41	1.34	1.39
N total (%)	0.122	0.116	0.12
N- NO ₃ (ppm)	13.1	13.9	14.9
P (ppm)	41.3	30.6	32.2
S- SO ₄ (ppm)	7.8	7.1	8.1
pH	5.95	5.92	6.36
CE (ms/cm)	0.42	0.45	0.48
Ca (cmol/kg)	6.48	6.36	6.68
Mg (cmol/kg)	1.39	1.26	1.4
K (cmol/kg)	0.96	0.83	0.89
Na (cmol/kg)	0.24	0.23	0.23
CIC (cmol/kg)	12.24	11.94	11.61
Saturación de bases (%)	74.1	72.7	79.24

¿Cuáles son las limitantes entonces que hacen que los cultivos se comporten en forma diferente en cada ambiente? La explicación se encuentra en las características físicas de los perfiles del suelo, que condicionan la dinámica del agua y la exploración de raíces.

En el ambiente A, el horizonte B comienza a los 27 cm de profundidad. El horizonte A hasta esa profundidad tiene muy buena porosidad, muy buena exploración de raíces. Se observa una leve estructura laminar superficial (3 - 4 cm) pero no hay compactaciones subsuperficiales que impidan la exploración de raíces o el ingreso de agua de lluvia al suelo. La estructura general es de prismas con buen agrietamiento en sentido vertical, como se observa con líneas blancas en la Imagen 3, lo que facilita el ingreso de agua y penetración de raíces.



Imagen 3. Foto del perfil de suelo del Ambiente A.

El ambiente B que corresponde a un sector con mayor pendiente donde se ha perdido parte del horizonte A por erosión, y su profundidad es de 23 cm. Se comienza a ver una estructura laminar a los 7 - 8 cm de profundidad. Ese sector más denso implica alguna dificultad para la profundización de raíces cuando el suelo tiene poca humedad y además disminuye la velocidad de infiltración del agua. Esta característica y el hecho de que exista pendiente en este sector, hacen que la captación/infiltración del agua de lluvia sea menor que en el ambiente A y se pierda parte por escurrimiento superficial. El agrietamiento en este perfil no es tanto en sentido vertical como en el ambiente A, sino que comienzan a preponderar agrietamientos horizontales (Imagen 4).



Imagen 4. Foto del perfil de suelo del Ambiente B.

En el ambiente C, el horizonte B comienza a mayor profundidad, 27 cm, probablemente por acumulación de sedimentos en el estrato superior, ya que este es el sector más bajo en el relieve.

En este ambiente las compactaciones son mucho más notables y la estructura laminar se encuentra más definida y a mayor profundidad en el perfil. Esto indica desagregación, probablemente por períodos con exceso de saturación de agua, anegamiento o ascenso de la napa. Se observan "barnices" que indican lixiviación de materia orgánica sin humificar.

El comportamiento de este ambiente es el más asociado a los déficits o excesos hídricos. En un año con pocas lluvias, la falta de estructura y agrietamiento impide la penetración de raíces y el agua, limitando el rendimiento mucho más que en los otros dos ambientes. En años con el perfil húmedo, las limitaciones no son tan notables, y en años con excesos hídricos, este sector puede estar anegado o demasiado saturado y generar problema de anoxia en raíces, clorosis férrica, etc. En la **Imagen 5** se observan las compactaciones en el perfil.

Etapa 3- Ajuste agronómico

Concluyendo entonces que las limitantes a la productividad están originadas en los aspectos

físicos del suelo que condicionan la dinámica del agua y de las raíces, y no tanto en los aspectos químicos en este caso, definimos el rendimiento potencial del maíz en cada ambiente, en conjunto con los ingenieros del equipo técnico de la empresa propietaria del establecimiento.

Para esto tomamos en cuenta además de lo observado la historia del comportamiento de los materiales utilizados en este campo en años El Niño y La Niña, y otros antecedentes como los resultados de los ensayos de la zona, los análisis de campaña de la zona Santa Fe Centro de CREA, etc.

Consideramos que este es el punto principal y más importante del proceso. Independientemente de los métodos que se utilicen para detectar y caracterizar los ambientes, el procesamiento agronómico de esta información y la toma de decisiones para adaptar las tecnologías a cada ambiente (aunque en este trabajo sólo lo hicimos con densidad de siembra y fertilización) son la clave para el logro de los resultados esperados.

El pronóstico climático para la campaña era de año Niño, por lo tanto, esperábamos precipitaciones superiores a las normales y rendimientos proyectados superiores a la media. Definimos entonces que la fertilización y la densidad de semillas a sembrar en función de los rendimientos esperados sería la indicada en la **Tabla 2**.



Imagen 5. Fotos del perfil de suelo del Ambiente C.

Tabla 2. Fertilización y densidad de siembra de maíz en función de los distintos ambientes.

Maíz	Rendimiento esperado (kg/ha)	Urea (kg/ha)	Fosfato diamónico (kg/ha)	Densidad (plantas/ha)
Ambiente A	10 000	300	50	80 000
Ambiente B	8000	180	50	70 000
Ambiente C	6500	50	50	50 000

Para evaluar el comportamiento en cada ambiente y relacionarlo con el manejo “promedio” del maíz que hace la empresa en todo el campo, decidimos sembrar en el lote una franja, que abarcara los tres ambientes, con ese manejo promedio que es el mismo que se hace en el resto del establecimiento. El lote quedó entonces dividido según se observa en la Imagen 6.



Imagen 6. Disposición de ambientes y franja de referencia en el lote.

Como disponíamos de un solo fertilizante, que era una mezcla 50% de fosfato diamónico y 50% de urea que la empresa ya había comprado, tuvimos que adaptar el trabajo utilizando esta mezcla, aunque no era lo óptimo. En el resto del

campo se utilizaban 300 kg/ha de esta mezcla en todo el maíz. Los tratamientos de los ambientes y el testigo promedio para el año Niño quedaron definidos la **Tabla 3**.

Tabla 3. Fertilización y densidad de siembra de maíz en función de los distintos ambientes.

Maíz	Rendimiento esperado (kg/ha)	Mezcla (kg/ha)
Ambiente A	100	350
Ambiente B	80	150
Ambiente C	65	50
Promedio	80	300

La semilla utilizada fue la del híbrido Dow 510, y la fecha de siembra fue el 31 de agosto de 2014. No detallaremos aquí los datos meteorológicos solamente diremos que si bien hubo algunas restricciones hídricas durante el estadio vegetativo (hasta V 7 - V 8), desde el inicio del período crítico hasta la cosecha no hubo limitaciones al rendimiento desde el punto de vista climático (lluvias, temperaturas, etc.), ni por déficit ni por exceso de agua de lluvia.

Resultados

Los rendimientos y datos de siembra de los tres ambientes y del testigo se muestran en la **Tabla 4**. Los rendimientos obtenidos fueron muy parecidos a los esperados cuando realizamos la planificación por ambientes.

Tabla 4. Datos de siembra y rendimientos esperados y observados para los tres ambientes y la franja de referencia.

Lote	Superficie (ha)	Rendimiento esperado (kg/ha)	Rendimiento observado (kg/ha)	Variación del rendimiento (%)	Densidad (plantas/ha)	Densidad (semillas/m lineal)
24 Amb A	83.9	100	103.5	3.4	80.000	4.10
24 Amb B	279.9	80	83.6	4.3	70.000	3.65
24 Amb C	258.5	65	68.1	4.6	50.000	2.80
Testigo	7.7	80	73.8	-8.4	72.000	3.80

A partir de estos resultados, calculamos el Margen Bruto en cada ambiente y en la franja testigo con el manejo promedio abarcando los tres ambientes, con los precios de ese momento. Los parámetros utilizados se indican en la **Tabla 5** y los resultados económicos en la **Tabla 6**.

Tabla 5. Parámetros utilizados para el análisis económico.

Precio fertilizante (\$/kg)	4.17
Precio semilla (\$/bolsa 80 kg)	1242.93
Precio Maíz (\$/ton)	987.45
Gastos Comercialización (\$/ton)	400
Precio neto maíz (\$/ton)	587.45

Algunas conclusiones

1- La identificación y caracterización de los ambientes teniendo en cuenta aspectos químicos y físicos de suelo, permitió identificar las limitantes a la productividad de cada sector y adaptar la tecnología en uso de insumos adecuada para cada uno de ellos. No se hace mención en este trabajo a los factores climáticos, pero por supuesto también se tuvieron en cuenta para establecer los rendimientos esperados.

2- El resultado económico obtenido, incluso en el ambiente de menor productividad, fue superior al obtenido mediante un manejo uniforme sin identificar ambientes, por un uso eficiente de los insumos en función del rendimiento esperado.

3- Si bien trabajamos en esta oportunidad sólo con las variables fertilización y densidad, el concepto de manejo por ambientes en este establecimiento tiene como objetivo el ajuste agronómico de todas las tecnologías y decisiones de cultivo, desde rotación, fechas de siembra, elección de materiales, etc., para lograr la mayor eficiencia en el uso de los insumos adaptándolos al potencial de cada ambiente. También se apunta a la protocolización de procesos por ambiente.

4- Desde el punto de vista de la sustentabilidad o "buenas prácticas agrícolas" también consideramos la diferenciación de ambientes como punto de partida para el logro de los resultados. El concepto es que una buena práctica para un ambiente no necesariamente es una buena práctica para otro. Cada sector tiene limitantes diferentes que deben ser tratadas y monitoreadas en forma particular para optimizar el manejo sustentable. ●

Tabla 6. Resultados económicos en los diferentes ambientes y franja testigo.

Lote	Gastos de fertilización (\$/ha)	Gastos de semilla (\$/ha)	Otros Gastos directos (\$/ha)	Total Gastos (\$/ha)	Ingreso (\$/ha)	Margen Bruto (\$/ha)
24 Amb A	1459.5	1243	1412	4114	6080	1966
24 Amb B	625.5	1088	1412	3125	4909	1784
24 Amb C	208.5	777	1412	2397	4001	1604
Testigo	1251	1119	1412	3782	4334	552

Manejo diferencial por ambientes en suelos clase I y II del sudeste de Córdoba: Una visión práctica

Máximo Uranga

Socio y Gerente de Producción de Los Tacuruces S.A y de Agroencuentro SA

Contacto: muranga@funescoop.com.ar

La simple frase “manejo diferencial” lleva a pensar, al menos en nuestro ámbito agro-nómico, que existe cierta variabilidad en el ambiente como para realizar un manejo diferente en 2 o más sectores. Sin embargo, pensar en variabilidad en suelos clase I y II suena bastante raro. Estos suelos por definición de INTA en su caracterización, tienen mínimas limitantes para la producción agrícola en general por lo que no tienen grandes variaciones de composición que generen variabilidad en los cultivos. A pesar de esto, la experiencia de años nos ha mostrado que hay un factor muy importante y que es externo al tipo de suelo, que es la napa freática, y que genera diferencias notables en la productividad y estabilidad de la producción, por lo que hemos caracterizado los ambientes y definido rotaciones y manejo de los cultivos en función de la presencia o no de la misma al alcance de las raíces. A modo de ejemplo del impacto que causan las napas, en la **Figura 1**, se muestran los rendimientos de soja y maíz de 2 campos muy cercanos y con suelos similares en la campaña 2011/2012 que fue la última campaña con una sequía importante en la zona.

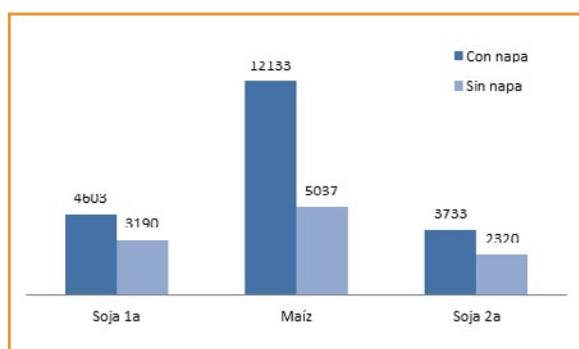


Figura 1. Rendimientos promedio de soja de primera, maíz y soja de segunda en la campaña 2011/2012.

La región del sudeste de Córdoba, más precisamente la región central del departamento Marcos Juárez, es el lugar donde se focaliza mi

experiencia. La napa freática en esta región fue desde principios de los 2000 en que la empezamos a conocer y hasta la campaña agrícola 2013-2014, la “niña bonita” de la zona. “Campo con napa” o “campo sin napa”, por más que sean ambos con suelos clase I, implicaban un manejo y seguridad de rendimientos diferentes. Esta realidad se complejizó en las últimas 3 campañas agrícolas, en donde los excesos hídricos hicieron que en algunos sectores las napas suban demasiado, tornándose perjudiciales para los rendimientos y hasta generando importantes pérdidas de áreas de producción. Esta “mucho-poco-nada” influencia de la napa es la que nos hizo realizar un manejo diferencial por ambientes que, si bien tuvo como principal objetivo maximizar la productividad y el resultado económico de los establecimientos, también tuvo como condición innegociable que se mantenga un balance de carbono (C), fósforo (P) y azufre (S) al menos neutro, realizando una nutrición integral del sistema.

Campos con napa positiva “Mínimas probabilidades de sufrir sequía”

En este tipo de campos se realizan todos los planteos buscando el máximo potencial ambiental rentable de los cultivos asumiendo que no va a tener ningún período de stress hídrico. La rotación no es fija y depende de situaciones de mercado principalmente, pero se busca que en un ciclo de 3 años se produzcan 10 ton/ha/año de MS de rastrojo, que es un valor 10% encima del que determinaron A. Thomas y A. Andriulo en 2001, como el de equilibrio para un suelo agrícola de esta zona.

En la **Tabla 1**, se presentan los rendimientos promedios por ha sembrada obtenidos en las últimas 5 campañas en estos ambientes. Sin dudas son rendimientos importantes y a mi juicio se sustentan no solo en la presencia de napa sino sobre todo en el nivel de fertilidad construida que se

ha logrado en estos lotes. A modo comparativo se presentan datos de análisis de suelo de 0 a 20 cm del año 2004 que fue cuando se comenzó con este planteo agronómico y de la actualidad (**Figura 2**). Como dato importante se ve como se ha logrado mejorar la materia orgánica (MO) y la dotación de P asimilable sin afectar el pH.

Tabla 1. Rendimientos promedio de los cultivos en las últimas 6 campañas agrícolas cosechadas. No incluye cultivos de gruesa 16/17.

Cultivo	Rendimiento promedio (kg/ha)
Trigo	5570
Soja 2da	3920
Soja 1ra	5170
Maíz	12040

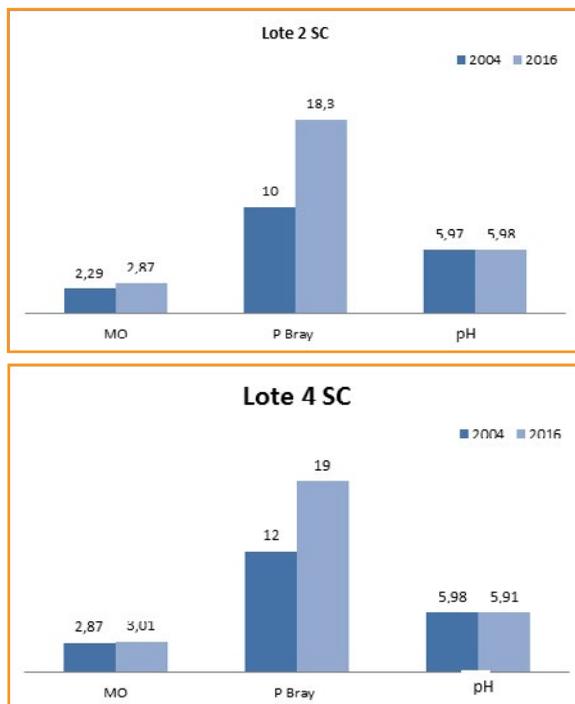


Figura 2. Resultados de Materia orgánica (MO), Fósforo Bray Kurtz I (P Bray) y pH de suelos en 2004 y 2016 para lotes 2 SC y 4 SC de Santa Cruz.

Esquema de fertilización

Fosforo: Mantenimiento según extracción de tablas de IPNI (<http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>). Aplicación en línea y voleo.

Nitrógeno: Estimación de óptimos económicos según modelos de respuesta generadas en nuestros establecimientos y con datos de grupos

CREA y AAPRESID. En trigo empezamos a pensar en lograr el 10,5% de proteína.

Maíz: Utilizamos un modelo de respuesta con nitrógeno (N) de suelo 0-60 a la siembra + fertilizante agregado, generado con datos propios y de diferentes redes de ensayos. El modelo es una función cuadrática con parámetros $x = 5286 + 35,2 N - 0,05 N^2$. De ésta función de respuesta a N y con los precios de N + 10% y de maíz esperados, se obtiene el óptimo económico de este nutriente a aplicar mediante la fórmula

$$N \text{ a aplicar} = (\text{Precio N} / \text{Precio maíz} - 35,2) / (2 * 0,05)$$

Para los indicadores de la campaña 16/17 y con un costo de N de 90 u\$/ton de N y un precio de maíz neto de cosecha y comercialización de u\$115/ton, el óptimo económico es 238 kg N/ha.

La aplicación la hacemos en V4-V5 con sólido incorporado o con fertilizante líquido chorreado

Trigo: Hasta la campaña 14/15 utilizaba un criterio similar al del maíz para determinar el N a aplicar, con un modelo que ajustaba en torno a 150 kg N/ha suelo 0-60 cm + fertilizante aplicado en torno a la siembra. Sin embargo, con la mayor previsibilidad del mercado de trigo, tenemos como objetivo obtener los máximos rendimientos posibles, pero sin bajar de 10,5% de proteína para lo que, después de chequear información con diferentes colegas e investigadores y por sugerencia de ellos, llegamos a la conclusión que a las variedades de trigo de alto potencial de rendimiento utilizadas en nuestra zona había que ofrecerle entre 30 y 35 kg/N por tonelada producida.

Esto cambia la forma tradicional de realizar el diagnóstico, aunque en este tipo de campos en donde la variabilidad de rendimientos es menor es posible aproximarse. En nuestro caso y para la campaña 16/17 en donde las condiciones de implantación eran muy buenas, y con pronóstico de año Niña (generalmente muy buenos rendimientos de trigo), fertilizamos pensando en 6000 kg/ha de trigo con un ajuste de 200 kg N/ha suelo + fertilizante en aplicaciones divididas entre siembra e inicio de encañazón. Además, realizamos un ensayo a campo que se muestra a continuación para validar el modelo y los datos obtenidos coinciden con la teoría.

Azufre: Mantenimiento según extracción por tablas de IPNI (<http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>). Aplicación generalmente combinada con el N, a veces con P.

Zinc: Desde el año 2010 en que observamos una respuesta muy importante al agregado de Zn en maíz en estos ambientes, y habiendo realizando ensayos en donde se generaron hasta 900 kg/ha de respuesta de rendimiento, todos los años se aplica Zn a razón de 1,5 kg/Zn/ha. En los análisis de suelo pre-siembra se determina Zn y últimamente todos los lotes están abajo del umbral.

En la campaña 16/17 y debido a las condiciones de excesiva humedad del otoño también se aplicó 1,5 kg/ha de Zn al trigo pensando en una nutrición integral del sistema.

Campos sin efecto de napa "Cierta probabilidad de sufrir sequía".

En este tipo de campos o lotes se realizan planteos productivos con el mismo objetivo que los anteriores, pero con mayores recaudos en la diversificación de períodos críticos y de cultivos de invierno y con menos confianza a la hora de definir los niveles de fertilización nitrogenada. Hasta la campaña 2013 en donde eran frecuentes los períodos de sequía, definíamos la proporción de cultivos de invierno a implantar en función del agua almacenada en el perfil. Algo similar ocurría con los cultivos de maíz, en donde en función del agua almacenada y del pronóstico climático definíamos la fecha de siembra y el planteo. La realidad es que en las últimas 3 campañas las lluvias fueron por encima de lo normal y no tuvimos esta problemática.

La rotación más comúnmente empleada es trigo/soja de segunda-maíz-soja de primera, 33% T/S, 33% Mz y 33% S1a, en la que el balance de carbono se logra en forma muy ajustada, aunque durante los últimos años el cultivo de trigo se dejó bastante de lado y hasta el de maíz tuvo años en que se redujo la proporción y el balance de C no se pudo mantener. A partir de la campaña 16/17 esta rotación se volvió a poner en marcha.

Esquema de fertilización

Fósforo: Mantenimiento según extracción de tablas de IPNI (<http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>). Aplicación en línea y voleo. La realidad es que no siempre se llega, especialmente los últimos años.

Nitrógeno: Ajuste con un criterio similar al del planteo con napa positiva, pero con una función

de respuesta obtenida en estos ambientes. Generalmente se ajusta a unos 30-40 kg N/ha menos en maíz. En trigo, ajuste con un criterio similar al del planteo con napa positiva, pero asumiendo probabilidades de reducción de rendimiento por sequía. En general, ajustes a 140-150 kg N suelo + fertilizante/ha.

Azufre: Mantenimiento según extracción por tablas de IPNI (<http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>). Los últimos años no se alcanzó el 100%.

Zinc: En la campaña 16/17 se aplicó 1,5 kg/ha de Zn/ha en la fertilización de los maíces.

Campos con efecto negativo de napa

Este tipo de campos lamentablemente son "la novedad" y al mismo tiempo "el problema" de la zona desde la campaña 12/13 cuando comenzamos a ver sectores en que la napa estaba tan cerca de la superficie que deprimía los rendimientos y hasta se perdían cultivos por encharcamiento. Ya en la campaña 15/16, la superficie afectada por esta realidad fue importante alcanzando aproximadamente al 10% de la superficie que yo manejo, y tal vez algo más a nivel regional. El hecho que la napa este a menos de 1 m de profundidad genera una saturación de humedad del suelo que produce que ante cualquier lluvia intensa el lote se encharque en forma importante, lo que implica que es bastante complejo implantar a los cultivos.

Particularmente no tengo definido ningún planteo productivo para estos ambientes más que diversificar los cultivos e ir buscando las oportunidades que nos da la campaña. La realidad es que desde la mencionada campaña 12/13 hasta la 16/17, los períodos de excesos fueron entre noviembre y abril en todos los meses por lo que no hay ninguna receta mágica para manejarlos. Pareciera que el maíz de primera es más factible de implantar, pero si hay excesos en diciembre se reduce mucho su potencial y si los hay en marzo/abril se complica la cosecha ya que no hay piso para las maquinas ni tolvas... situaciones que pasaron en la campaña 15/16. La otra opción que parece interesante en la de trigo o cebada y cultivo de segunda, pero en esta campaña 16/17 hubo encharcamientos en junio que afectaron al trigo y a fines de diciembre que complicaron a los cultivos de segunda.

Entiendo que este ascenso paulatino de las napas, que en algún momento fue de gran ayuda para nosotros, hoy es tal vez la principal

amenaza para la agricultura de la zona y un tema a prestar mucha atención. El INTA Marcos Juárez está trabajando muy fuertemente en este tema. La **Figura 3** muestra la profundidad de la napa comparada con la evolución de las lluvias desde 1965 hasta la actualidad. Claramente, el problema no son las lluvias ni el cambio climático. El problema de fondo pareciera estar en otro lado que, según el INTA, es la falta de consumo de agua por la agricultura actual. Es urgente tomar medidas y comenzar a intensificar la agricultura regional pensando en dobles cultivos, cultivos de cobertura, maíz y tal vez también pasturas y ganadería.

Conclusiones

- Existe variabilidad de rendimientos aun en suelos clase I y II según la influencia de la napa en los cultivos.
- Los ambientes con influencia de napa positiva tienen un potencial y una estabilidad de producción muy altas, por lo que una vez identificados hay que aprovecharlos intensificando la rotación y ajustando variables para lograr altos rendimientos de los cultivos.
- Los ambientes sin influencia de napa son también muy productivos, pero con algún riesgo de sufrir sequía ante un evento extremo.

- Los ambientes con influencia de napa negativa se están incrementando en forma preocupante en los últimos años y se han tornado muy complicados para producir.
- El ascenso de la napa no está asociado a largo plazo con las lluvias sino con el consumo de agua por lo que es extremadamente importante que tomemos conciencia de esto y nos pongamos a consumir el agua excedente intensificando rotaciones y aumentando la proporción de maíz o sorgos en las mismas.

Referencias

Bertram N. y S. Chiacchiera. 2014. Ascenso de napas en la Región Pampeana: ¿Consecuencia de los cambios en el uso de la tierra? INTA EEA Marcos Juárez. Disponible en http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_napas_mjz_13.pdf.

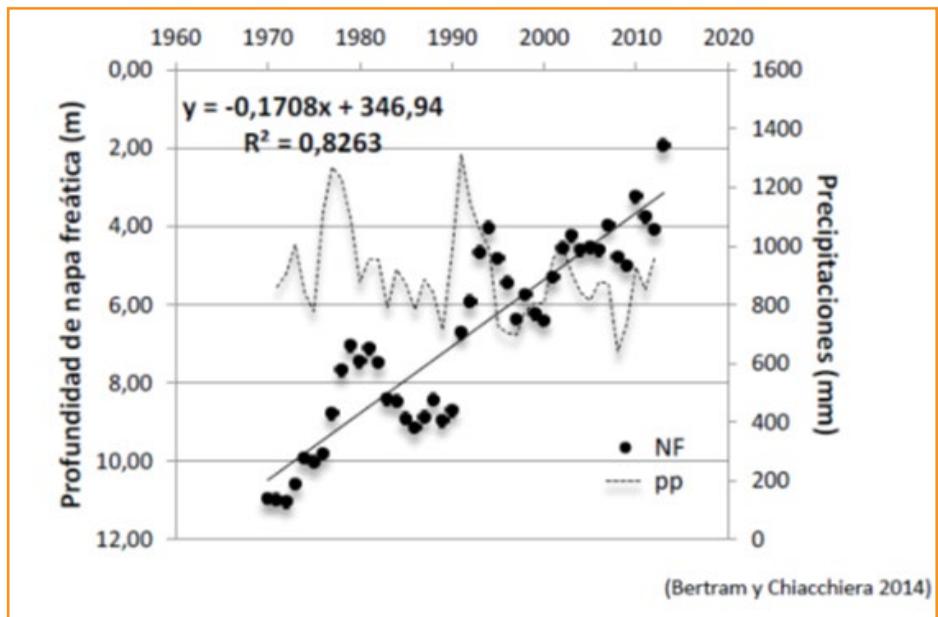


Figura 3. Evolución de la profundidad de napa freática (m)(•) y las precipitaciones (mm)(---) entre 1970 y 2012 para Marcos Juárez (Córdoba). Fuente: Bertram y Chiacchiera (2014).

Zinc en maíz: ¿Cuándo, cuánto y cómo fertilizar?

Pablo A. Barbieri

EEA INTA Balcarce-CONICET

Contacto: barbieri.pablo@inta.gob.ar

Introducción

La producción de granos en la región pampeana se ha incrementado sustancialmente durante los últimos años. A su vez, la intensificación de la actividad agrícola y la falta de rotaciones con pasturas ha producido una notable disminución de los niveles de materia orgánica (MO) de los suelos de la región pampeana y extrapampeanas (Sainz Rozas et al., 2011), los que, en algunos casos, dependiendo del tipo de suelo y textura, presentan solo el 50% de su nivel original (Alvarez, 2001; Lavado, 2006). Además, esta caída en los niveles de MO se ha producido fundamentalmente a expensas de la disminución de las fracciones más lábiles de la misma, que son las que poseen mayor capacidad de liberar nutrientes (Brady y Weil, 1999). El agotamiento de dichas fracciones, explicaría la respuesta generalizada al agregado de nitrógeno (N) (Echeverría y Sainz Rozas, 2005) y, en menor medida, a azufre (S) (Urricarriet y Lavado 1997; Reussi Calvo et al., 2008).

Más allá de ser requeridos en pequeñas cantidades para el crecimiento y desarrollo de los cultivos, los micronutrientes pueden ser deficientes en el suelo y limitar las funciones metabólicas de las plantas. Las deficiencias de micronutrientes son menos frecuentes que las de N, P y S en los suelos de la región pampeana, ya sea por no manifestarse en forma aguda, o porque debido a la falta de investigación, no se las ha detectado e informado (Fontanetto et al., 2009). La caída de los niveles de MO, la mayor exportación de cinc (Zn) en grano, potenciada en parte por el uso de mayores dosis de N (Goldman et al., 2002), la escasa o nula aplicación del mismo y la mayor frecuencia de soja en las rotaciones, cultivo que exporta mayor cantidad de Zn en grano que trigo o maíz (Rashid y Fox 1992), podrían generar condiciones de deficiencias de este micronutriente.

En un relevamiento de suelos de aptitud agrícola de la región pampeana realizado en la década del 80, se determinó que los contenidos de Zn se ubicaban por debajo de la media inter-

nacional y próximos a los umbrales de deficiencia, pudiendo ser limitantes para el cultivo de maíz (Sillanpaa, 1982). Más recientemente, Sainz Rozas et al. (2013) realizaron un relevamiento de micronutrientes en suelos de Región Pampeana con más de 15 años de agricultura y bajo condición pseudo-prístina. Dichos autores informaron que los niveles de Zn en suelos bajo agricultura han disminuido notablemente respecto de la situación prístina (70%), determinándose que el 50% de las muestras (n= 550) mostraron valores iguales o menores a 0.9 mg Zn kg⁻¹, valor considerado como crítico por la bibliografía internacional (Sims y Johnson, 1991) (**Figura 1**).

Si bien el cultivo de maíz es una de las especies más sensibles a la deficiencia de Zn (Lindsay y Norvell, 1978; Gupta et al., 2008; Alloway, 2009) y son cada vez más frecuentes los reportes que indican incrementos en rendimiento por efecto de su aplicación, es importante destacar que la respuesta al agregado de Zn en la región pampeana y extrapampeana (33% de los casos; n=64) no se relaciona con el potencial de rendimiento de cada sitio (**Figura 2**), dado que la misma no se relacionó con el rendimiento máximo de cada sitio-año (tratamiento +Zn; $p \geq 0,63$; $r^2 = 0,02$; n=64). Esto sugiere que, como para otros nutrientes de baja movilidad (por ej. P), la mejora en el rendimiento por incidencia de otros factores (por ej. agua) no produce mayor respuesta en condiciones de baja disponibilidad de Zn. Esto sería atribuido al incremento del crecimiento del sistema radicular y, por ende, de la capacidad de exploración del suelo por mejoras en las condiciones de crecimiento (Gutiérrez Boem y Steinbach, 2012).

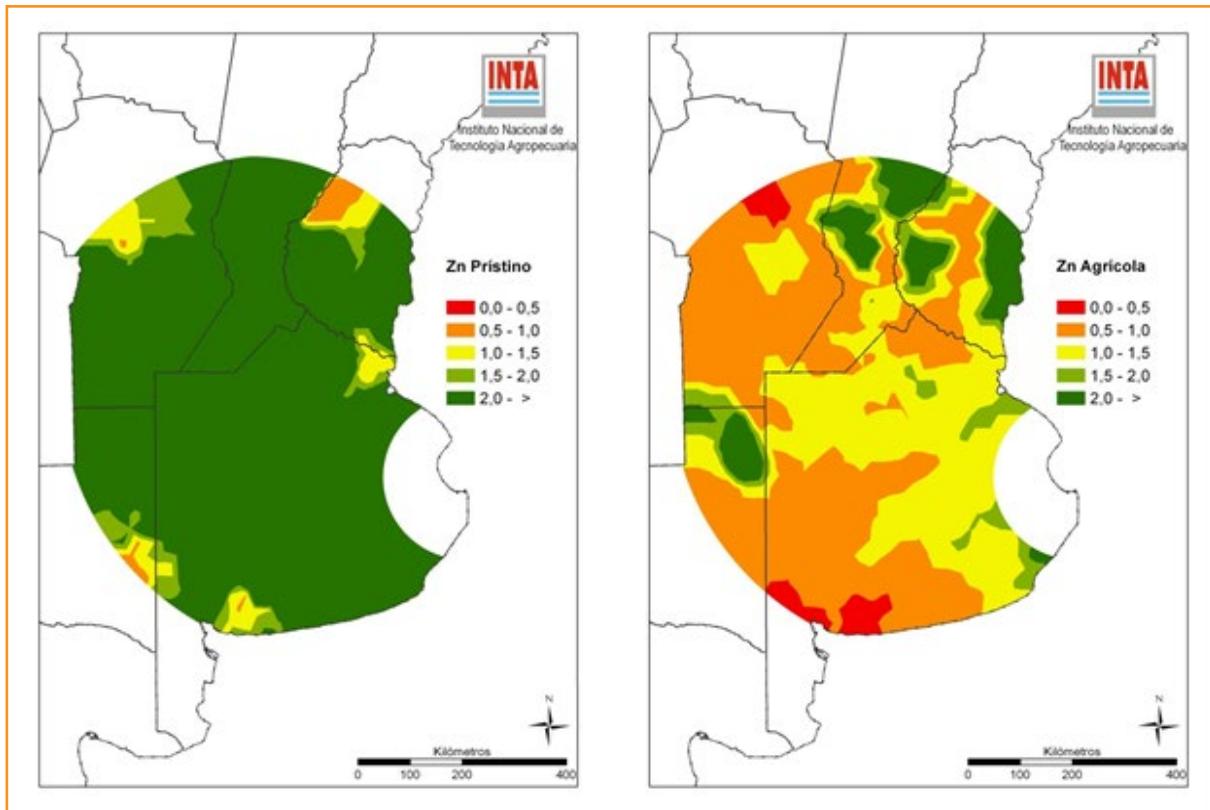


Figura 1. Concentraciones de Zn extractable con DTPA en suelos prístinos (izquierda) y bajo agricultura (derecho) de la Región pampeana y extra pampeana (0-20 cm). Áreas de suelos deficientes en Zn en rojo, contenidos medios en amarillo y bien provistos en verde.

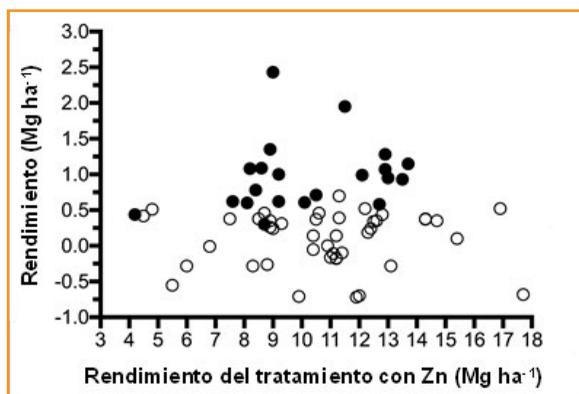


Figura 2. Relación entre la respuesta en rendimiento del cultivo de maíz y el rendimiento de los tratamientos fertilizados (círculos llenos y vacíos indican sitios con y sin respuesta, respectivamente).

El desarrollo de métodos de diagnóstico adecuados para evaluar la disponibilidad de Zn es clave para un manejo racional del mismo. El extractante más utilizado es el DTPA-TEA (ácido dietilén-triamino pentaacético-trietanolamina) propuesto por Lindsay y Norvell (1978). El mecanismo de acción de este extractante es a través

de la formación de complejos con los cationes solubles del suelo, lo que provoca el desplazamiento de aquellos que se encuentran en los sitios de intercambio y formando complejos con la MO. Barbieri et al. (2017) informaron que el uso de DTPA permitió un diagnóstico adecuado de la disponibilidad de Zn, para suelos de la Región Pampeana y extrapampeana (n=64 sitios año) que presentaban variaciones importantes de textura y MO, siendo el umbral determinado de 1.06 mg kg^{-1} y el intervalo de confianza de 0.87 a 1.3 mg kg^{-1} (Figura 3). Sitios con contenidos inferiores a 0.87 y superiores a 1.3 mg kg^{-1} , tendrían una alta y baja probabilidad de respuesta al agregado de Zn, respectivamente. Valores intermedios representan situaciones de respuesta a la fertilización incierta.

Otro extractante posible de utilizar es el Mehlich-3 (M3) ($\text{CH}_3\text{COOH} + \text{FNH}_4 + \text{HNO}_3 + \text{EDTA} + \text{NO}_3\text{NH}_4$), el cual tiene la ventaja de ser un extractante multinutriente que permite, contando con un equipo de plasma inducido, poder determinar rápidamente varios nutrientes a la vez a partir de un único extracto. Rodríguez et al. (2005), trabajando con suelos de España con pH de 4.7 a 7.6, informaron que M3 y DTPA se correlacionaron significativamente ($r^2 = 0.91$), pero el primero extrajo aproximadamente el doble de Zn debido a su mayor acidez (pH= 3) respecto a DTPA (pH=

7.3). Para suelos de la región pampeana, Larsen (2017) determinó correlación significativa entre los extractantes DTPA y M3 ($r^2 = 0.86$; $n=34$). El nivel crítico determinado mediante la metodología de M3 fue superior al obtenido con DTPA (2.27 y 1.07 mg kg^{-1} , respectivamente), esto sería debido a que el pH de la solución extractora en M3 es más ácido respecto al de DTPA (2.5 y 7.3 para M3 y DTPA, respectivamente), lo que produce una mayor solubilización de fracciones de Zn menos disponibles. La asociación entre el RR y M3 mostró una menor asociación respecto que DTPA ($r^2=0.41$

vs 0.52 para M3 y DTPA, respectivamente) por consiguiente, el uso de M3 no mejoraría el diagnóstico de la disponibilidad de Zn siendo limitado su uso respecto de DTPA. Cuando el contenido de Zn en el suelo se determinó mediante M3 (Figura 4) se observó similar comportamiento que para DTPA, es decir, el contenido de Zn en suelo no fue adecuado para la estimar la respuesta en rendimiento del cultivo de maíz. Sin embargo, fue apropiado para separar sitios de probable respuesta de aquellos de respuesta improbable. Estos resultados, constituyen un avance significativo para el diagnóstico de la disponibilidad de Zn y el manejo de la fertilización en la Región Pampeana, dado que hasta el momento no se contaba con información local que abarquen un amplio rango de condiciones edafoclimáticas.

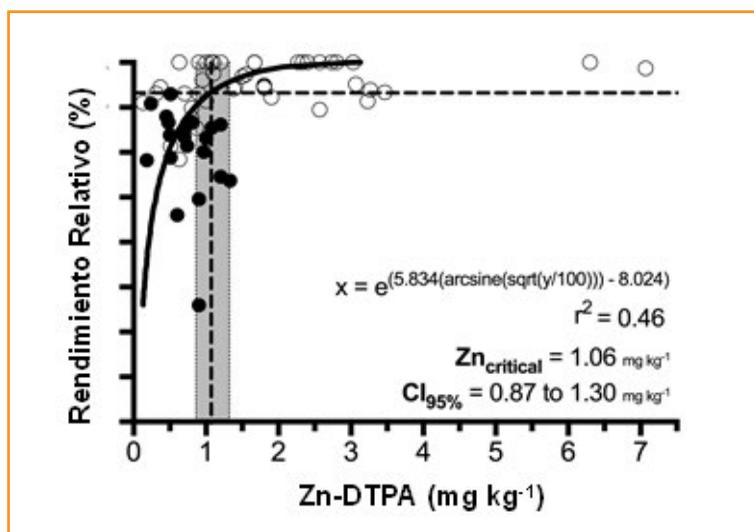


Figura 3. Relación entre el rendimiento relativo de cultivo de maíz (RY) en los tratamientos testigos y el contenido de Zn-DTPA (0-20 cm). Método arcoseno logaritmo modificado (Correndo et al., 2017). El nivel crítico de Zn ($Zn_{critical}$) fue estimado en 1.06 mg kg^{-1} para un RY de 97% (círculos llenos y vacíos indican sitios con y sin respuesta, respectivamente). CI indica rango crítico.

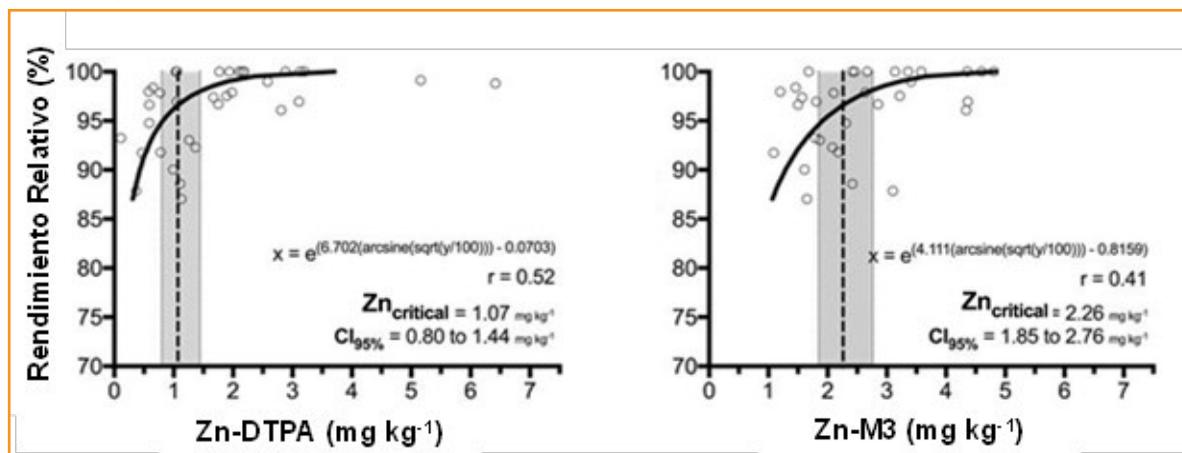


Figura 4. Relación entre el rendimiento relativo del cultivo de maíz (RR) en los tratamientos testigos y el contenido de Zn-DTPA (0-20 cm) y Mehlich 3 (M3). Método arcoseno logaritmo modificado (Correndo et al., 2017). En ambas figuras, el nivel crítico de Zn ($Zn_{critical}$) fue estimado para un RY de 97%. CI indica rango crítico al 95% de confianza.

Ante un escenario similar al de las últimas décadas, es probable que la deficiencia de Zn aumente en los próximos años, provocando que la aplicación de dicho nutriente sea una práctica cada vez más frecuente. En tal situación, es importante conocer cuál de las tecnologías de aplicación de Zn es la más adecuada, tanto desde el punto de vista productivo como de la eficiencia de uso de este nutriente. El concepto de las mejores prácticas de manejo (MPM) de la nutrición y fertilización consiste en aplicar la dosis, la fuente y la forma en el momento correcto (Bruulsema et al., 2008). La aplicación de las MPM permitirá incrementar los rendimientos y mejorar las eficiencias de uso de recursos e insumos maximizando el beneficio económico y minimizando el impacto ambiental. La combinación de distintas fuentes y métodos de aplicación del fertilizante genera diferentes tecnologías de aplicación, cada una de las cuales tiene ventajas y desventajas.

Las fuentes de Zn más utilizadas son los sulfatos, quelatos y óxidos (Melgar, 2006), mientras que los métodos de aplicación más utilizados en cultivos extensivos de secano son la aplicación al suelo, en la semilla y vía foliar, siendo las dosis de Zn comúnmente utilizadas de 2-8, 0.2-0.3 y 0.5-0.7 kg ha⁻¹ respectivamente. La aplicación al suelo permite aplicar dosis medias o altas y generar residualidad del nutriente, aunque su interacción con el suelo puede reducir su disponibilidad, principalmente en suelos con presencia de carbonato de calcio (CaCO₃) y pH elevados (Cakmak, 2008). El tratamiento de la semilla, permite distribuir pequeñas cantidades de manera uniforme, pero presenta las desventajas de que sólo se pueden aplicar bajas dosis (Prystupa et al., 2012). Para la fertilización foliar se utilizan fertilizantes solubles en agua que pueden ser aplicados junto con otros agroquímicos como

herbicidas, insecticidas o fungicidas (Ferraris, 2011). A su vez, la aplicación foliar evita las interacciones con el suelo. La desventaja es que no presenta efecto residual y que tiene mayor dependencia de las condiciones ambientales para su aplicación (Prystupa et al., 2012).

Resultados de ensayos realizados en 8 sitios en la Región Pampeana mostraron que no se determinaron diferencias entre tecnologías de aplicación de Zn a la semilla, foliar (V6), y semilla + foliar (V6). Similares resultados se obtuvieron para 5 sitios cuando se compararon aplicaciones de Zn a la semilla, al suelo y foliares (V6) (**Figura 5**) (Barbieri, inédito). Estos resultados muestran que no se determinaron diferencias significativas entre tecnologías de fertilización, similares resultados fueron informados por Ferraris et al. (2010) cuando se evaluaron tres tecnologías de aplicación de Zn (a la semilla, foliar y al suelo) en la Pampa Ondulada.

No obstante lo mencionado, la magnitud de la respuesta fue mayor con el aumento de la dosis de Zn suelo>foliar+semilla>foliar>semilla (**Figura 6**). Cuando se calculó la eficiencia de uso aparente a la fertilización con Zn, es decir los kg de grano por kg de Zn aplicado (diferencia de rendimiento de los tratamientos fertilizados y testigos dividido la dosis de Zn), la tendencia fue inversa los tratamientos con menores dosis produjeron más grano por kg de Zn aplicado (**Figura 7**). Por lo tanto, a la hora de optar por una tecnología de Zn, se recomienda tener en cuenta las ventajas y desventajas de cada una. Si se busca reconstruir el nivel de Zn disponible en suelo, la aplicación al suelo sería la recomendable, siempre y cuando los suelos tengan baja capacidad de fijación. Si el objetivo es maximizar la eficiencia de uso aparente de Zn la aplicación foliar o a la semilla serían las indicadas.

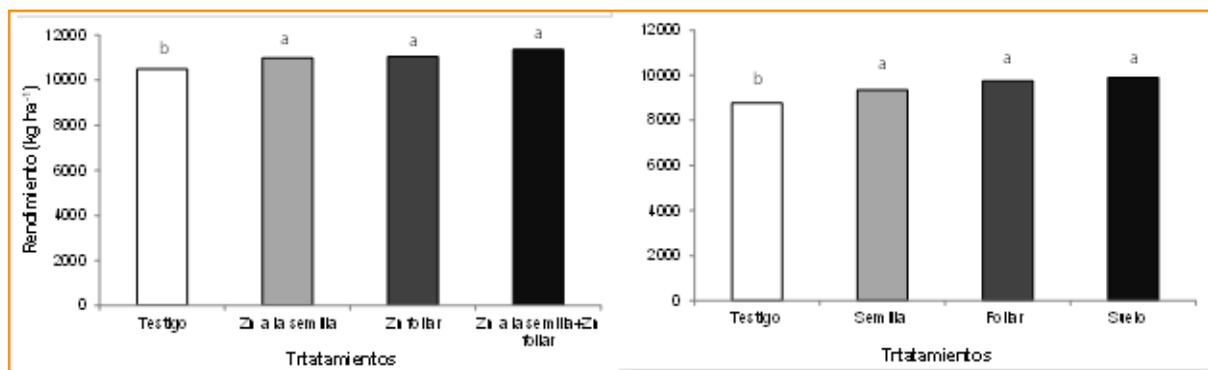


Figura 5. Rendimiento del cultivo de maíz en función de la tecnología de aplicación de Zn.

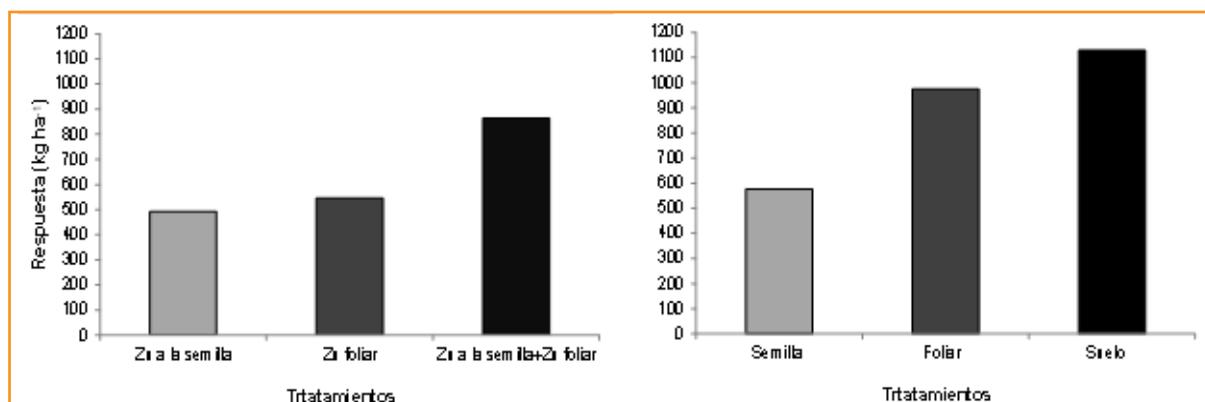


Figura 6. Respuesta del cultivo de maíz en función de la tecnología de aplicación de Zn.

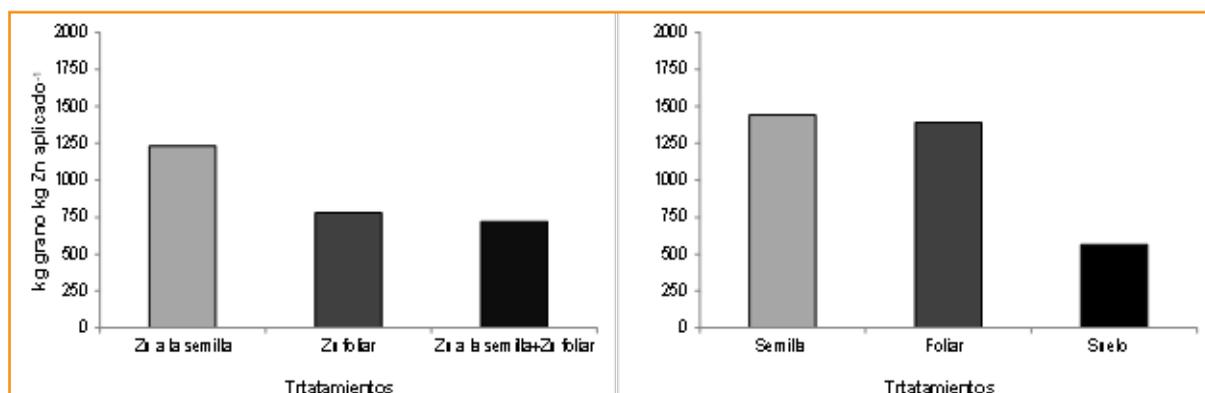


Figura 7. Eficiencia de uso aparente de Zn por el cultivo de maíz en función de la tecnología de aplicación.

Conclusiones

La disponibilidad de Zn podría limitar el rendimiento del cultivo de maíz en la región pampeana y extrapampeana. Se determinaron umbrales de respuesta a la aplicación de Zn para la Región pampeana y extrapampeana mediante el uso de 2 extractantes DTPA y Mehlich 3 (1.07 y 2.26 mg kg⁻¹, respectivamente), por encima de los cuales la respuesta a la fertilización con Zn es poco probable. Las formas de aplicación de Zn (semilla, suelo o foliar) fueron igualmente eficientes para incrementar el rendimiento del cultivo de maíz.

Agradecimientos

PIP CONICET D3169, INTA PNSUELO-1134024, Hernán Sainz Rozas (EEA INTA Balcarce, Gustavo Ferraris (INTA Pergamino), Fernando Salvagiotti (EEA INTA Oliveros), Juan Cruz Colazo (EEA INTA San Luis) y Hector Sánchez (EEA INTA Famailla).

Bibliografía

- Alloway, B.J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environ. Geochem. Health*. 31:537-548.
- Alvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century Model. *Soil Use and Man*. 17: 62-66.
- Barbieri, P.A., H.R. Sainz Rozas, N. Wyngaard, M. Eyherabide, N.I. Reussi Calvo, F. Salvagiotti, A.A. Correndo, P.A. Barbagelata, G.P. Espósito Goya, J.C. Colazo, H.E. Echeverría. 2017. Can edaphic variables improve DTPA-based zinc diagnosis in corn? Trabajo Aceptado en SSSAJ.
- Brady, NC, RR Weil. 1999. The nature and properties of soil. 20th ed. Prentice-Hall, New Jersey, USA. 881 p.
- Bruulsema, T., C. Witt, F. Garcia, S. Li, T.N. Rao, F. Chen, S. Ivanova. 2008. A Global Framework for Fertilizer BMPs. Better Crops IPNI. Norcross, EE.UU. 92: pp. 13-15.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant Soil*. 302:1-17.
- Correndo, A.A., F. Salvagiotti, F.O. García, F.H. Gutiérrez-Boem. 2017. A modification of the arcsine-log calibration curve for analysing soil test value-relative yield relationships. *Crop and Pasture Science* 68(3), doi:10.1071/CP16444.

- Echeverría, H.E., H.R. Sainz Rosas 2005. Nitrógeno. Pp. 69-95. En: HE. Echeverría y FO. García (eds). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Ferraris, G.N. 2011. Micronutrientes en cultivos extensivos. ¿Necesidad actual o tecnología para el futuro? En: Simposio Fertilidad 2011: García, F.O., y A.A. Correndo (Eds.). La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción. Actas Simposio Fertilidad 2011. 18 y 19 de Mayo del 2011. Rosario, Santa Fe, Argentina, IPNI Cono Sur - Fertilizar AC: 121-133.
- Ferraris, G.N., L. Couretot, L.A., Ventimiglia, F. Mousegne. 2010. Respuesta al zinc en maíz utilizando diferentes tecnologías de aplicación en la Región Centro Norte de Buenos Aires. IX Congreso Nacional de Maíz. Mesa de Fertilidad y Nutrición del cultivo. AIANBA. Rosario, Noviembre de 2010.
- Fontanetto, H; O Keller, J Albrecht, D Gialivera, C Negro, L Belotti. 2009. Manejo de la fertilización de la soja en la Región Pampeana norte y en el NOA Argentino. Mejores Prácticas de Manejo. Simposio Fertilidad 2009 (Santa Fe, Rosario, may 13-14). Pp. 109-118.
- Goldman, V., H.E. Echeverría, F.H. Andrade, S.A. Uhart. 2002. Incidencia de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de nutrientes en maíz. Ciencia del Suelo 20: 27-35.
- Gupta, U.C., W.U. Kening, L. Siyuan. 2008. Micronutrients in Soils, Crops, and Livestock Earth Science Frontiers. 15:110-125
- Gutiérrez Boem, F.H., H.S. Steinbach. 2012. Leyes de la fertilidad. En: Álvarez R., P. Prystupa, M.B. Rodríguez, C.R. Álvarez (eds.). Fertilización de cultivos y pasturas: diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Editorial Facultad Agronomía, Buenos Aires, Argentina. 656 p.
- Larsen, B.E. 2017. Diagnóstico de disponibilidad de cinc en suelos de la Región Pampeana Argentina para el cultivo de maíz: comparación de dos extractantes. Tesis Grado FCA Balcarce-UNMdP.
- Lavado, R. 2006. La Región Pampeana: Historia, características y uso de sus suelos. En: Álvarez R. (ed.) Materia Orgánica "Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos" Editorial Facultad de Agronomía, UBA. Buenos Aires, Argentina. pp. 1-11.
- Lindsay, W.L., W.A. Norvell. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42:421-428.
- Melgar, R. 2006. Fertilizantes con micronutrientes en el mercado argentino. En: Vázquez, M. (Ed.). Micronutrientes en la agricultura. Diagnóstico y fertilización en Argentina. La experiencia brasilera. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires. pp.167-175.
- Prystupa, P., M. Torres Duggan, G.N. Ferraris. 2012 Tecnología de aplicación de micronutrientes en la Región Pampeana Argentina. Archivo Agronómico N° 14, Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, IPNI, N° 5. pp. 2-8.
- Rashid, A., R.L. Fox. 1992. Evaluating internal zinc requirements of grain crop by seed analysis. Agron, J 84: 469-474.
- Reussi Calvo, N., H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rosas. 2008. Usefulness of Foliar Nitrogen-Sulfur Ratio in Spring Red Wheat. Journal of Plant Nutrition. 31: 1612-1623.
- Rodríguez, P., M.J. Lema, G. González, S. González Pimentel. 2005. Evaluación del reactivo Mehlich 3 como extractante multielemental. [on line] <<http://www.efadip.org/comun/publicaciones/comunicaciones/2005/Mehlich.pdf>> [consulta: 28 noviembre 2014].
- Sainz Rosas, H., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P.A. Barbieri, H.P. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris, M.R. Barraco. 2103. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? Actas del Simposio Fertilidad 2013. IPNI-FERTILIZAR. Rosario, 22 a 23 de Mayo de 2013.
- Sainz Rosas, H.R., H.E. Echeverría, H.P. Angelini. 2011. Niveles de materia orgánica y de pH en suelos agrícolas de la Región Pampeana y extrapampeana Argentina. Ciencia del Suelo 29:29-37.
- Sillanpaa, M. 1982. Micronutrients and the nutrient status of soils: A global study. FAO Soils Bulletin 48. Pgs.169-179.
- Sims, J.T., G.V. Johnson. 1991. Micronutrient soil tests. In micronutrients in agriculture (Book series 4): 427-476. Mortvedt, J.J, Cox F.R., Shuman L.M. y M.R. Welch (Eds.) Ed. SSSA Madison, Winsconsin, USA
- Urricarriet S., R.S. Lavado. 1999. Indicadores de deterioro de los suelos de la Pampa Ondulada. Ciencia del Suelo 17:37-44. ●

Micronutrientes en región pampeana argentina: Diagnóstico de carencias y tecnología de aplicación

Gustavo N. Ferraris

UCT Agrícola. Manejo de Cultivos INTA EEA Pergamino

Av Frondizi km 4,5 (2700) Pergamino, Buenos Aires

Contacto: ferraris.gustavo@inta.gob.ar

Introducción

Los planteos tecnológicos de alta producción de soja incluyen hoy el uso de fertilizantes fósforo-azufrados y también la inoculación como modo de proveer nitrógeno (N) al cultivo. Sin embargo, en cultivos de alto rendimiento o sobre suelos altamente degradados, otros elementos, denominados micronutrientes, podrían limitar la producción (Ferraris y Couretot, 2009 a, b). El término "micronutriente" es utilizado en agricultura para denominar aquellos elementos esenciales para los cultivos, que se presentan en concentraciones extremadamente bajas en los suelos y tejidos vegetales (Torri et al., 2010). Para los cultivos extensivos de grano, existe evidencia de que boro (B), cobalto (Co), molibdeno (Mo), manganeso (Mn) y zinc (Zn) podrían ser potencialmente limitantes en la Región Pampeana Argentina (Ferraris et al., 2005; Ferraris, 2011 a; b; 2012; 2014; Fontanetto et al., 2006) y otras regiones del mundo (Prochnow et al., 2009; Scheid López, 2006)

El objetivo es definir los pasos de un conjunto de factores que, sobre la base de los datos generados en las últimas campañas, deberían ser observados para avanzar en el diagnóstico nutricional del cultivo.

¿Como posicionamos a los microelementos?

Diagnóstico de deficiencias y condiciones predisponentes

1. Análisis de nutrientes en suelo

El análisis del contenido de un nutriente en el suelo es la herramienta básica, y la primera que debe relacionarse con el rendimiento o la respuesta a la fertilización. En algunos casos se tiene en cuenta la concentración en la solución del suelo, mientras que en otras ocasiones se considera la fracción intercambiable, o formas

orgánicas lábiles fácilmente disponibles por mineralización.

Con excepciones, aquellos elementos de baja movilidad en suelo presentan menor variabilidad temporal y su concentración está menos expuesta a factores ambientales. La respuesta a su aplicación depende principalmente del contenido en el suelo, más que de la demanda generada por el nivel de productividad del cultivo, por lo tanto, la confiabilidad de los análisis de suelo aumenta. Ferraris (2012) analizó la respuesta a Zn en maíz en siembras tempranas de setiembre-octubre. Experimentos conducidos entre 2008/09 y 2011/12, determinaron que el análisis de suelo separaba eficazmente 14 de 18 sitios mediante el método de cuadrantes, tomando la concentración de 1 ppm en capa superficial de suelo (0-20 cm) y un rendimiento relativo $RR = (\text{Rendimiento testigo} / \text{Rendimiento fertilizado})$ de 0.95, por debajo del cual se considera respuesta efectiva. Criterios de este tipo han sido recomendados en regiones deficientes de EE.UU. (Pais y Benton Jones, 2000) y Brasil (Galrao, 1996; Scheid López, 2006) (**Tabla 1**). Estudios recientes muestran que gran parte de la región pampeana argentina presenta valores inferiores a los umbrales propuestos y, sobre todo, una paulatina disminución por causa de un balance negativo en el tiempo (Rotondaro, 2016) (**Figura 1**).

Tabla 1. Categorías de disponibilidad de Zn en suelo sugeridas por diferentes autores, correspondiendo a muestras de 0-20 cm profundidad (citado por Scheid López, 2006).

Categoría	Raj et al., 1996 (*) San Pablo	Galrao, 1998 (*) Cerrado	López et al., 1994 (**) Mina Gerais	Etchevers, 2006 (*) INIA, Chile
Bajo	<0.5	<1.0	<0.9	<0.5
Medio	0.6-1.2	1.1-1.6	1-1.5	0.5-1.0
Alto	>1.2	>1.6	>1.6	>1.0

Extractante: (*) DTPA, (**) Mehlich III

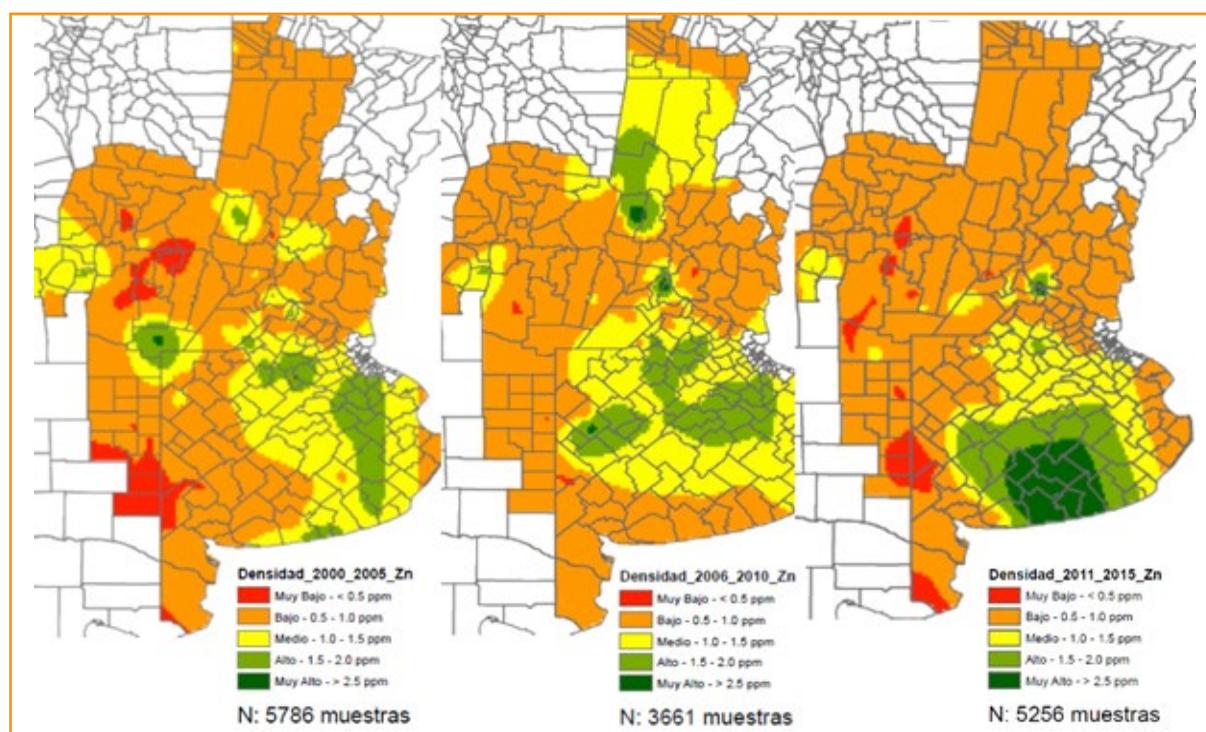


Figura 1. Disponibilidad de Zn en suelo (DTPA-0-20 cm) según período de análisis. Fuente: Laboratorio Suelo Fértil.

En la **Figura 2** se presenta un sistema de recomendación para el agregado de Zn en maíz. De acuerdo con el esquema planteado, el análisis de suelo es la herramienta fundamental de decisión, pero como este no pertenece al paquete básico que por defecto realizan los laboratorios, se pediría su inclusión sólo en caso de verificarse condiciones predisponentes, entre las que se destacan un pH fuera del rango óptimo, siembras tempranas con suelos fríos, o haber observado el síntoma en campañas anteriores. Una vez realizado el análisis, la decisión de fertilización se tomaría comparando el valor determinado en la parcela en cuestión con los umbrales calibrados regionalmente.

2. Contenido de materia orgánica

La materia orgánica (MO) del suelo puede proveer nutrientes a la solución por medio de la mineralización de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, como el ácido acético, cítrico o málico. El B es el microelemento donde la fracción orgánica adquiere mayor importancia, llegando a constituir hasta el 95% de su reserva en el suelo (Marschner, 1992).

En una serie de experimentos conducidos por diferentes grupos de investigación en el sur de Córdoba, centro y sur de Santa Fe, y centro, oeste y norte de Buenos Aires, se determinó una fuerte asociación entre Zn disponible y contenido de MO en suelo. Por sí sólo, el nivel de Zn demostró escasa robustez como indicador de respuesta. Sin embargo, si se seleccionan aquellos sitios

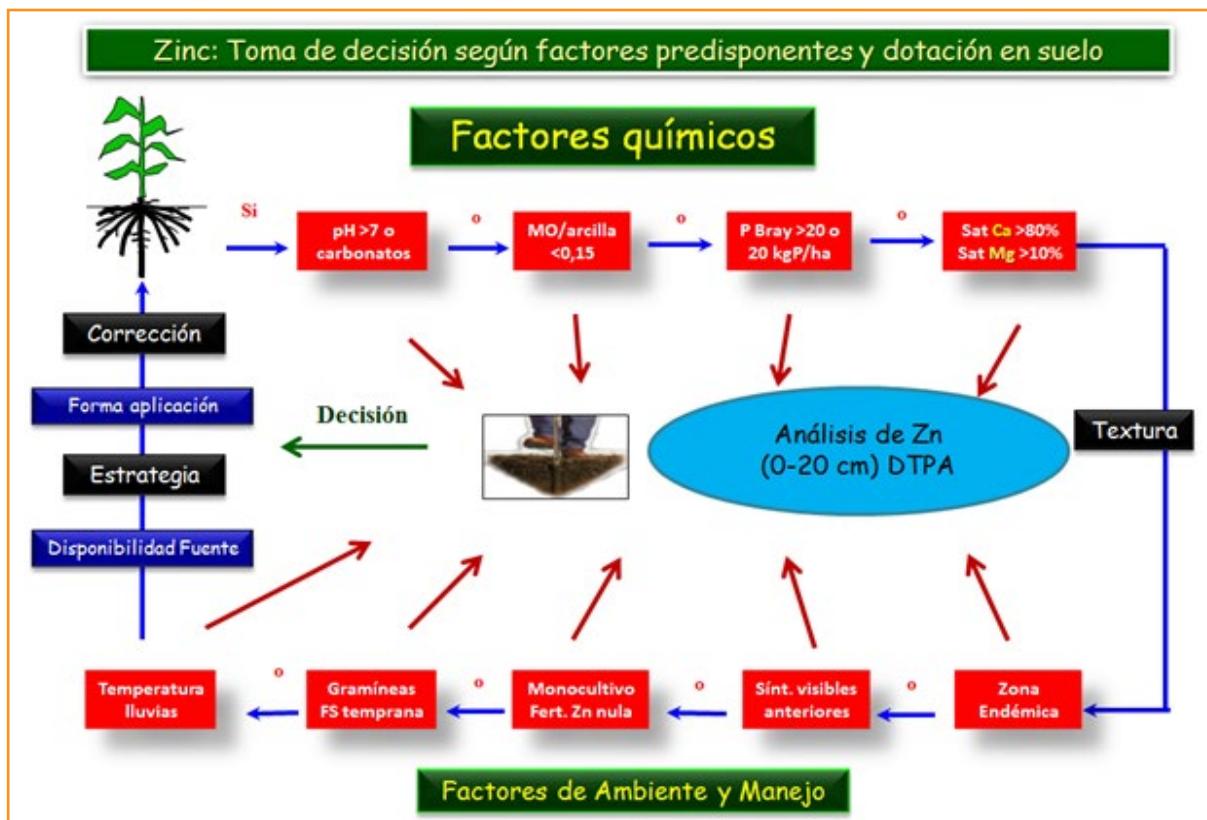


Figura 2. Sistema de recomendación para la fertilización con Zn en maíz. Se recurriría a realizar un análisis de Zn en capa superficial de suelo (0-20 cm) de presentarse condiciones predisponentes. Finalmente, se recomienda la fertilización cuando la concentración en suelo está por debajo del umbral propuesto regionalmente. Ej: $< 1 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn (DTPA) para maíz en región pampeana argentina.

con escasa capacidad de mineralización a partir de un contenido de MO menor a 2%, la correlación entre respuesta y Zn disponible aumenta considerablemente.

3. pH del suelo

El pH modifica la disponibilidad de los microelementos en sentido diferente según características propias del nutriente, i.e. el grupo químico al que pertenezca. El pH modifica las especies iónicas predominantes y su concentración, esto afecta su movilidad y solubilidad en el suelo, condicionando la absorción por parte del cultivo.

En general, los micronutrientes catiónicos como Zn, Mn, hierro (Fe), o cobre (Cu) aumentan su biodisponibilidad a bajos valores de pH (Malavolta et al., 1997). Las carencias de Zn y otros cationes son características en suelos con presencia de calcáreo, horizontes thapto con presencia de carbonato de calcio, o suelos con alto contenido de arcillas expandibles con alta saturación cálcica, donde este elemento desplaza a los microelementos catiónicos de

sus sitios de intercambio (Quintero et al., 2006) (Fotografía 1). El Mo y el cloro (Cl) aumentan su disponibilidad en valores de pH alcalino. El B varía poco su disponibilidad con el pH, siendo ligeramente superior en el rango neutral de 6 a 7.5, y cayendo en valores superiores a 7.5, a causa de su adsorción aniónica.



Fotografía 1. Clorosis férrica en soja sobre un suelo con alcalinidad en Rojas, Noreste de la provincia de Buenos Aires.

4. Interacciones entre nutrientes

La nutrición es un fenómeno muy complejo y el agregado de un elemento suele modificar la disponibilidad y eficiencia de otros, a través de procesos que pueden darse en el suelo - solubilización, adsorción, fijación, acomplejamiento en formas orgánicas- como también por efectos sobre la fisiología de las plantas (Marschner, 1998; Fancelli, 2006). Desde hace tiempo se conoce que el fósforo agregado como fertilizante en forma localizada provoca la formación de bandas de alta concentración que suelen reaccionar con el Zn, formando complejos insolubles. Esta sería una de las causas de la creciente proliferación de la sintomatología de carencia de Zn en maíces de siembra temprana, especialmente cuando las primaveras son frías y los suelos de baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Fancelli, 2006). Los complejos son más estables a valores de pH elevado. El fenómeno es temporal, y suele revertirse cuando aumenta la temperatura y la exploración del suelo por parte de las raíces.

5. Factores de cultivo y ambientales

a. Crecimiento bajo estrés moderado

Aun cuando los efectos del ambiente son complejos y nunca actúan en una sola dirección, existe evidencia experimental en la región pampeana argentina que indica que la respuesta al uso de microelementos es más probable bajo condiciones de estrés. Entre las campañas 2005/06 y 2013/14, Ferraris y col. realizaron 113 experimentos de campo en soja, incluyendo 489 tratamientos. Los experimentos fueron conducidos en las localidades de La Trinidad (General Arenales), Pergamino (Pergamino), Rancagua

(Pergamino), Sarasa (Colón), San Antonio de Areco (SA de Areco), Wheelwright (General López) y Juncal (Constitución), los cinco primeros en el Noroeste de Buenos Aires y los dos restantes en el Sur de Santa Fe. Si se compara la respuesta obtenida en los ciclos secos como 2005/06, 2010/11 y 2012/13, con precipitaciones por debajo de la media histórica y déficit de evapotranspiración en todos los casos superior a 150 mm, esta superó en frecuencia a la media, obteniéndose un 53% de sitios con resultados positivos ($P < 0.10$ en 26 (49) experimentos) (Figura 3). En estos experimentos, la respuesta media obtenida alcanzó a 10.8% y 6.9% para aplicaciones en el estado vegetativo y reproductivo, respectivamente. Por el contrario, en los años con balance hídrico positivo, un 26% de los experimentos mostraron respuesta ($P < 0.10$ en 8 (29) ensayos).

b. Recuperación luego de estrés severo

Una condición puntual de estrés agudo podría favorecer la respuesta al agregado externo de microelementos, al aumentar la tasa de crecimiento durante el período en donde se observa una compensación de la pérdida de los órganos vegetativos -hojas- o reproductivos -vainas- del cultivo de soja. En un experimento conducido en la localidad de La Trinidad durante la campaña 2010/11, se realizaron aplicaciones foliares de B sobre parcelas enteras y defoliadas artificialmente en un 50% en inicios de floración (R1). Todas las parcelas enteras alcanzaron el 95% de intercepción en R5, sin embargo, las parcelas defoliadas sólo alcanzaron 91% en R5 y 95% en R6 cuando fueron fertilizadas, siendo

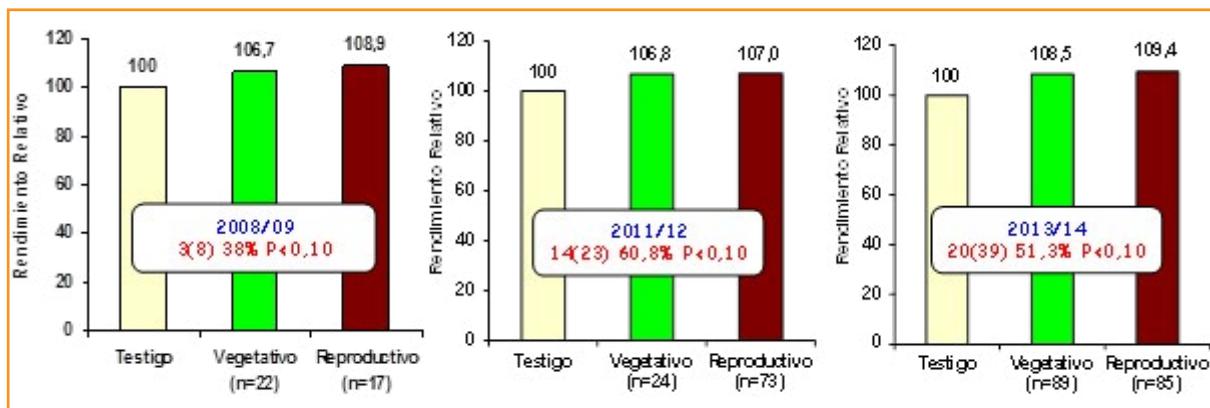


Figura 3. Rendimiento relativo al control (Testigo=100) como resultado de la aplicación de fertilizantes conteniendo microelementos en soja en años con estrés hídrico moderado o severo, en la región Centro Norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe.

las coberturas inferiores en los controles. Como consecuencia, la respuesta media a B fue de 275 kg ha⁻¹ en las parcelas enteras y de 877 kg ha⁻¹ en las defoliadas (Ferraris y Couretot, 2011). Este mismo enfoque se utilizó en un experimento en maíz pisingallo observando un comportamiento similar (Ferraris et al., 2015) (**Figura 4**). Lo propio se obtuvo comparando tratamientos con agregado de macro y microelementos en lotes afectados por granizo, en comparación con parcelas no dañadas localizadas en la misma región (Ferraris, 2014).

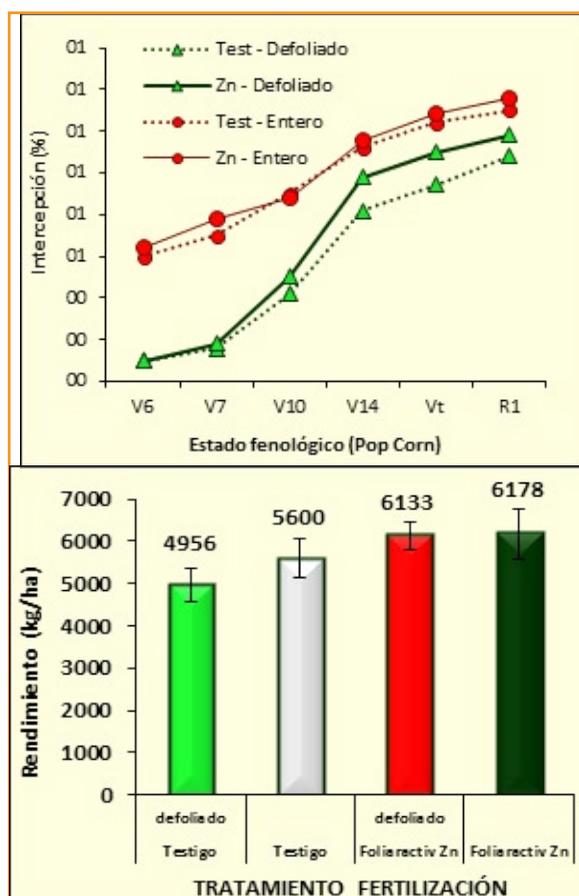


Figura 4. Evaluación de la cobertura del cultivo (a) y rendimientos de grano (b) según esquema de tratamientos de defoliación y aplicación foliar de Zn en maíz pisingallo. INTA EEA Pergamino, campaña 2014/15.

6. Interacciones positivas con otras prácticas agronómicas

En ocasiones, los tratamientos de protección pueden tener efectos antagónicos con el metabolismo nutricional. Huber et al. (2004) mencionan efectos depresores y deficiencia inducida en

cultivos transgénicos tratados con el herbicida glifosato, en comparación con sus isolíneas convencionales. En Argentina, resultados preliminares han evidenciado este comportamiento con sobredosis de herbicida (Ferraris y Couretot, 2012) (**Fotografía 2**). También se ha reportado una interacción positiva entre el uso de microelementos y fungicidas (**Figura 5**).



Fotografía 2. Sintomatología de deficiencia de Mn en Soja provocada por la duplicación en la dosis de herbicida. Localidad de Ferré, General Arenales, Buenos Aires.

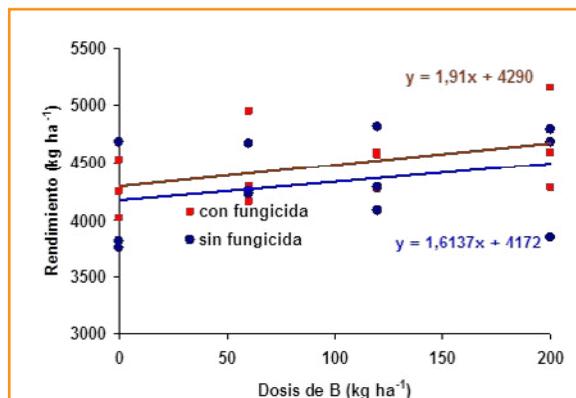


Figura 5. Relación entre rendimiento y dosis de B (g ha⁻¹) para tratamientos sin y con uso de fungicidas foliares. Pergamino, campaña 2010/11 (Ferraris et al., 2011).

Tecnología de aplicación de micronutrientes

Fuentes de micronutrientes

Las fuentes utilizadas pueden ser orgánicas e inorgánicas. La concentración, forma química y solubilidad varía considerablemente entre fuentes dificultando su comparación. Por este motivo, la concentración de una fuente y su costo por unidad de nutriente no es el parámetro más importante para cotejarlas, como suele hacerse

con los macronutrientes. Entre las fuentes más comunes pueden mencionarse los óxidos, sales, quelatos, complejos y polisacáridos. La prevalencia de cada una de ellas dependerá del nutriente, la dosis a aplicar, y la vía de incorporación, por lo que fuente y forma de aplicación deberían ser evaluados de manera conjunta. La solubilidad en agua es un parámetro importante, ya que guarda relación directa con la disponibilidad para el cultivo.

Para los tratamientos de semilla se suelen utilizar óxidos de alta concentración, ya que la cantidad de fertilizante aplicado por esta vía siempre es reducida. Las sales pueden tener restricciones de dosis para evitar efectos fitotóxicos, i.e. sulfato de zinc. También pueden ser utilizados quelatos. En aplicaciones foliares, los quelatos (neutralizan cationes) y complejos (neutralizan aniones y cationes) inorgánicos y orgánicos, aminoácidos, óxidos micronizados y polioles suelen ser la fuente más utilizada. Tienen carga neutra, son apropiados para mezclas de tanque con otros agroquímicos, y suelen ser fácilmente absorbidos y transportados por la planta. En la **Figura 6** se presenta un listado de las posibles formas químicas bajo las cuales se pueden encontrar micronutrientes catiónicos aportados a los cultivos de grano.

Formas de aplicación

Debido a las pequeñas dosis aportadas, los micronutrientes pueden aplicarse sobre semilla, por vía foliar o al suelo. Las tres vías son factibles y han mostrado resultados alentadores, ajustando fuentes, dosis, y metodologías de aplicación.

Consideraciones finales

La disponibilidad de micronutrientes en suelos para los cultivos extensivos ha sido históricamente considerada adecuada, y su aplicación mediante fertilizantes poco necesaria. Sin embargo, en los últimos años se han observado deficiencias en suelo y planta y creciente respuesta a su aplicación, como lo demuestran diversos trabajos realizados en la EEA Pergamino, en cultivos como soja, maíz y trigo, además de especies alternativas. Con ello, ha aumentado el conocimiento que permite la identificación de los síntomas, algunas características referidas a su ciclo y dinámica en los suelos, y seleccionar los fertilizantes disponibles para subsanarlos.

A partir de trabajos recientes, se conocen algunas combinaciones de nutriente-cultivo como Zn en maíz y arroz; B en girasol, maíz, soja y alfalfa, Cl- en cereales de invierno, Co y Mo en soja, que en la región pampeana argentina representan el espectro donde la respuesta ha sido más reiterada y consistente, y donde deberían profundizar los estudios a realizar en un futuro cercano. La



Figura 6. Posibles formas químicas bajo las cuales se pueden encontrar micronutrientes catiónicos utilizados como fertilizantes.

manipulación del cultivo causando un estrés, i.e. defoliación, o el análisis dirigido de una porción de la base de datos (año seco) permite señalar, para el norte de Buenos Aires, un incremento consistente de la respuesta bajo condiciones de estrés y, en algunos casos, la identificación de rangos críticos de nutriente en el suelo donde la respuesta es más probable.

Sin embargo, las preguntas fundamentales: ¿Cuándo aplicarlos? ¿Cuál es la forma y la fuente más efectiva? todavía no tienen una respuesta definitiva. Es de esperar que este conocimiento se genere localmente en los próximos años, lo cual permitiría incrementar la adopción de esta tecnología de manera confiable por parte de productores y asesores.

Bibliografía

- Fancelli, AL. 2006. Micronutrientes en la fisiología de las plantas. Pp 11-27. En: M Vázquez(ed). Micronutrientes en la agricultura. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, Argentina.207pp.
- Ferraris, G. 2011.a. Microelementos en cultivos extensivos. ¿Necesidad actual o tecnología para el futuro? pp 121-133. En: Actas del Simposio Fertilidad 2011. "La Nutrición del cultivo integrada al Sistema de Producción".IPNI Cono Sur-Fertilizar Asociación Civil. 269 pp.
- Ferraris, G. 2011 B. Fertilización con micronutrientes en soja. Experiencias en la región Centro - Norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe. En. Actas Mercosoja 2011. Un grano. Un universo (Versión digital). 14 al 16 de Setiembre de 2011.
- Ferraris, G. 2012. Zinc y otros microelementos en Maíz. Jornada de Maíz. INTA EEA Marcos Juárez. 5 de Julio de 2012. 8pp
- Ferraris, G. 2014. Micronutrientes en región pampeana argentina: posicionamiento y tecnología de aplicación".Actas Simposio FANUS. Buenos Aires, Noviembre de 2014. 5 pp
- Ferraris, G. y S. Barberis. 2015. Respuesta a zinc bajo diferentes niveles de estrés en Maíz pisingallo (pop corn). Año 2015. Informe de resultados. 7 pp
- Ferraris, G., Couretot, L. 2009. a. Fertilización foliar complementaria de Soja. Un análisis de dos campañas climáticamente contrastantes. Pp143-148. Soja. Resultados de Experiencias. Campaña 2009. F Moussegne (ed). Proyecto Regional Agrícola. CRBAN-EEA Pergamino-Villegas.
- Ferraris, G., Couretot, L. 2009. b. Respuesta del Maíz a la fertilización complementaria con zinc, boro y otros nutrientes. En: Revista Agromercado. ISSN 1514-2213x. Cuadernillo Fertilidad y Fertilizantes. Vol.28, pp 22-24.
- Ferraris, G., Couretot, L. 2011. Fertilización complementaria en soja: Tratamientos de fertilización foliar como herramienta para mitigar períodos de estrés simulados por defoliación. Informe técnico. UCT Agrícola - Area de Desarrollo Rural INTA Pergamino. 6p. Disponible on line www.inta.gov.ar/pergamino/informacion.
- Ferraris, G., Couretot, L. 2011. Fertilización con boro en soja. Efecto sobre los rendimientos e interacción con el uso de fungicidas. En: Actas Jornadas de Actualización Técnica. Soja. CREA Región Sur de Santa Fe. 9 de Septiembre de 2011
- Fontanetto, H., Keller, O., Negro, C., Belotti L., Giailevra D. 2006. Inoculación y fertilización con Cobalto y Molibdeno sobre la nodulación y la producción de soja. Revista Técnica INTA, E. E. A. Rafaela.
- Galrão, E.Z. 1996. Niveis críticos de zinco e avaliação de sua disponibilidade para o milho num Latossolo Vermelho-Escuro, argiloso, fase cerrado. Revista Brasileira de Ciencia do Solo, Campinas, 20 283-289.
- Huber, D.M., Leuck, J.D., Smith, W.C., Christmas, E.P. 2004. Induced manganese deficiency in GM soybeans. Northcentral Fertilization Extension Conference, Des Moines, IA, November 2004 (2004)
- Malavolta E, Vitti G, de Oliveira S. 1997. Avaliacao do estado nutricional das plantas: Principios e aplicacoes. 2ª. Ed. POTAFOS. Piracicaba, Sao Paulo, Brasil.
- Marschner, H.E. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic Press, London/San Diego/New York/Boston/Sydney/Tokyo, 889 p.
- Pais, I., Benton Jones, J. 2000. The handbook of trace elements. Saint Lucie Press, Boca Raton, 223 p.
- Prochnow, L., Moraes, M.F., Stipp, S. Micronutrientes. Simposio Fertilidad 2009. "Mejores Prácticas de Manejo para una Mayor Eficiencia en la Nutrición de Cultivos". Disponible on-line www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf
- Quintero, C.E., Arévalo, E.S., Boschetti, N.G. Spinelli, N.M. 2006. Clorosis en suelos con calcáreo. En: M Vázquez (Ed.) Micronutrientes en la agricultura. AACCS, Argentina. pp 113-125.
- Rotondaro R. 2016. Zinc. Disponibilidad en suelos pampeanos y su respuesta agronómica. Jornada de intercambio sobre uso de micronutrientes en cultivos pampeanos. Fertilizar Asociación Civil. 22 de Agosto de 2016.
- Scheid López, A. 2006. Micronutrientes: La experiencia brasilera. Filosofía de aplicación y eficiencia agronómica. pp. 29-78. En: M Vázquez (ed). Micronutrientes en la agricultura. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, Argentina. 207pp.
- Torri, S., Urricariet, S., Ferraris, G., Lavado, R.S. 2010. Cap.5. Micronutrientes en agrosistemas pp 395-423. En: Fertilidad de Suelos y Uso de Fertilizantes. Rubio, G., Lavado, R. (eds.). Editorial Facultad de Agronomía, UBA. ●

Los Cultivos de Cobertura como Alternativa en el Sistema de Producción Agrícola

Franco Permingeat*, Vanesa Loza, Adrián Rovea* y Ricardo Pozzi
Región CREA Sur de Santa Fe

*Contacto: francopermingeat@hotmail.com, acrovea@gmail.com

La falta de rotación con gramíneas en el sistema productivo agrícola argentino es una realidad. Los motivos son diversos, pero es la realidad y debemos hacer algo al respecto. Debemos cambiar las justificaciones por acciones concretas. Estamos convencidos que con la tecnología que contamos hoy podemos producir de manera sostenible, cuidar nuestros recursos naturales, cuidar el medioambiente y generar renta. No esperemos resultados diferentes si hacemos siempre lo mismo (Albert Einstein).

La elevada proporción de soja en el modelo productivo actual nos ha generado múltiples problemas: degradación física y química de nuestros suelos, problemas de malezas resistentes, erosión hídrica y eólica, etc. Todos somos conscientes de los resultados de la monocultura de soja.

Otro de los problemas que vemos es que la pérdida de rendimiento del cultivo de soja, por los motivos antes mencionados, ha generado, a nivel empresario, falta de capital de trabajo y pérdida de rentabilidad. Vemos en muchos casos una constante cíclica, como no gano dinero no invierto, como no invierto no aumento los rendimientos, y así se justifica la situación en la que se encuentran.

Ante este escenario, hay que armar distintas estrategias de producción para comenzar a revertir este proceso negativo. Una alternativa son los cultivos de cobertura y principalmente los cultivos de gramíneas de invierno.

Los cultivos de cobertura no son nuevos dentro de las alternativas de rotación, el saber manejarlos es clave para no fracasar en el

intento. A nuestro entender vemos que las dos claves para lograr buenos resultados son el consumo de agua y la inmovilización de nutrientes.

En el CREA Ascensión, generamos dos líneas de trabajo para revertir la falta de rotación, los cultivos de cobertura de gramíneas invernales y los maíces tardíos. Ambas técnicas nos han dado resultados muy satisfactorios en cuanto a resultados físicos (aumento de rendimientos) y económicos.

Estamos convencidos que para que una técnica progrese debe ser simple y escalable. Ambas alternativas cumplen con estas dos premisas.

Las primeras líneas de trabajo en cultivos de cobertura fueron evaluar especies invernales y el paquete tecnológico a aplicar. Primeramente, utilizamos avena o trigo como especies de invierno y la fertilización era la que utilizábamos en el cultivo de soja de primera (**Imagen 1, Tabla 1**).



Imagen 1. Desarrollo del cultivo en diferentes momentos hasta el quemado.

Tabla 1. Resultado del primer año de evaluación de cultivo de cobertura utilizando el nivel de fertilización de la soja de 1°. El cultivo se sembró con 100 kg de superfosfato simple.

Antecesor	Casos	ha	Rendimiento (qq/ha)	Diferencia
Soja 1ra	2	84	32,9	3,98
18	1	34	31,2	
19	1	50	34,5	
CC Avena	3	65	36,8	
15	1	23	37	
16	1	27	38	
17	1	15	35,5	
Total General	5	149	35,2	

El segundo año de evaluación de cultivo de cobertura se diseñaron los tratamientos con distintas dosis de nitrógeno (aplicado como urea) para evaluar la producción de materia seca del cultivo de cobertura y el impacto en el rendimiento de la soja.

El diseño fue consecuencia del resultado de la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe (CREA-IPNI-ASP). Con la Red descubrimos el impacto del reciclaje de nutrientes desde las gramíneas hacia las leguminosas. El objetivo era ver si con los cultivos de cobertura fertilizados con N-P-S se generaban resultados similares (**Imagen 2, Figuras 1 y 2**).

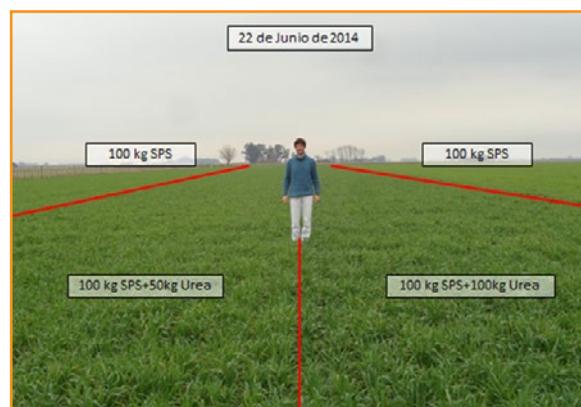


Imagen 2. De izquierda a derecha se ven los distintos tratamientos de dosis de urea incorporada a la siembra del cultivo de cobertura (avena).

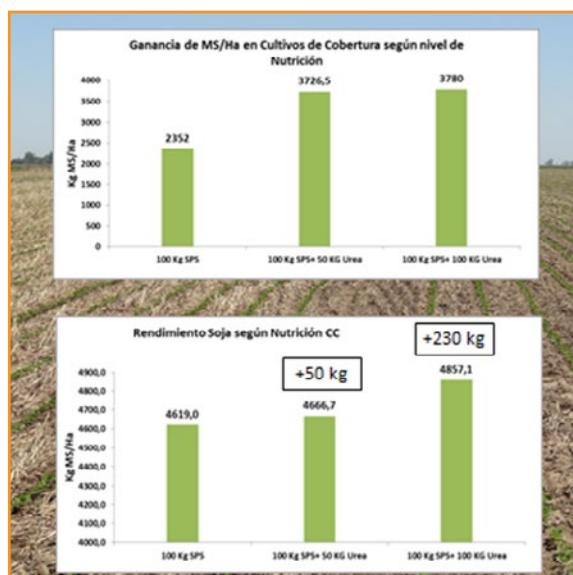


Figura 1. Campaña 14/15, Resultado del impacto de fertilizar con nitrógeno el cultivo de cobertura y la respuesta en soja 1°. Respuesta en kg de materia seca (gráfico superior) en avena y kg de soja (gráfico inferior).

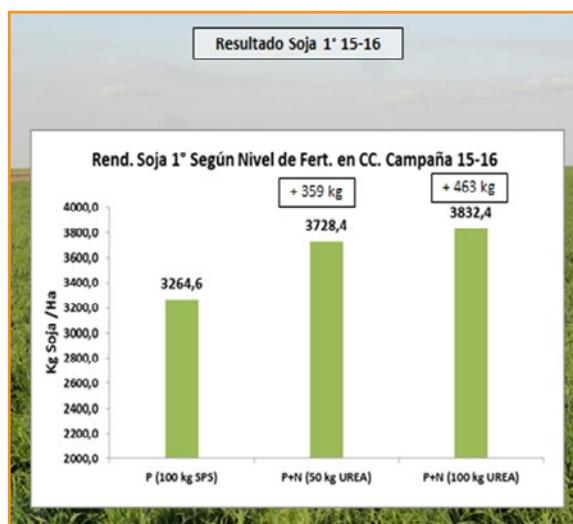


Figura 2. Campaña 15/16, Resultado del impacto de fertilizar con nitrógeno el cultivo de cobertura y la respuesta en soja 1°.

Resultados cultivos de cobertura y maíz tardío

Otras de las líneas de trabajo del CREA Ascensión es el desarrollo de tecnologías aplicadas en maíz tardío. El objetivo del trabajo es determinar diferentes paquetes tecnológicos aplicados para potenciar el rendimiento del maíz tardío y hasta donde restringirlo obteniendo pisos de rendimientos superiores a los 10 000 kg/ha.

Uno de los problemas que tiene la siembra de maíz tardío es el tiempo de barbecho desde que cosechamos la soja hasta que lo sembramos, el cuál varía entre 6 y 7 meses. Durante este período nos encontramos con problemas para manejar malezas, erosión hídrica en primavera con abundante precipitaciones y pérdida de nitratos por lixiviación. Por los motivos antes mencionados decidimos incorporar los cultivos de cobertura como antecesor del maíz tardío.

Los cultivos de cobertura se sembraron con diferentes dosis de nitrógeno para evaluar producción de materia seca y ver si tenía impacto en el rendimiento del maíz tardío. Este diseño es consecuencia del resultado de la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe (CREA-IPNI-ASP). Queríamos ver el resultado del reciclaje de nutrientes del cultivo de cobertura hacia el maíz tardío (**Imagen 3 y 4, Figura 3, Tabla 2**).

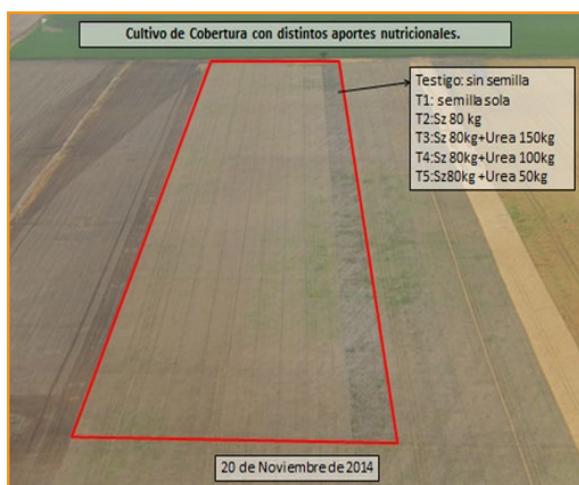


Imagen 3. Campaña 14/15, Diseño de los diferentes tratamientos en el cultivo de cobertura.

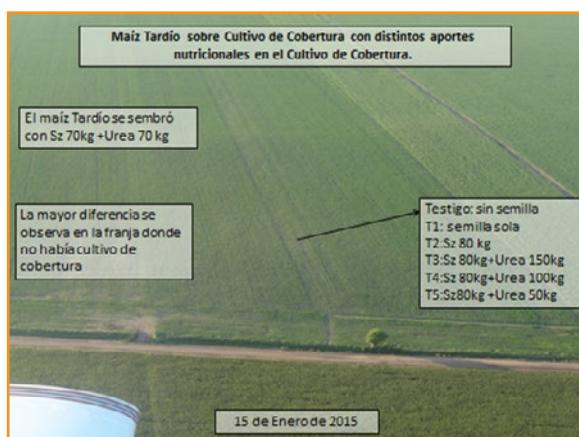


Imagen 4. Campaña 14/15, Foto aérea de maíz tardío. Se nota la franja donde no había cultivo de cobertura.

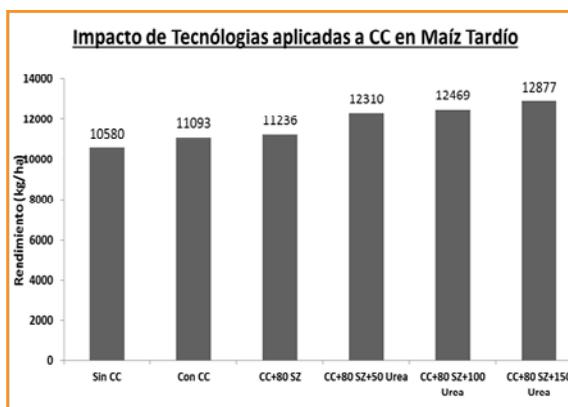


Figura 3. Rendimiento de maíz tardío en las diferentes franjas de nutrición del cultivo de cobertura. El maíz se sembró con el mismo paquete tecnológico (Sz70kg+Urea70kg).

Tabla 2. Respuesta a los diferentes tratamientos. Con y sin cultivo de cobertura, agregado de P+S y P+S con diferentes dosis de nitrógeno en el cultivo de cobertura.

Orden	Tratamiento	Rendimiento	Res-puesta	
		kg/ha		
1	Sin CC	10 580		
2	Con CC	11 093	513	CC
3	CC + 80 SZn	11 236	142	P+S
6	CC + 80 SZn + 50 Urea	12 310	1075	N
5	CC + 80 SZn + 100 Urea	12 469	1234	N
4	CC + 80 SZn + 150 Urea	12 877	1641	N

Si sumamos las respuestas al agregado de 50 Kg de urea en el cultivo de cobertura, el incremento con respecto a la franja testigo (sin cultivo de cobertura) es de 1730 kg/ha.

Dados estos resultados de la campaña 14/15 en la campaña 16/17 se realizó nuevamente el ensayo de distintas dosis de N en el cultivo de cobertura y el maíz se sembró con diferentes dosis de nitrógeno de manera transversal para determinar cuál es la mejor combinación de tecnologías en el cultivo de cobertura y en el maíz tardío (**Imagen 5**).



Imagen 5. Foto aérea de las diferentes franjas de tratamiento y diseño de las franjas de tratamiento en maíz tardío.

En base a la experiencia de los últimos años con el uso de cultivos de cobertura, hemos detectado que hay dos variables muy importantes que son determinantes en el rendimiento del cultivo sucesor: una es el consumo de agua y la otra la inmovilización de nutrientes del cultivo de cobertura. Ambos factores están determinados por el momento de quemado del cultivo de cobertura. Si nos demoramos en terminar el cultivo de cobertura, consumimos más agua e inmovilizamos nutrientes. La experiencia nos marca que el mejor momento es dos nudos (Z32). De esta manera, el consumo de agua comparado con el testigo varía entre 50 y 70 mm, estos son valores observados en las diferentes campañas.

Con respecto a la inmovilización, la bibliografía nos indica que a partir de dos nudos comienza la lignificación de la planta. En la medida que

terminamos más tarde el cultivo, más nutrientes inmovilizamos y mayor consumo de agua tenemos (Tablas 3 y 4, Figura 4).

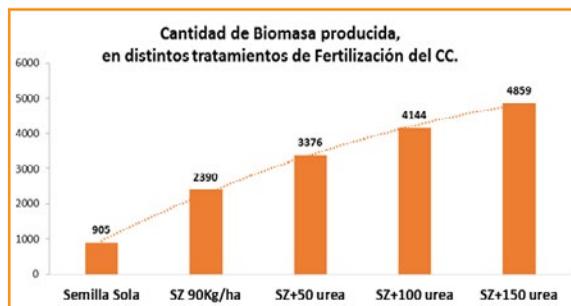


Figura 4. Biomasa del cultivo de cobertura según nivel de fertilización.

La cosecha del maíz tardío se va a realizar en los meses de junio o julio de 2017, hasta ese momento no vamos a tener los resultados de cada uno de los tratamientos y cuál es el mejor paquete tecnológico para cada una de las combinaciones. Sin embargo, aunque falte tiempo para la cosecha, ya se ven resultados visuales promisorios con respecto al estado nutricional del cultivo de maíz en cada tratamiento. Se observa un marcado déficit de nitrógeno en las parcelas con antecesor cultivo de cobertura.

Vemos que el estado nutricional del maíz sin fertilización está en mejor estado sobre la situación barbecho (Imagen 6) que sobre cultivo de cobertura (Imagen 7). Esto es así por el efecto de inmovilización de nutrientes (principalmente nitrógeno) dado por el cultivo de cobertura. Al agregar 150 kg de urea al maíz (Imagen 8), el estado nutricional del mismo mejora considerablemente.

Tabla 3. Consumo de agua para cada tratamiento y su diferencia con el testigo. (Barbecho).

Profundidad (cm)	Tratamientos					
	Barbecho	Semilla sola	CC + P	CC + P + N50	CC + P + N100	CC + P + N150
0-20	44	34	51	46	44	49
20-40	54	47	38	35	29	22
40-60	43	37	21	16	19	13
60-100	48	36	32	26	21	20
100-150	57	24	42	43	31	35
150-200	56	37	52	47	39	42
Lámina (mm)	302	215	236	213	183	181
Cap almacenaje (mm)	271	271	271	271	271	271
Hum. Rel. Actual (%)	11	79	87	79	68	67
Dif. (mm)	-	-56	-35	-58	-88	-90

Tabla 4. Kg de N en la biomasa del cultivo de cobertura.

Tratamientos	P	N	S	Zn	Biomasa verde	MS	MS	Reciclaje N
	(%)			ppm	kg/ha	%	kg/ha	
Semilla sola	0,2	2,1	0,24	25,5	4150	21,8	905	19
SZ 90	0,2	1,7	0,23	21,1	10 043	23,8	2390	41
SZ 90 + 50 urea	0,2	1,5	0,21	25,4	14 940	22,6	3376	51
SZ 90 + 100 urea	0,2	1,8	0,18	26,5	15 521	26,7	4144	75
SZ 90 + 150 urea	0,2	1,9	0,16	33,1	19 671	24,7	4859	92



Imagen 6. Maíz tardío sin cultivo de cobertura y sin fertilización de N-P-S.



Imagen 8. Maíz tardío con fertilización de N (150 kg urea)-P-S sobre cultivo de cobertura con P+S y sin N.



Imagen 7. Maíz tardío sin fertilización de N-P-S sobre cultivo de cobertura con P+S y sin N.



Imagen 9. Maíz tardío sin fertilización sobre cultivo de cobertura con N (150 kg urea)-P+S.

Siguiendo con la misma línea, mostramos 2 combinaciones donde el cultivo de cobertura está fertilizado (150 kg urea) y el maíz está sin nitrógeno (Imagen 9) y con 150 kg de urea (Imagen 10).

Lo que se ve claramente es el efecto inmovilización generado por el cultivo de cobertura. Es muy importante el manejo del nitrógeno en estos sistemas para no tener pérdidas de rendimiento.

Dentro de las funciones que nos permiten incrementar la productividad, utilizando los cultivos de cobertura, se encuentra el mejoramiento de la infiltración y la supresión de malezas problemáticas.



Imagen 10. Maíz tardío con fertilización (150 kg urea) sobre cultivo de cobertura con N (150 kg urea)-P+S.

Mejoramiento de la infiltración

Utilizando el método del infiltrómetro de disco se evaluó la capacidad de infiltración en tres tratamientos distintos: Testigo (sin cultivo de

cobertura), Cultivo de Cobertura fertilizado con P+S sin N y cultivo de cobertura fertilizado con N (150 kg urea)+P+S.

Lo que se observa con estas mediciones es el efecto positivo que tienen las gramíneas invernales sobre la infiltración (**Figura 5**). Este efecto es mayor cuando nutrimos mejor al cultivo de cobertura. La infiltración mejoró considerablemente de 16 mm/hora a 42 mm/hora solo con el agregado de cultivo de cobertura y a 58 mm/hora cuando nutrimos con 150 kg urea al mismo (**Figura 6**).

El incremento se generó en 70 días de duración del cultivo de cobertura. Este efecto tiene una correlación directa con la biomasa radicular generada por el cultivo. A mayor biomasa aérea, mayor biomasa radicular.

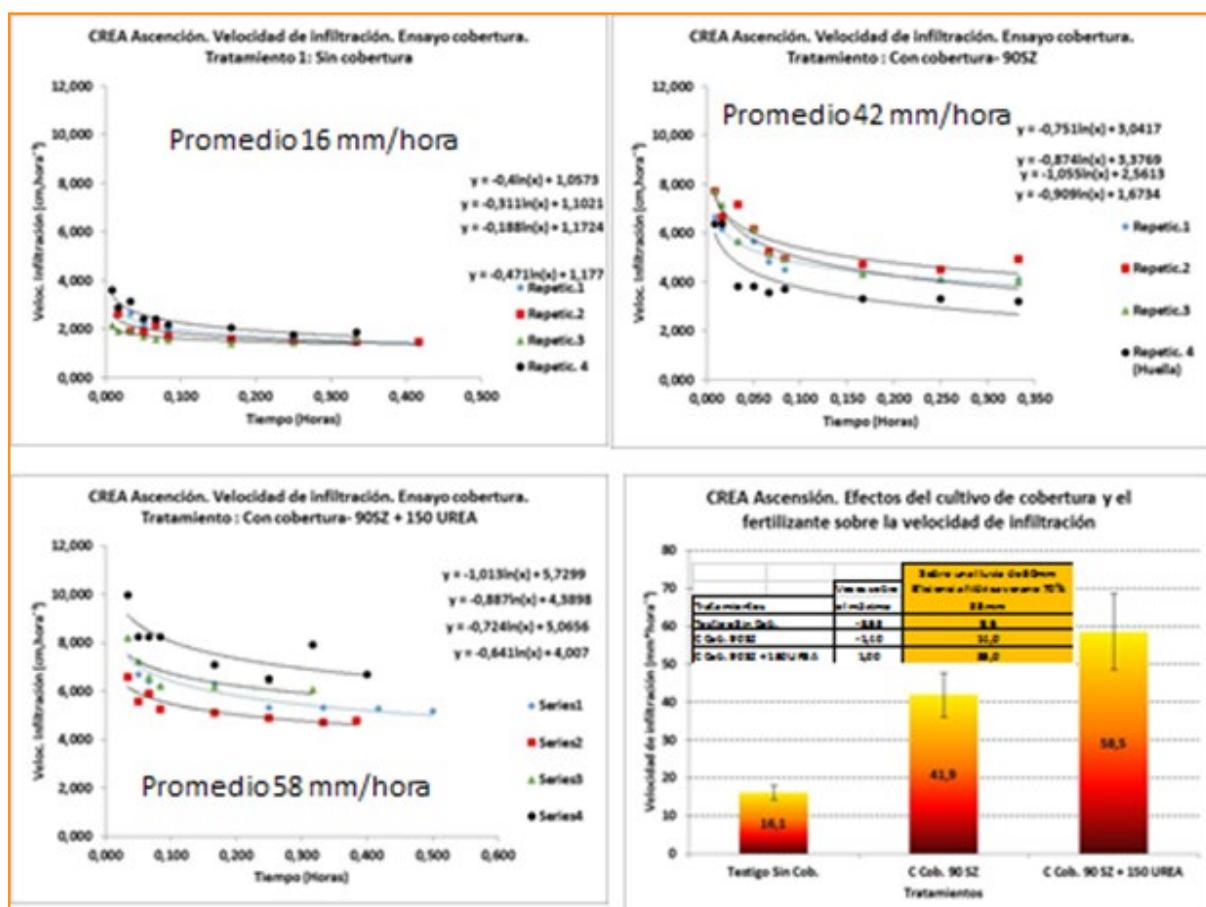


Figura 5. Velocidad de infiltración en los tratamientos Testigo (sin cultivo de cobertura), Cultivo de Cobertura fertilizado con P+S sin N y cultivo de cobertura fertilizado con N (150 kg urea)+P+S. Trabajo realizado por el Ing. Agr. Ricardo Pozzi.

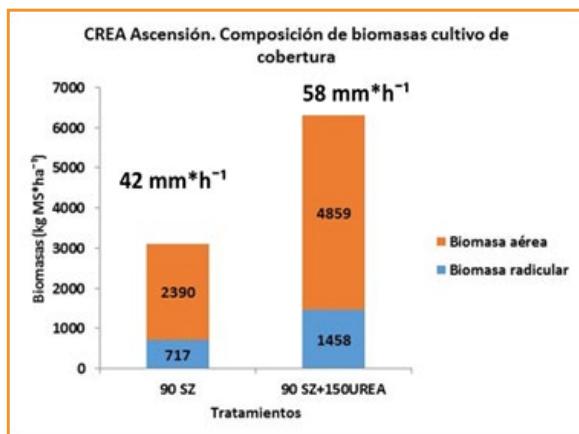


Figura 6. Biomasa del cultivo de cobertura e infiltración en tratamientos Cultivo de Cobertura fertilizado con P+S sin N y cultivo de cobertura fertilizado con N (150 kg urea)+P+S. Trabajo realizado por el Ing. Agr. Ricardo Pozzi.

Se realizaron perfiles culturales en los que se observa que, de un estado compactado del 67% sin cultivo de cobertura, se pasa a un estado de 0% compactado con cultivo de cobertura (Figura 7). Estos resultados son contundentes a la hora de enumerar los beneficios de la utilización de gramíneas invernales.

Supresión de malezas problema

La problemática de malezas se agrava año a año debido a la constante aparición de resistencia a diferentes familias químicas. Esto hace cada vez más complejo el sistema de producción e incrementa los costos, haciendo más inestable el negocio, y genera una gran dependencia de tecnología de insumos.

Por tal motivo se realizó un ensayo de herbicidas pre-emergentes en maíz tardío para evaluar el comportamiento de las distintas combinaciones y analizar el impacto del cultivo de cobertura en la dinámica de malezas problemáticas.

De la misma manera que se evaluó la dinámica de malezas invernales, también se evaluó la dinámica de malezas estivales. Los resultados son contundentes, el cultivo de cobertura tuvo un efecto depresor sobre el nacimiento de malezas invernales y estivales. En las **Imágenes 11 a 13** y la **Figura 8** vemos el comportamiento de Eleusine con y sin cultivo de cobertura.

Los cultivos de cobertura son una tecnología de procesos que me permite trabajar con beneficios funcionales en el sistema, integrando mejoras en la dinámica de agua en cuanto a consumo e infiltración, suprimiendo el nacimiento de malezas invernales y estivales, sumando rendimientos en los cultivos sucesores. Analizando las ventajas de esta tecnología vemos que es posible producir cuidando los recursos naturales y el medio ambiente. ●

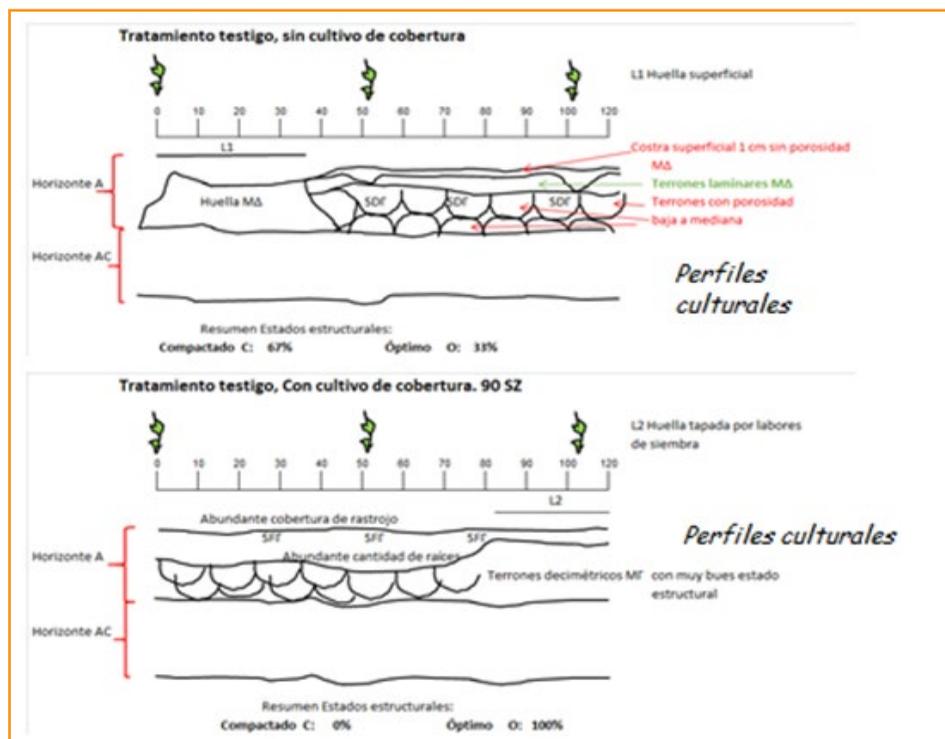


Figura 7. Perfiles culturales los tratamientos testigos y cultivo de cobertura sin N. Trabajo realizado por el Ing. Agr. Ricardo Pozzi.

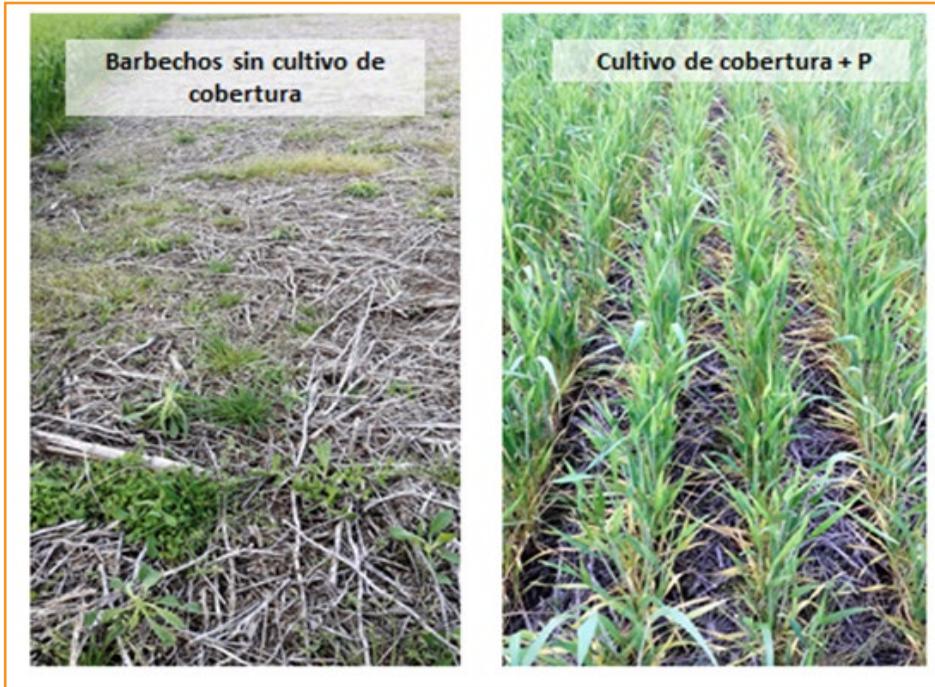


Imagen 11. Impacto del cultivo de cobertura de trigo en la dinámica de malezas invernales.

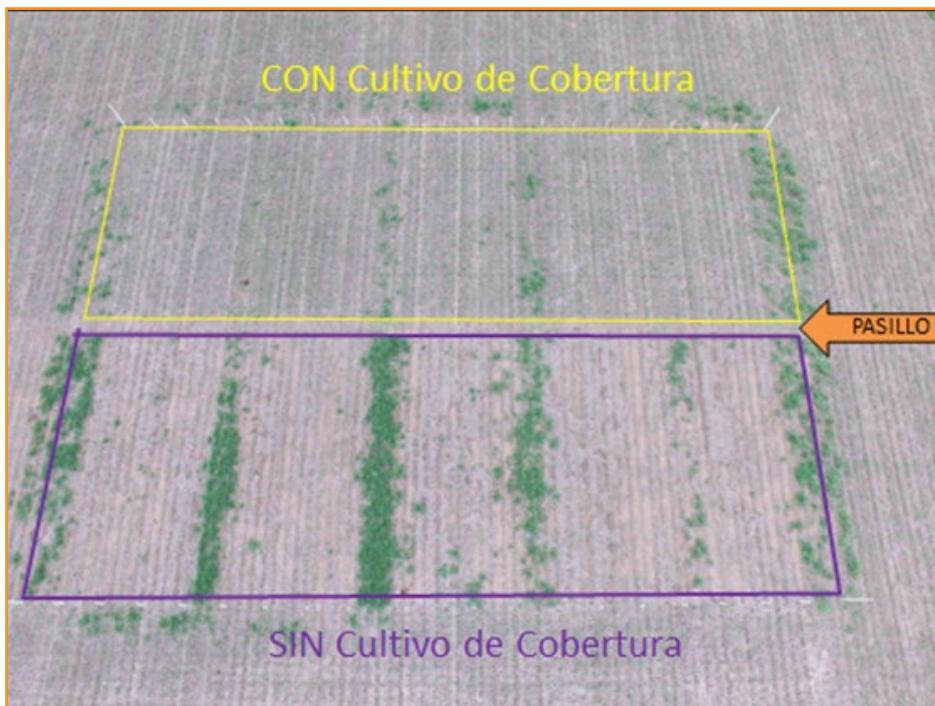


Imagen 12. Foto aérea de la dinámica de Eleusine en las franjas testigo (sin herbicidas pre-emergentes) con y sin cultivo de cobertura.

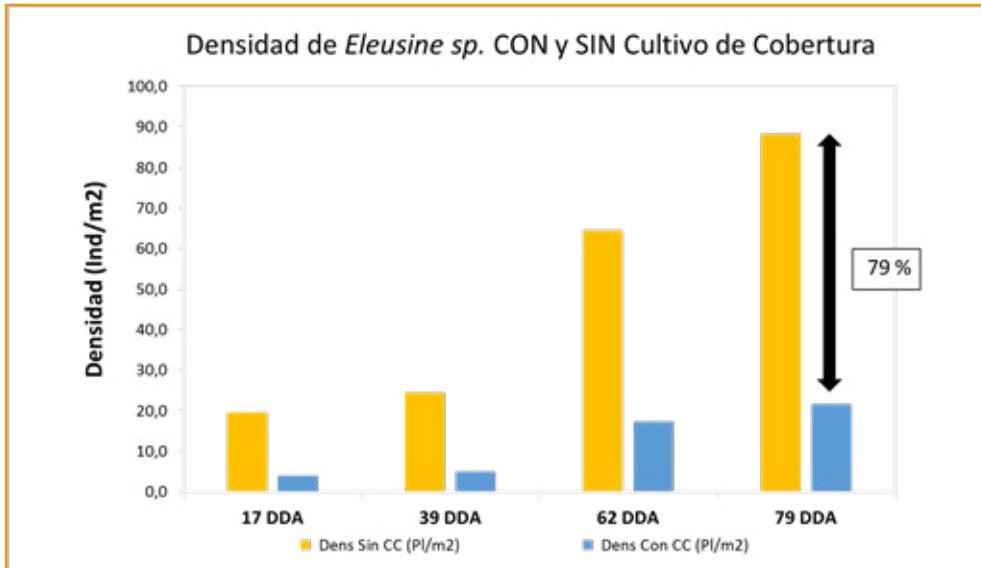


Figura 8. Medición de densidad de *Eleusine* con y sin cultivo de cobertura. Se nota el efecto depresor del cultivo de cobertura.

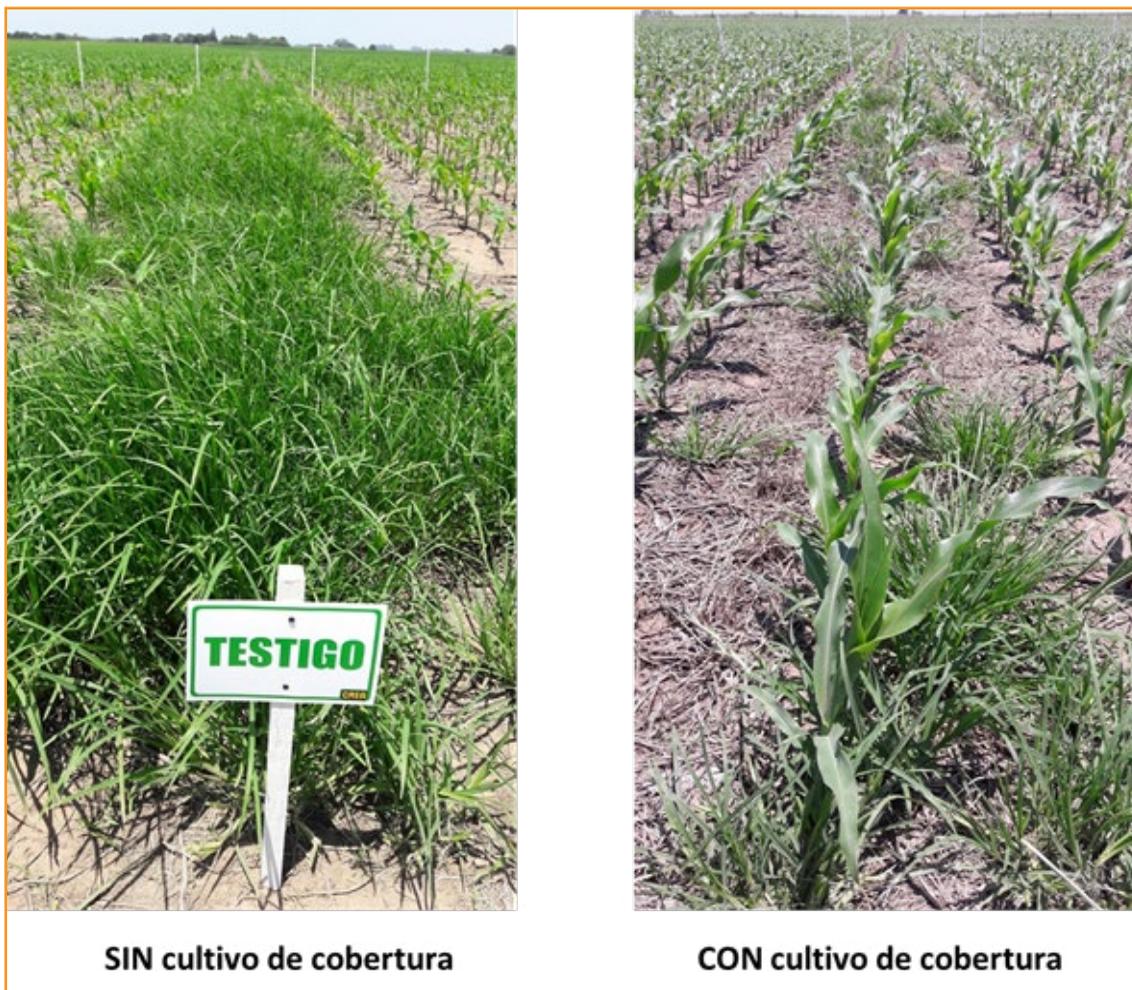


Imagen 13. Imagen de la dinámica de *Eleusine spp.* con y sin cultivo de cobertura.

Suelos Compactados: ¿Ahora qué hago?

Guillermo Gerster^{1,*} y Silvina Bacigaluppo²

¹AER INTA Roldán, y ²EEA INTA Oliveros

*Contacto: gerster.guillermo@inta.gob.ar

En las últimas campañas, la ocurrencia de condiciones climáticas excesivamente húmedas asociadas, en muchos casos, a la presencia de napas cercanas a la superficie, generó innumerables situaciones donde la cosecha de soja y maíz se realizó en condiciones de baja transitabilidad y capacidad portante, provocando problemas de compactación superficial y subsuperficial en gran cantidad de lotes de la región.

Resulta necesario definir estrategias para la recuperación de la capacidad productiva de los lotes afectados, para lo cual analizaremos aspectos relacionados al tránsito de maquinarias y sus efectos sobre el suelo y los cultivos.

Efectos del tránsito de maquinarias sobre el suelo y los cultivos

Si bien el uso extensivo de la siembra directa (SD) en la región pampeana permitió reducir los procesos erosivos, la degradación física provocada por el tránsito en húmedo asociada al monocultivo de soja se convirtió en el factor de mayor riesgo en estos sistemas. La degradación física se manifiesta como una pérdida de la porosidad de los suelos y está asociada a la textura, contenido de materia orgánica y al peso y presión de la maquinaria utilizada (Jorajuría, 2005). Por otra parte, con el avance tecnológico de la agroindustria metalmeccánica, se incorporaron al mercado equipos de mayor capacidad de trabajo con un incremento de su peso. Esto sumado a un mayor número de pasadas asociados a tratamientos de fertilización y protección del cultivo contra malezas, plagas y enfermedades, generalizó el problema.

La superficie transitada por los rodados de los equipos agrícolas, en soja de primera, supera el 60% del área total en cada campaña, considerando la maquinaria usual en el sur de la provincia de Santa Fe (G. Gerster, datos inéditos). La siembra y aplicación de fitosanitarios para el control de malezas, requieren que el suelo posea niveles de humedad elevados, coincidiendo en muchos casos con el intervalo de máxima susceptibilidad a la compactación. A su vez, el desplazamiento de

cultivares de soja de ciclo largo (grupos de maduración VI y VII) por cultivares de ciclos más cortos (grupos III y IV) produjo un adelanto de la cosecha concentrándose en el mes de marzo, coincidiendo con un periodo de abundantes lluvias.

Cuando un rodado se desplaza sobre un suelo desnudo produce efectos diferentes a los generados en uno cubierto. La presencia de una abundante cobertura de rastrojos amortigua parcialmente el efecto del tránsito, dado que el esfuerzo mecánico se realiza sobre un intermediario, que disminuye sus efectos negativos sobre el suelo. En lotes destinados a monocultivo de soja en cambio, la escasa cobertura agrava el problema. La ausencia de gramíneas en la rotación, sumada a la escasa actividad biológica de estos sistemas contribuyen a que los sectores compactos generados por el tránsito perduren varios años.

Gerster y Bacigaluppo (2004), trabajando en argiudoles típicos sobre huellas generadas por el paso de tolvas autodescargables, observaron que los sectores transitados presentaban un incremento en la densidad aparente, reducción de la infiltración básica, menor exploración de raíces y una disminución en los rendimientos de soja y maíz de un 28% y de 15%, respectivamente, respecto a zonas sin tránsito. También observaron una merma en la presencia de nódulos en las raíces del cultivo de soja, tanto en su peso como en su cantidad.

Algunas alternativas para reducir o limitar los efectos negativos del tránsito, consisten en utilizar maquinarias de menor peso por eje y/o adecuar los rodados para reducir su presión específica sobre el suelo. Respecto al primer aspecto, es preocupante la tendencia de los últimos años a la utilización de cosechadoras y tolvas con mayor capacidad de trabajo y mayor peso, por lo cual, el uso de neumáticos de mayor superficie de apoyo aparece como la alternativa para reducir o limitar los efectos negativos del tránsito de maquinarias. La ventaja de este tipo de rodados consiste en que permiten reducir la presión específica sobre el suelo ya que distribuyen la carga en una mayor superficie de contacto.

Con el objeto de evaluar el uso de rodados

alternativos en tolvas auto-descargables, Gerster y Bacigaluppo (2012) realizaron un experimento sobre un suelo argiudol típico serie Armstrong, con más de veinte años de agricultura y ocho años en siembra directa continua, comparando el tránsito con rodados convencionales y radiales. Algunos resultados observados luego del paso de ambos rodados, mostraron que el rodado convencional presentó valores más elevados de resistencia mecánica a la penetración en estratos superiores del perfil del suelo (10 - 20 cm), mientras que con el rodado radial los valores más elevados se encontraron a mayor profundidad (20 - 30 cm). Estas observaciones coinciden con las realizadas por Voorhess et al. (1986) y Jorajuría (2005), quienes determinaron que superficialmente el efecto negativo del tránsito está asociado a la presión ejercida por el neumático, mientras que a nivel sub-superficial depende más del peso total del equipo utilizado.

También se observó que la presencia de densificaciones superficiales por tránsito con rodado convencional limitó el crecimiento de raíces en todo el perfil. Con rodado radial, en cambio, hubo un mejor enraizamiento en profundidad incluso en estratos con valores más elevados de resistencia mecánica a la penetración. Sin dejar de tener en cuenta que el área sin tránsito, siempre presentó mayor abundancia de raíces en todo el perfil.

Si bien los neumáticos radiales favorecieron el desarrollo radical de los cultivos (en relación a los convencionales), su efecto para atenuar la degradación física del suelo es limitado, ya que generan densificaciones a mayor profundidad que los neumáticos convencionales. Su uso continuo podría generar compactación más profunda y difícil de revertir, aspecto que requiere la realización de estudios complementarios.

Efectos de la rotación de cultivos sobre el suelo

La siembra anual de un solo cultivo de verano y el uso de barbechos químicos que mantienen el área libre de malezas el resto del tiempo, genera una sub-utilización de los recursos disponibles (agua, radiación, nutrientes), ya que durante el barbecho no es aprovechada la energía solar para generar moléculas orgánicas. La inclusión de un cultivo invernal permite utilizar en forma más eficiente estos recursos, que además de producir granos, genera con los residuos un efecto de cobertura y contribuye a mejorar el balance de la materia orgánica del suelo. Las gramíneas de

invierno, como el trigo, normalmente encuentran durante su implantación el suelo húmedo por periodos prolongados, teniendo, por lo tanto, mayores posibilidades de crecer en los sectores compactados. Este hecho está asociado a las características de las lluvias otoñales que al ser de baja intensidad y de larga duración permite humedecer todo el perfil, incluso los sectores compactos. Este aspecto tiene ventajas sobre el cultivo de maíz que no siempre se desarrolla con buenas condiciones de humedad en el perfil, si bien presenta la capacidad de generar poros de mayor diámetro, que son los que contribuyen a lograr una mayor velocidad de infiltración de agua.

Estas características explican por qué los suelos bajo SD, con una adecuada rotación de gramíneas, mediante el efecto de las raíces y de la actividad biológica, asociado a procesos de humectación y desecamiento, tienen la capacidad de recuperar la estructura. Este proceso, que depende de las características de cada lote (cobertura, materia orgánica, etc.), puede demorar varios años.

Los suelos de nuestra región adecuadamente manejados bajo SD, son capaces de recuperar la estructura y porosidad afectada por el tránsito. La intensificación con gramíneas con una adecuada fertilización, constituye un sistema que permite mantener altos niveles de cobertura y porosidad mejorando el balance de materia orgánica y nutrientes.

Resulta necesario reducir el impacto de la compactación mediante una estrategia que combine el tránsito controlado y el uso de rodados de mayor superficie de apoyo y menor presión específica. Para la remediación de lotes ya afectados por el tránsito, es recomendable la siembra de gramíneas, tanto de invierno como de verano, a los efectos de que sus raíces permitan recuperar la estructura de los suelos.

Bibliografía

- Gerster, G., y S. Bacigaluppo. 2004. Consecuencias de la densificación por tránsito en Argiudoles del sur de Santa Fe. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo - Paraná.
- Gerster, G., y S. Bacigaluppo. 2012. Manejo del suelo. Capítulo 9. El cultivo de soja en Argentina. Ed. Agroeditorial, 175-188.
- Jorajuría, D. 2005. Compactación del suelo agrícola inducida por tráfico vehicular. Reología del suelo agrícola bajo tráfico. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata: 39-56
- Vorhess, W., W. Nelson, y G. Randall. 1986. Extend and persistence of subsoil compaction with heavy axle loads. Soil Science Society of America Journal, Madison. 50: 428-433

Microrganismos PGPM (Plant Growth Promoting Microorganisms) Solubilizadores de Fósforo: Importancia Agronómica e Impacto Productivo

Gustavo González Anta*

Investigación, Desarrollo y Servicio Técnico, Rizobacter Argentina S.A.

Pergamino, Buenos Aires

*Contacto: gganta@rizobacter.com.ar

El fósforo (P), sin lugar a dudas, es uno de los nutrientes más importantes y necesarios para la correcta nutrición vegetal. Su requerimiento como P elemento cada 1000 kilogramos de grano varía con el cultivo; siendo en el caso del trigo de 5 kg /tonelada de grano y en el caso del maíz de 4 kg/tonelada de grano. Estas necesidades nutricionales claramente indican la importancia del suministro del nutriente P, y lo esencial de asegurar su biodisponibilidad.

Por otra parte, es clave recordar la importancia del P por su participación en diferentes y fundamentales procesos biológicos para las plantas como la división y el crecimiento celular y el desarrollo radicular; su intervención en procesos vitales como la fotosíntesis, la glucólisis, la respiración y la síntesis de ácidos grasos; su participación como componente relevante de ácidos nucleicos, fosfolípidos, coenzimas NAD y NADP y como componente esencial del ATP y su contribución a la absorción y al aumento de la disponibilidad de otros nutrientes macro, meso y micro que ayudan a maximizar los rendimientos de los cultivos. Esto define al P como un elemento esencial para la vida vegetal.

Sumado a los requerimientos puntuales del nutriente por parte de los cultivos, se debe considerar su escasa movilidad y disponibilidad para las plantas. Consecuentemente, la búsqueda de microorganismos rizoféricos que incrementen la solubilización del P del suelo y de los fertilizantes y que mejoren el desarrollo radicular y permitan una mayor absorción de nutrientes en general y del P en particular.

Entre los microorganismos solubilizadores del P del suelo, podemos mencionar varios grupos; entre ellos los hongos (*Penicillium*, *Sclerotium* y *Fusarium*) todos ellos con una gran capacidad solubilizadora, pero paralelamente varios de ellos son reconocidos también, por su potencialidad patogénica. Otro grupo de microorganismos solubilizadores es el de los Actinomicetes (*Strepto-*

tomices, *Nocardia* y *Micromonospora*) que están clasificadas entre las bacterias Gram Positivas y son reconocidas por su capacidad de producción de antibióticos y otros metabolitos que actúan como potenciales controladores de distintos patógenos de semillas y de suelo.

Por otro lado, un capítulo aparte lo constituyen los HMA (Hongos Micorríticos Arbusculares: *Rhizophagus*, *Acaulospora*, *Gigaspora*) que generan una simbiosis con la casi totalidad de las especies vegetales y que le permiten, además de nutrirse con P a las plantas, explorar, gracias a la generación de hifas un volumen de suelo muy superior al de las raíces que no están micorrizadas produciendo, a través de este desarrollo exploratorio edáfico adicional, mayor captación y aprovechamiento de agua y otros nutrientes.

Finalmente se encuentran numerosos grupos bacterianos Gram Negativos (*Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Burkholderia*, *Acidovorax*, etc.) y, en particular, el género *Pseudomonas* sp. el cual es el que ha manifestado mayor capacidad solubilizadora del mineral y mayor producción de fitohormonas del tipo auxínico que inducen a un mayor y más extendido desarrollo radicular.

Específicamente, entre las bacterias del género *Pseudomonas*, las especies de *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa* y particularmente *Pseudomonas fluorescens* han demostrado tener excelentes capacidades de solubilización de P, tanto a nivel de medios de cultivo sólidos, como de soluciones con el nutriente y en diferentes tipos de ambientes edáficos.

En el caso de las cepas de *Pseudomonas fluorescens* se pueden destacar fundamentalmente dos características que son particularmente importantes para eficientizar la captura y absorción del P como nutriente:

I. Alta Capacidad de Solubilización del P del suelo:

Dicha capacidad solubilizadora es lograda en el caso de los fosfatos orgánicos a través de la

generación de alta cantidad y alta especificidad de enzimas del tipo fosfatasa que hidrolizan los enlaces orgánicos fosfatados liberando aniones fosfato a la solución del suelo de donde los microorganismos y las raíces de las plantas se nutren. Por otra parte, en el caso de las fracciones del P inorgánico del suelo y de los fertilizantes la solubilización se logra a través de la producción de ácidos orgánicos como el ácido glucónico que libera fosfatos y cationes de Ca^{++} , Fe^{++} y Al^{++} a la solución del suelo según sea la composición química de los suelos.

II. Alta Producción de Factores de Crecimiento Vegetal:

La alta producción de hormonas de que son capaces los microorganismos permiten obtener un mayor desarrollo radicular a través del accionar conjunto y secuencial de las auxinas que fundamentalmente inducen a la iniciación de las raíces y de los pelos absorbentes, y de las giberelinas que actúan promoviendo el alargamiento de las células que componen la raíz y finalmente las citoquininas que activan la división celular y retardan la senescencia radicular.

Estos dos efectos y características de los microorganismos en general y de las bacterias *Pseudomonas fluorescens* en particular, actúan a nivel radicular manifestándose mucho más fuertemente cuando mayor colonización microbiana se logra. De esta manera, la instalación y multiplicación de los microorganismos a nivel radicular permite aumentar los porcentajes de solubilización y al mismo tiempo de exploración radicular por el efecto hormonal mientras que también reducen la potencial instalación de

patógenos sobre la superficie radicular.

Estas dos características de alto impacto agronómico deben ser acompañadas con el ajuste de tecnologías que permiten asegurar el adecuado tratamiento de las semillas y la maximización de los beneficios de la inoculación. En este sentido, el aseguramiento de la viabilidad microbiana sobre las semillas es clave, de ahí la necesidad de acompañar a los formulados microbianos con protectores bacterianos ajustados a la especie microbiana que proporcionen mayor adherencia, mejor humectación y una provisión adecuada de nutrientes. Al mismo tiempo, los desarrollos de las formulaciones deben incluir las evaluaciones de compatibilidad con diferentes curasemillas de origen químico para preservar la supervivencia microbiana.

Sin lugar a dudas, las características y propiedades microbianas evaluadas y manifestadas a nivel de laboratorio y ensayos controlados de cámara de crecimiento nos indican una serie de efectos e impactos positivos de los microorganismos PGPM solubilizadores de P, tanto en la biodisponibilidad del nutriente como en la producción de biomasa radicular y aérea adicional. No obstante, el rendimiento en grano en trigo y maíz con el uso de la tecnología de inoculación bacteriana permitió obtener los resultados mostrados en las **Figuras 1 a 6**.

Definitivamente, mayor solubilización de P acompañada de mayor desarrollo radicular a través de la utilización de herramientas microbiológicas permite incrementar los rendimientos de trigo y maíz de manera medio ambientalmente amigable y económicamente rentable. ●

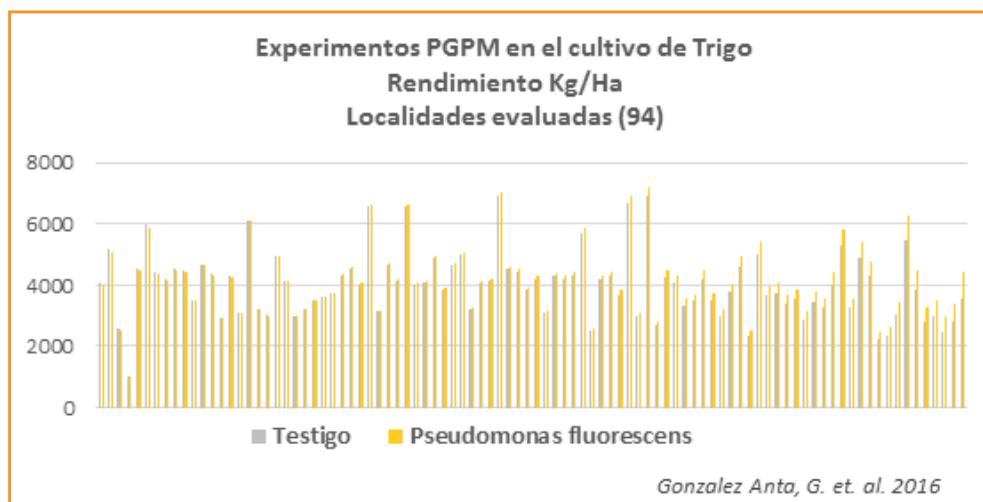


Figura 1. Rendimiento de trigo con y sin aplicación de *Pseudomonas* en 94 localidades de la Provincia de Buenos Aires.

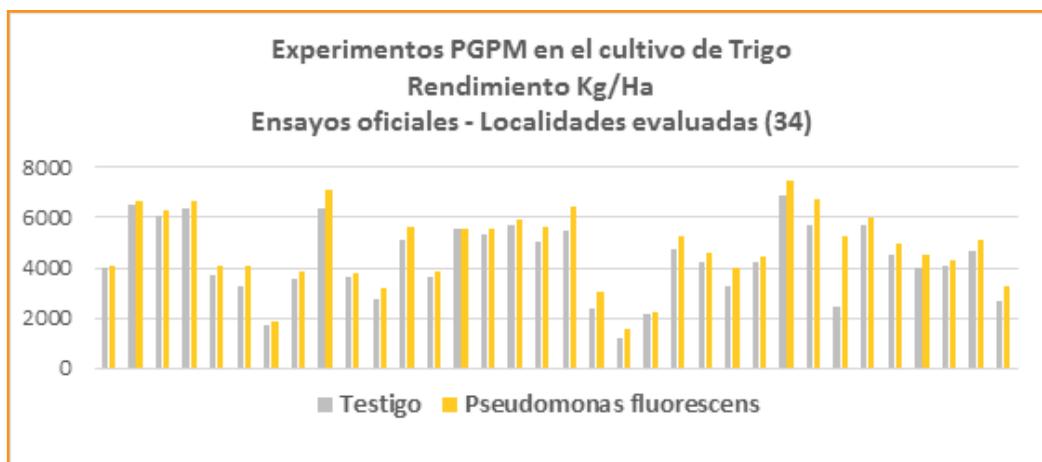


Figura 2. Rendimiento de trigo con y sin aplicación de Pseudomonas en 34 localidades de la región pampeana.

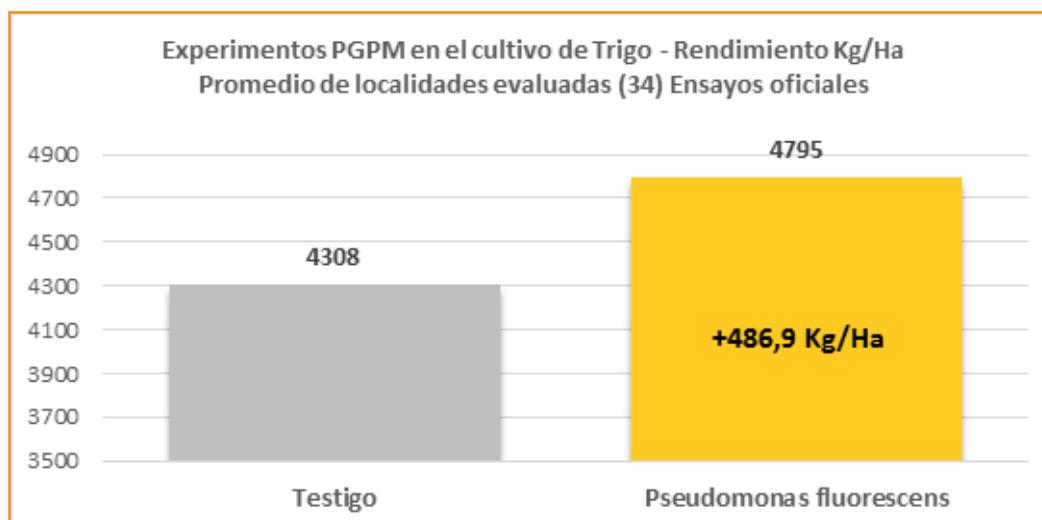
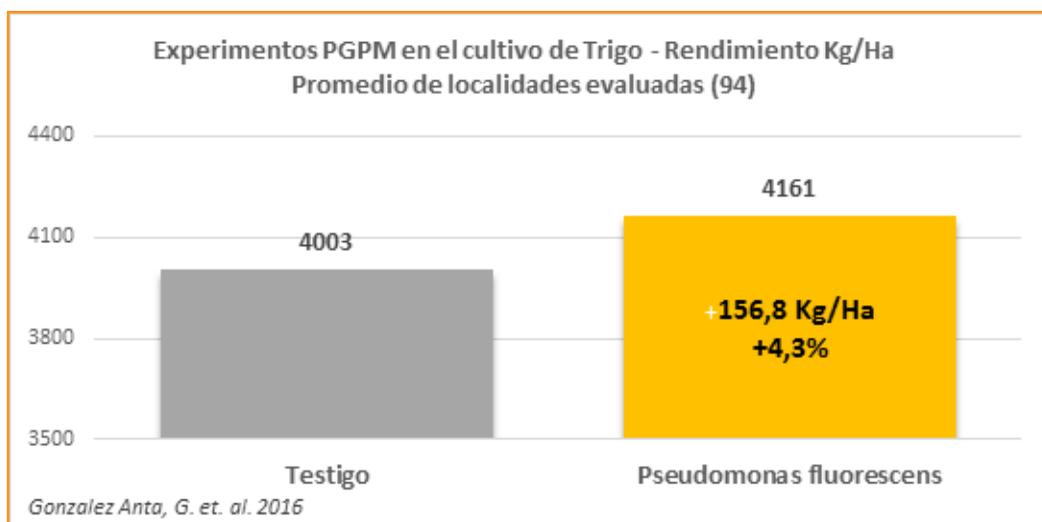


Figura 3. Rendimiento promedio de trigo con y sin aplicación de Pseudomonas en 94 localidades de la Provincia de Buenos Aires (superior) y en 34 localidades de la región pampeana (inferior).

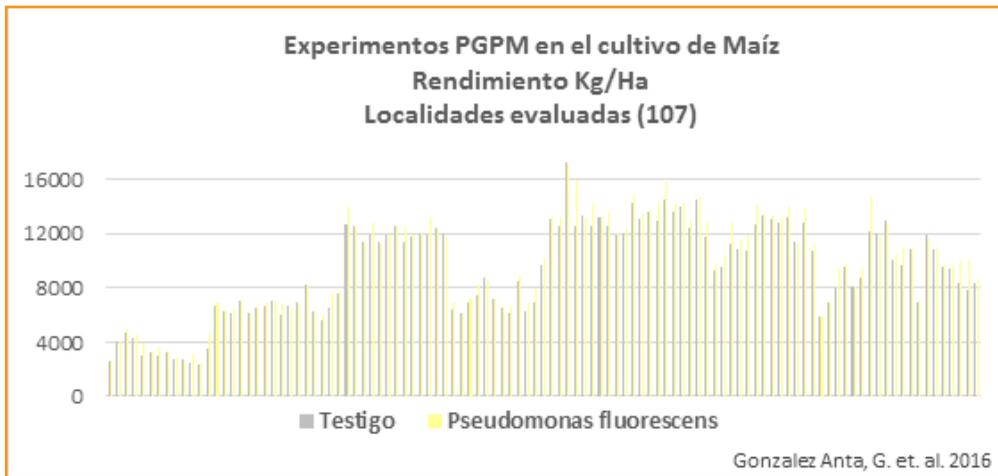


Figura 4. Rendimiento de maíz con y sin aplicación de Pseudomonas en 107 localidades de la región pampeana.

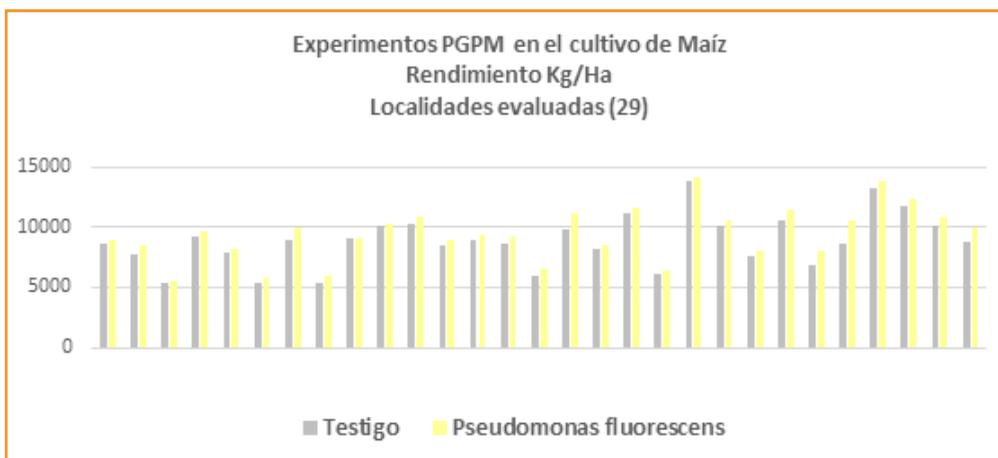


Figura 5. Rendimiento de maíz con y sin aplicación de Pseudomonas en 29 localidades de la región pampeana.

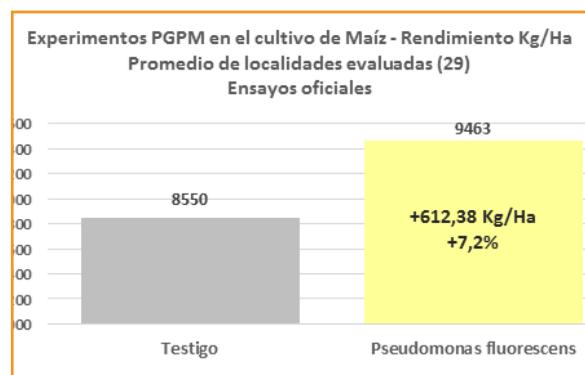
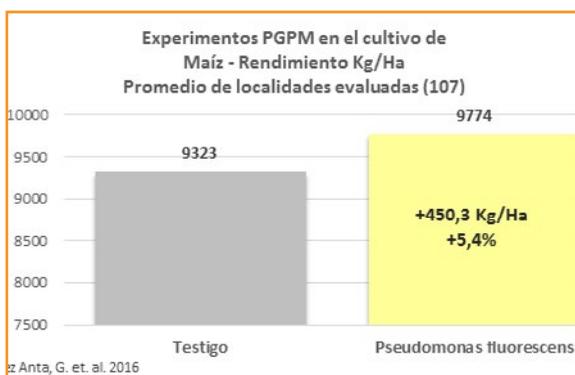


Figura 6. Rendimiento promedio de maíz con y sin aplicación de Pseudomonas en 107 localidades (superior) y en 29 localidades de la región pampeana (inferior).

Impacto Económico de Estrategias de Fertilización de Cultivos

Andrés Grasso

Fertilizar Asociación Civil

*Contacto: grasso@fertilizar.org.ar

El desafío que se presenta actualmente en la producción agrícola es intensificar la producción de manera sustentable, con el objetivo de satisfacer la demanda creciente de alimentos. La intensificación sustentable debe darse mediante el aumento de la cobertura de suelo durante el año (doble cultivo, cultivos de cobertura, cultivos de servicios) y mediante el aumento de la productividad por unidad de área haciendo más eficiente las prácticas de producción.

En un contexto en que los precios de los granos tienden a sostenerse en niveles bajos respecto a los valores máximos alcanzados en campañas anteriores (MATba, 2017), la eficiencia en el uso de los recursos de producción es trascendente para disminuir los riesgos y para maximizar los retornos de la inversión realizada. En este sentido, el manejo de la fertilización es clave.

En la Argentina, las mayores dosis de fertilizante se utilizan en las gramíneas anuales, trigo y maíz con dosis media para la región templada de 170 y 220 kg/ha de producto respectivamente. En la soja, que es el cultivo más importante en términos de superficie sembrada, las dosis de fertilizante alcanzaron los 60 kg/ha para la campaña 2015/2016 (Díaz Zorita y Grasso, 2016). Con estos niveles de fertilización y con los niveles de producción de granos para la misma campaña, la reposición de nutrientes para estos tres cultivos fue de 64%, 30% y 6% para trigo, maíz y soja, respectivamente, según Fertilizar AC.

La decisión de la dosis de fertilizante se basa en parte en la probabilidad de respuesta asociada a la disponibilidad de nutrientes (definida a partir de un diagnóstico con base en el análisis de suelos) y a los rendimientos alcanzables o la expectativa de rendimiento construida por campañas anteriores. Sin embargo, finalmente los aspectos económicos y financieros son los que terminan definiendo los niveles sub-óptimos de fertilización actuales.

Abundan trabajos en la bibliografía (Barbieri et al., 2008; Salvagiotti et al., 2011; Correndo et al., 2015) donde se evalúan los efectos de la disponibilidad de nutrientes sobre los rendimientos y, a partir de la eficiencia agronómica y la relación de precios entre el nutriente y los granos, se

define la dosis óptima económica, el retorno de inversión por nutriente, etc. Sin embargo, no hay trabajos que evalúen la ecuación económica de diferentes estrategias de fertilización de cultivos. Utilizaremos los resultados de ensayos instalados en la región pampeana en donde se evalúan el manejo del productor y el manejo intensificado bajo diferentes rotaciones de cultivos con el objetivo de evaluar la factibilidad económica de ajustar las dosis de fertilización.

Margen bruto de la práctica de fertilización

Para el evaluar el impacto económico de las estrategias de fertilización sobre la rentabilidad del negocio agrario, utilizaremos como indicador el margen bruto parcial por fertilización. Este indicador se calcula simplemente como la diferencia entre los ingresos adicionales por la fertilización y los costos asociados de cada estrategia (**Ecuación 1**) (Correndo et al., 2015):

$$MBP = [\Delta \text{Rendimiento} \times (PG - GC)] - [(Fa \times (CF + Cop)) + Ca]$$

Ec. 1

donde, MBP (US\$ ha⁻¹) = margen bruto parcial; Δ Rendimiento (kg ha⁻¹) = rendimiento de tratamientos fertilizados (Estrategias productor, Estrategias Intensificadas) - rendimiento del Testigo; PG (US\$ kg⁻¹) = precio del grano; GC (US\$ kg⁻¹) = gastos de comercialización; Fa (kg ha⁻¹) = fertilizante aplicado; CF (US\$ kg⁻¹) = costo del fertilizante; Cop (US\$ kg⁻¹) = costo de oportunidad del fertilizante; y Ca (US\$ ha⁻¹) = costo de aplicación del fertilizante.

Los análisis estadísticos se realizaron mediante el programa Infostat 2016 (Di Rienzo et al., 2016).

Impacto de las estrategias en secuencias continuas de soja

En distintos sitios representativos de la región pampeana, Fertilizar AC estableció en la campaña 2010/11 una red de ensayos de larga duración bajo secuencias continuas de producción de soja (**Tabla 1**). Los niveles de fósforo (P) en el suelo en todos sitios eran inferiores a 10 ppm en los primeros 20 cm del suelo.

Tabla 1. Sitios y campañas bajo estudio.

Sitios		Campañas						Total Ensayos
Localidad	Provincia	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
9 de Julio	Buenos Aires	2010	2011	2012	2013	2014	2015	6
Carcaraña	Santa Fe	2010	2011	2012				3
Gral. Pico	La Pampa				2013	2014	2015	3
Ferré	Buenos Aires	2010	2011	2012	2013	2014	2015	6
Rio Cuarto	Córdoba		2011	2012				2
Tres Arroyos	Buenos Aires				2013	2014	2015	3
C. Uruguay	Entre Ríos				2013	2014	2015	3
Total	3	4	4	5	5	5	26	

Tabla 2. Tratamientos evaluados y dosis del fertilizante con P en el cultivo de soja.

Denominación	Tratamiento	Dosis de P (kg/ha)	Dosis de S(kg/ha)	Inoculante
T1	Testigo	no	no	si
T2	Productor	8 a 15	15-18	si
T3	Intensificado	25 a 30	15-18	si

En cada sitio se establecieron 3 tratamientos de manejo de la fertilización con P en un diseño en bloques completos aleatorizados con 4 repeticiones. Las dosis de P aplicadas variaron entre sitios representando en el tratamiento 2 (T2) a la dosis de aplicación normal en cada región que representa la estrategia actual de manejo del productor y en el tratamiento 3 (T3) se representa la estrategia de intensificación de la producción que es un aporte de P suficiente para el mantenimiento de la cantidad extraída por la producción de granos del cultivo (Tabla 2).

La producción por hectárea acumulada de la

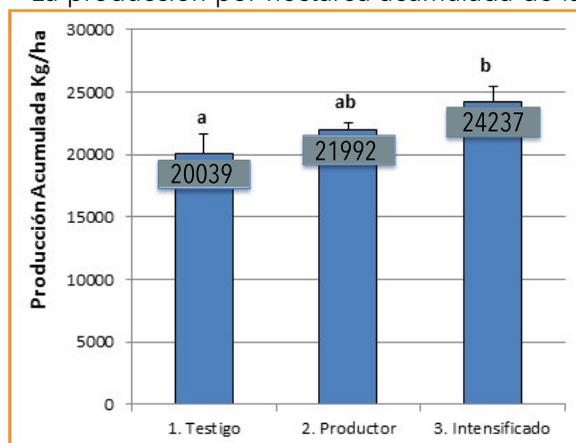


Figura 1. Producción acumulada promedio (kg/ha) en los 6 años para cada tratamiento (n=26). Letras distintas indican diferencias significativas entre las estrategias según Tukey al 5%.

estrategia de fertilización intensificada alcanzo los 24.483 kg/ha en las seis campañas de experimentación y supero en un 10% la producción del manejo del productor (Figura 1) que alcanzó los 22.195 Kg/ha. El testigo que no recibió fertilizantes produjo 20.051 kg/ha, un 10% menos que la estrategia de manejo del productor y 18% menos que la estrategia intensificada.

El impacto económico acumulado de las estrategias sobre los márgenes brutos se observa en la Figura 2. La estrategia de fertilización intensificada alcanzó durante las 6 campañas un MBP de U\$S/ha 639, un 49% superior que las estrategias de manejo del productor que alcanzo a acumular en el mismo período un MBP de U\$S 432/ha.

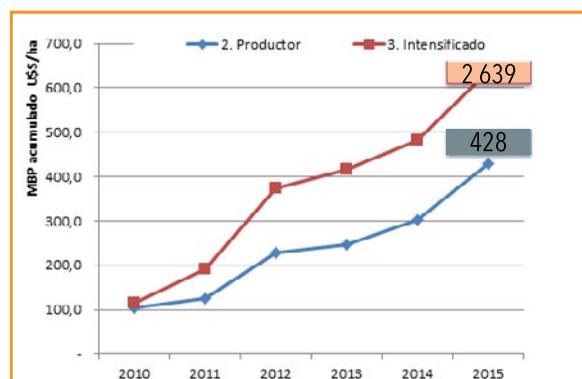


Figura 2. Margen bruto parcial acumulado (MBP U\$S/ha) resultante de las dos estrategias de fertilización contra el testigo establecidas para las 6 campañas.

Es relevante, luego del análisis de los resultados, destacar que los planteos de mejora en las estrategias de manejo de la fertilización de P en secuencia continuas de soja aumentan la producción de soja y mejoran de forma muy destacada los resultados económicos de la producción.

Impacto de las estrategias en rotaciones de cultivos

Para analizar el impacto que tienen las decisiones de manejo de la fertilización sobre el resultado económico en sistemas de rotación gramíneas – leguminosas, existen algunos trabajos de publicación reciente que son muy contundentes por la duración de los ensayos, todos son de larga duración, y por las diferencias logradas en donde los esquemas de fertilización intensiva siempre lograron mejor performance económica que los manejos tradicionales.

El trabajo con mayor evidencia es el análisis desarrollado por Correndo y colaboradores en 2015 (Correndo et al., 2015), donde evaluaron el impacto de los diferentes manejos de la fertilización (5 tratamientos) en una red de ensayos de larga duración (14 campañas) bajo dos esquemas de rotaciones diferentes (Maíz/Trigo-Soja y Maíz/Soja/Trigo-Soja). En este caso,

los tratamientos utilizados son un testigo sin fertilizante, y los siguientes con fósforo y azufre (PS), nitrógeno y azufre (NS), nitrógeno y fósforo (NP) y nitrógeno, fósforo y azufre (NPS).

Respecto de las rotaciones, los autores resaltaron que los sitios con mayor proporción de maíz (Maíz/Trigo-Soja Vs. Maíz/Soja/Trigo-Soja) fueron los que acumularon mayor MBP a lo largo de todas las campañas (Balducchi y San Alfredo) (Figura 3).

En cuanto al efecto de la fertilización, en la Figura 3 se observa que la mayor acumulación de MBP se obtiene con las estrategias más balanceadas en nutrientes (NPS). Sin embargo, es importante destacar que las diferentes condiciones de los lotes representados en los diferentes sitios influyen sobre los resultados específicos en cada ensayo en donde los efectos del manejo de la fertilización se maximizan en el sitio de menor fertilidad (Balducchi) y se minimizan en donde la disponibilidad de nutrientes es más elevada, representado en el sitio Lambaré. (García et al., 2010). Esto destaca la importancia de realizar el análisis del suelo como herramienta de diagnóstico antes de decidir la estrategia de fertilización.

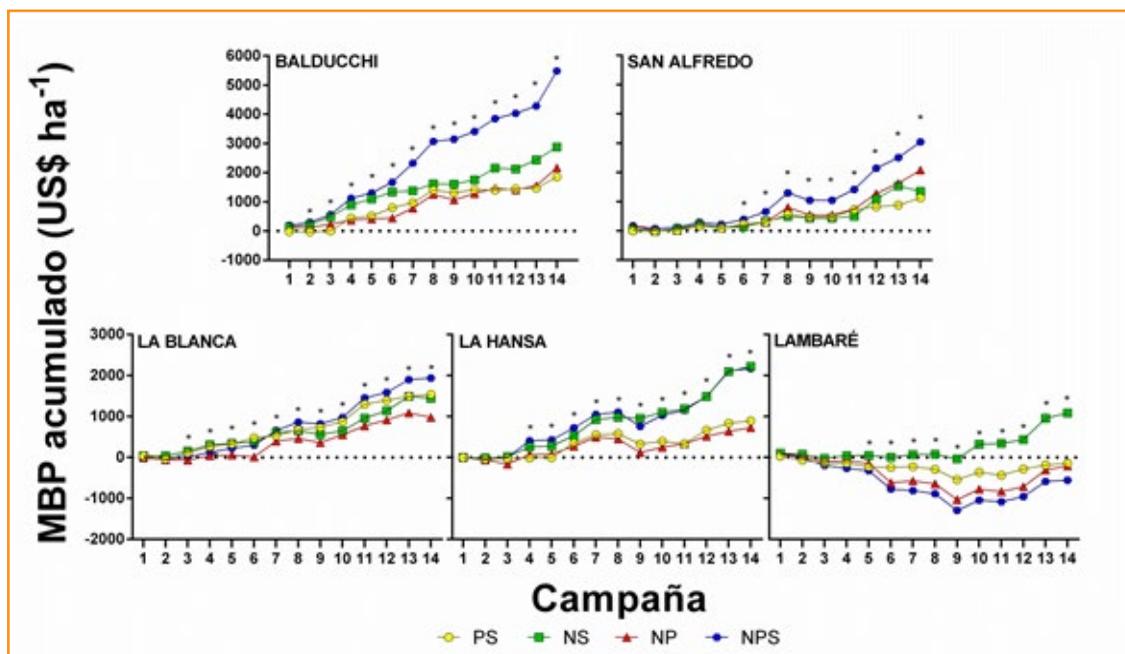


Figura 3. Margen bruto parcial acumulado (US\$ ha⁻¹) para los diferentes tratamientos de fertilización en los cinco sitios evaluados y para las campañas 2000/01 a 2013/14. Las barras indican el error estándar. Asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de un mismo sitio y campaña, según Tukey al 5%. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP (Correndo et al., 2015).

Consideraciones finales

- La estrategia de fertilización actualmente utilizada por los productores en sitios representativos de la región templada, genera impactos positivos sobre el resultado económico de la producción. Sin embargo, hemos visto, luego del análisis de diferentes experiencias, que cuando se intensifica la nutrición de cultivos, las mejoras sobre el resultado productivo y económico son muy importantes, tanto en secuencias Soja-Soja como en rotaciones Maíz-Trigo/Soja o Maíz-Soja-Trigo-Soja.
- Es de destacar la importancia del diagnóstico como herramienta para la decisión de la mejor estrategia de fertilización. Los niveles de fertilidad del suelo determinan el impacto de la estrategia sobre el resultado económico.

Bibliografía

Barbieri P.A., Echeverría H.E., Sainz Rozas H.R., 2009. Dosis óptima económica de nitrógeno en trigo según momento de fertilización en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 21 (1): 115-125.

Bermúdez M., Díaz-Zorita M.1, Espósito G., Ferraris G., Gerster G., Saks M., Salvagiotti F, Ventimiglia L. 2014. Fertilización con fósforo en secuencias continuas de Soja. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Del 5 al 9 de mayo de 2014, Bahía Blanca, Buenos Aires. Actas Cd-Rom

Correndo A.A., M. Boxler, y F. O. García, 2015. Análisis económico del manejo de la fertilización con enfoque en el largo plazo. *Cienc. Suelo (Argentina)* 33(2):197-212.

Díaz-Zorita M. y Grasso A., 2016. Fertilización intensificada de planteos agrícolas. XXIV Congreso Anual AAPRESID. Del 3 a 5 Agosto de 2016, Rosario, Santa Fe. Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Fertilizar AC, 2017. Estadísticas. Consumo de fertilizantes en todos los cultivos. http://www.fertilizar.org.ar/?page_id=468

García, F.O., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N. Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. 2a Ed. Buenos Aires, AACREA. 2010. 64 pp.

MATba, 2017. Mercado a Término de Buenos Aires. Cotizaciones. Evolución de Futuros por Posición. <http://datacenter.matba.com.ar/futuros.aspx>

Salvagiotti F., Castellarín J.M., Ferraguti F.J. y Pedrol H.M., 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29 (2): 199-212. ●

Brechas de rendimiento en soja: Rol de la Nutrición en los Sistemas Productivos

Ignacio A. Ciampitti^{1,*}, M. Stewart², F. Salvagiotti³, F.O. García², E. Francisco² y G.R. Balboa¹

¹Departamento de Agronomía, Kansas State University, Manhattan, Kansas, EE.UU.

²International Plant Nutrition Institute (IPNI)

³EEA INTA Oliveros, Oliveros, Santa Fe, Argentina

* Contacto: ciampitti@ksu.edu

La brecha de rendimiento se define como la diferencia de rendimiento entre el "alcanzable" en la región (máximo rendimiento sin estreses bióticos o abióticos) y el rendimiento del productor. La selección de las mejores prácticas de manejo de cultivos y nutrientes (por ejemplo: variedad, distancia entre hileras, fecha de siembra, aplicación de nutrientes - forma, fuente, momento y ubicación), considerando las interacciones entre sí, y también de estas prácticas con el ambiente (suelo, clima), directamente impactan el tamaño de la brecha de rendimientos. En los últimos años, varias investigaciones evaluaron el efecto de las aplicaciones de fertilizantes o el manejo de cultivos en forma individual; todavía son escasas las investigaciones científicas evaluando la combinación de prácticas en un sistema integrado.

La ley de "Mínimos de Liebig" establece que el crecimiento del cultivo es controlado por el recurso más limitante. Siguiendo este razonamiento, cuando los nutrientes son aportados en forma completa y balanceada de acuerdo a la demanda de la planta, el rendimiento del cultivo va a estar limitado por otros factores tales como la radiación solar interceptada o la disponibilidad de agua. El objetivo de este trabajo es evaluar en forma simultánea un sistema integrado de manejo que considere las practicas que mejoran

la utilización de los nutrientes y el manejo del cultivo, y por lo tanto, mejorando la comprensión del concepto de "Intensificación Ecológica".

Estudios de soja en rotación con maíz fueron llevados a cabo en las campañas agrícolas del 2014 y 2015 en Scandia (Kansas, EE.UU.) bajo condiciones de secano y de riego. En cada ensayo, cinco sistemas de producción fueron evaluados desde sistemas de bajo uso de insumos a sistemas más intensivos, con un alto uso de insumos. Los siguientes tratamientos fueron evaluados: Prácticas Comunes (PC), Fertilización Integral (FI), Producción Intensificada (PI), Intensificación Ecológica (IE), y Avanzada (AV) (**Tabla 1**). La principal diferencia entre los tratamientos PC y FI fue que el tratamiento FI recibió fertilización (P, K, y S) balanceada en soja y con N agregado en maíz. Para el tratamiento PI, la densidad de plantas se incrementó en 56,400 semillas por ha sobre el tratamiento PC, variando el espaciamiento entre hileras de 76 a 38 cm, pero sin el agregado de fertilizantes. El tratamiento IE fue la combinación de ambos PC y FI, presentando 328,900 semillas por ha, distanciamiento de 38 cm, y con nutrición balanceada de macro y micronutrientes, mas fungicida/insecticida aplicado en estadios reproductivos.

Tabla 1. Descripción de tratamientos en soja (Scandia, KS, EE.UU.), campañas agrícolas 2014 y 2015.

Tratamiento	PC	FI	PI	IE	AV
Densidad de siembra, pl/ha	272 500	272 500	328 900	328 900	328 900
Espacio entre hilera, cm	76	76	38	38	38
Fertilización	No	(P-K-S)	No	(N*-P-K-S)	(N*P-K-S)
Micronutrientes	No	No	No	1x (Fe, Zn, B)* 2x (Fe, Zn, B)**	
Fungicidas/Insecticida	No	No	No	1x**	2x**

PC= practicas comunes, FI = fertilización integral, PI= producción intensificada, IE= intensificación ecológica (FI+PI), AV= avanzada. *Aplicado a R3. **Aplicado a R1 y R3. Dosis de fertilizante en kg N-P2O5-K2O-S/ha: (56-9-31-8) and (56-13-43-11) para secano e irrigado. El tratamiento PC, FI, y PI no recibieron aplicación de N en soja.

El promedio de precipitaciones para ambas campañas fue de 414 mm y en el escenario bajo riego recibió 175 mm adicionales. Por último, el tratamiento AV fue similar a la combinación de factores presentadas en el IE, con la diferencia de una mayor intensidad en el uso de insumos (2x) para micronutrientes y aplicación de fungicidas/insecticidas.

En todos los años del experimento fueron evaluados la fenología del cultivo de soja (V4, V6, R1, R5, y R7), la evolución de biomasa, la concentración de nutrientes, y el porcentaje de cobertura del canopeo. El índice de cosecha de grano (ICG) y de N (ICN) en grano relativo a la planta fueron determinados de la siguiente manera:

$$\text{ICG} = \text{Semilla (kg/ha)} / \text{Biomasa total (kg/ha)}$$

$$\text{ICN} = \text{Contenido de N en semilla (kg/ha)} / \text{Contenido de N en planta (kg/ha)}$$

El factor parcial de producción de los fertilizantes (FPPf) fue calculado como la relación entre el rendimiento y la cantidad de fertilizante aplicado ($\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} + \text{S}$) en los tratamientos EI y FI.

Resultados

Se detectaron diferencias visibles en cobertura del canopeo al estadio V4 (cuatro-hojas trifoliadas) en soja mediante el análisis de las imágenes (**Figura 1**). Bajo condiciones de irrigación, la cobertura del canopeo del tratamiento PC fue del 42%, mientras que para el tratamiento IE fue

del 66%. Esta mayor cobertura durante el estadio temprano de desarrollo con el tratamiento IE resultó en una mayor intercepción de la luz y probablemente en una mayor eficiencia en la conversión de carbono a biomasa.

Rendimientos

En la **Figura 2** se presentan los rendimientos promedio de dos años de campaña agrícola para el cultivo de soja. El promedio de rendimiento para la condición de secano entre tratamientos y años fue de 2.9 Mg/ha. El rendimiento promedio máximo en secano se alcanzó en el tratamiento AV (3.6 Mg/ha), pero no fue estadísticamente diferente de los tratamientos PI (3.2 Mg/ha) y IE (3.4 Mg/ha). El promedio de estos tres tratamientos más intensivos (PI, IE y AV) fue de 3.4 Mg/ha. Los tratamientos PC y FI produjeron 2.1 Mg/ha. Por lo tanto, la brecha de rendimiento calculada a partir de estos datos para el escenario de secano fue de 1.3 Mg/ha. Aunque los rendimientos de la soja para los tratamientos PI y IE no fueron estadísticamente diferentes, el tratamiento PI está "minando" los nutrientes del suelo y, por lo tanto, arriesgando el potencial de rendimiento de los cultivos futuros en la rotación. De hecho, en este estudio, cuando el maíz siguió a la soja, se documentó una gran reducción del rendimiento del maíz (1.3 Mg/ha en 2015) en el tratamiento PI comparado con el IE, reflejando directamente el impacto de un balance negativo de nutrientes en la fase de soja.

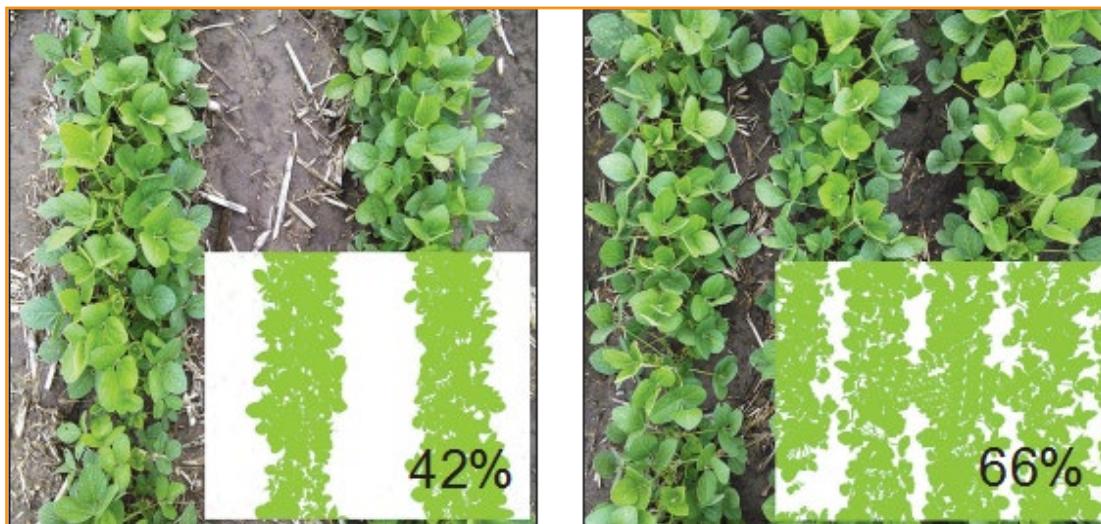


Figura 1. Cobertura del canopeo en soja para el tratamiento PC (izquierda) y IE (derecha) al estadio fenológico V4 en Scandia, Kansas, EE.UU. para la campaña agrícola 2015. Las imágenes fueron procesadas con el programa Siscob® de EMBRAPA.

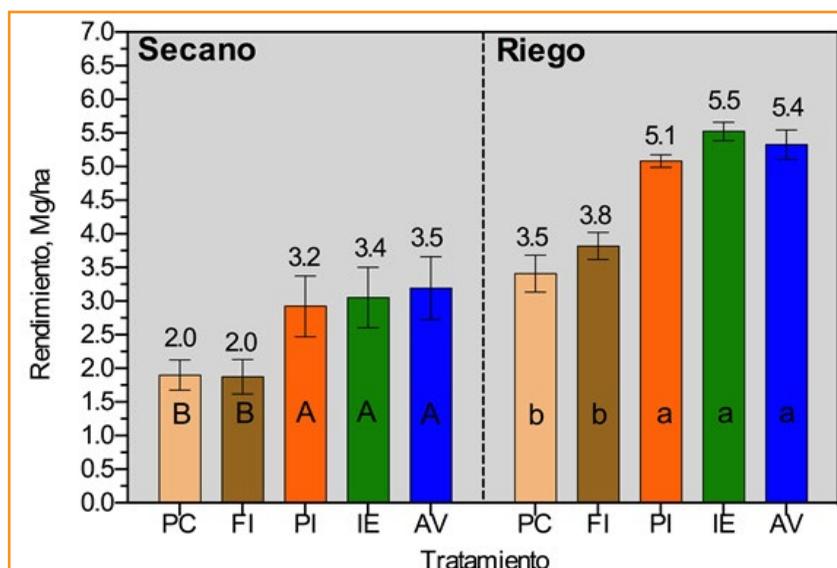


Figura 2. Rendimiento de soja para las condiciones de secano y bajo riego en Scandia, Kansas, EE.UU., promedio de las campañas agrícolas 2014 y 2015. Letras para cada columna indican diferencias estadísticas para rendimiento ($p < 0.05$).

Para el escenario de riego, el promedio de rendimiento de semilla entre tratamientos y años fue de 4.6 Mg/ha, 1.7 Mg/ha más que el promedio general en condiciones de secano. Aumentar la intensidad de la producción reduciendo el espaciamiento entre hileras y aumentando la densidad de siembra incrementó el rendimiento en 1.6 Mg/ha, de 3.5 Mg/ha en el tratamiento PC a 5.1 Mg/ha para el tratamiento de PI (Figura 2). Si bien los rendimientos de los tratamientos PC (3.5 Mg/ha) y FI (3.8 Mg/ha) fueron numéricamente diferentes, esa diferencia no fue estadísticamente significativa. El promedio de los tratamientos de menor intensidad (PC y FI) fue de 3.6 Mg/ha. El rendimiento máximo bajo condiciones de riego se obtuvo al combinar las prácticas de manejo de fertilizantes y cultivos en el tratamiento de IE (5.5 Mg/ha), y aunque este fue el mayor rendimiento, no fue significativamente diferente de los tratamientos PI (5.1 Mg/ha) y AV (5.4 Mg/ha). El promedio de estos tres tratamientos más intensivos (PI, IE y AV) fue de 5.3 Mg/ha. Por lo tanto, la brecha de rendimiento explotable bajo condiciones de riego fue de 1.7 Mg/ha. En promedio, cada 25 mm de agua aplicada produjo un rendimiento de 0.25 Mg de soja.

Bajo condiciones de riego, el FPPf, calculado como el rendimiento dividido la cantidad total de fertilizante aplicada, fue de 14 (kg rendimiento/kg fertilizante) para el tratamiento FI y de 17 para el tratamiento IE. Para el ambiente en secano, FPPf para FI fue de 11 y para IE fue 14. El FPPf para el tratamiento de IE fue 19% mayor bajo riego, y 28%

mayor en condiciones de secano respecto al FI. Al intensificar las prácticas de producción (espaciamiento entre hileras y aumento de la densidad de siembra), cada unidad de fertilizante agregada al sistema fue más eficiente en la producción de rendimientos en el cultivo de soja.

Biomasa Total e Índice de Cosecha de Grano

Bajo condiciones de riego, la producción total de biomasa fue 14277 kg/ha, lo cual fue 50% mayor que el escenario de secano (Tabla 2). El tratamiento de PC produjo consistentemente menos biomasa total y rastrojos comparado con el resto de los tratamientos bajo condiciones de riego. En secano, la biomasa total siguió la misma tendencia observada para los rendimientos (Figura 2), y los tratamientos con mayor intensificación (PI, IE, y AV) produjeron un 24% (o 1982 kg/ha) más de biomasa total que los tratamientos PC-FI. Bajo riego, los tratamientos intensivos incrementaron la biomasa en un 39% (o 4497 kg/ha) sobre el promedio de los tratamientos PC-FI (Tabla 2). La nutrición balanceada sin intensificación productiva (FI) aumento la producción de biomasa en un 29% (o 2945 kg/ha) en relación con el tratamiento PC; y en un 65% (o 6529 kg/ha) cuando la nutrición balanceada se combinó con un manejo intensivo de la producción.

En resumen, este estudio demostró un gran impacto de las prácticas de manejo de fertilizantes y de cultivos en la producción total de biomasa tanto en secano como en condiciones bajo riego.

En condiciones de secano, la intensificación de la producción aumentó los rendimientos a través de la mejora del ICG; mientras que, bajo riego, el proceso de intensificación se rige principalmente por cambios en la biomasa total (**Tabla 2**).

Absorción Total de Nitrógeno (N)

El aumento de la biomasa total correspondió con un aumento en la absorción total de N. La absorción total de N para las campañas agrícolas varió de 258 a 426 kg/ha bajo secano y de 302 a 476 kg/ha para las condiciones de riego (**Figura 3**). Para ambos escenarios de disponibilidad de agua, los tratamientos más intensificados (PI, IE y AV) presentaron mayor absorción de N comparado con los tratamientos PC-FI. Se observó una tendencia estable en el ICN a través de los tratamientos bajo riego, con un promedio del 70% del N total en la semilla. En secano, el ICN fue menos predecible, pero tendió a ser mayor con los tratamientos de IE y AV. El promedio de N en la semilla fue 62% (ICN), lo cual fue 8% menor que en los tratamientos irrigados.

Acumulación de Biomasa, Nitrógeno, y Partición

La acumulación de biomasa y la dinámica de N presentada en este escrito se enfocarán en los tratamientos de PC y IE en la condición bajo riego. Fueron observadas grandes diferencias en acumulación de biomasa para el nivel de baja (PC, **Figura 4a**) respecto del de alta (IE, **Figura 4b**) intensificación. En la floración (R1), la biomasa acumulada relativa al valor final (cosecha) fue menor (16%) para el tratamiento de la IE respecto al PC (27%). Un valor menor significa que una mayor proporción de biomasa total (más del 80%) fue acumulada durante las etapas más críticas del período reproductivo para el

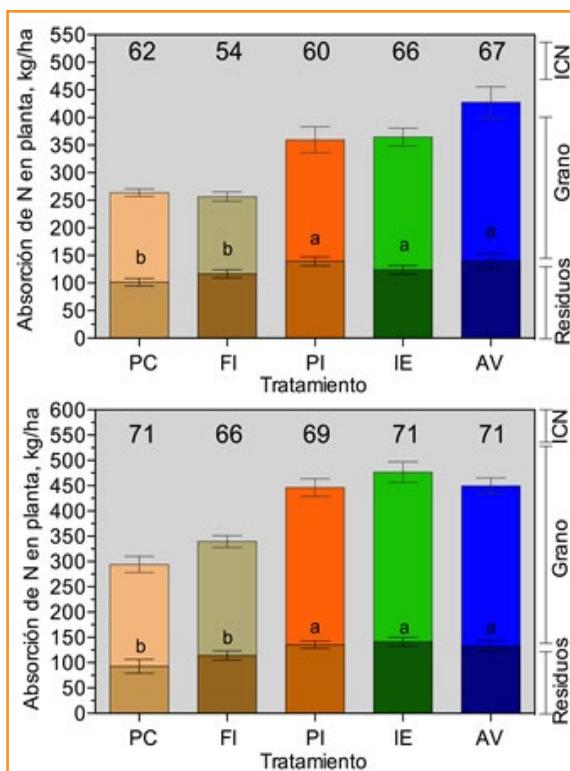


Figura 3. Absorción de N en planta e índice de cosecha de N (ICN) en soja para las condiciones de secano (panel superior) y bajo riego (panel inferior) en Scandia, Kansas, EEUU., promedio de las campañas agrícolas 2014 y 2015. Letras para cada columna indican diferencias estadísticas para rendimiento ($p < 0.05$).

tratamiento IE. El tratamiento IE acumuló un 60% más de biomasa al final de la temporada comparada con la biomasa total en el PC. Este mayor valor de biomasa del tratamiento IE se produjo principalmente después del inicio de la floración (R1), con una tasa estable de acumulación hasta el final del período de llenado de grano (**Figuras 4a y 4b**). Esta diferencia en la biomasa total y la

Tabla 2. Biomasa total, rastrojos, e índice de cosecha de granos (IC) bajo condiciones de secano e irrigadas (Scandia, KS), promedio campañas agrícolas 2014 y 2015.

Tratamientos	Biomasa, kg/ha		Rastrojo, kg/ha		IC	
	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego
PC	8418 b	10107 c	6347 a	6625 c	0.25 c	0.34 a
FI	8287 b	13051 b	6238 a	9244 b	0.25 c	0.29 b
PI	10788 a	15410 a	7620 a	10356 a	0.29 b	0.33 a
IE	9736 a	16635 a	6438 a	11127 a	0.34 a	0.33 a
AV	10479 a	16183 a	7035 a	10849 a	0.33 a	0.33 a

PC= practicas comunes, FI = fertilización integral, PI= producción intensificada, IE= intensificación ecológica (FI+PI), AV= avanzada. ICG=Índice de Cosecha de Granos. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

acumulación estacional fue el principal factor que determinó las diferencias de rendimiento entre estos dos escenarios de insumos, ya que la diferencia en el ICG entre los tratamientos evaluados, IE y PC, fue mínima.

La absorción de N estacional para los tratamientos PC y IE siguió los mismos patrones que la acumulación de biomasa (**Figuras 4c y 4d**). Se observó una mayor absorción de N, cerca de dos veces, con el tratamiento de IE de alto rendimiento comparado con el CP. La menor absorción de N para el escenario PC se corresponde con un menor rendimiento. Además, la mayor absorción de N para el tratamiento IE se acompañó con una mejora del 5% en la partición de N de semillas (ICN de 71% para EI frente a 66% para CP).

Conclusiones

La intensificación de la productividad mediante la utilización de mejores prácticas de manejo de los fertilizantes y cultivos (espaciamiento más reducido entre hileras, una mayor densidad de siembra y una nutrición balanceada) impactaron positivamente en la producción de biomasa, la absorción de N y la eficiencia de partición medida a través del ICG e ICN.

La partición de nitrógeno a la semilla, o ICN, aumentó con la intensificación del sistema de cultivo; mientras tanto, la partición de biomasa a la semilla (ICG) permaneció sin cambios bajo el ambiente de alto rendimiento, irrigado. En este ambiente, la nutrición equilibrada fue un factor clave para mantener una mayor biomasa y absorción de N.

La intercepción temprana de luz, que fue mayor para el EI comparado con PC, no se tradujo en cambios tempranos en la biomasa; sin embargo, se documentó una mayor tasa y duración del crecimiento de las plantas durante el período reproductivo tardío para los tratamientos con mejor cobertura temprana, una diferencia del 60% mayor en biomasa para la condición IE comparada con el tratamiento PC.

La intensificación sostenible de los sistemas de producción de soja requiere un enfoque integrado, que combine prácticas óptimas de producción y manejo de nutrientes y cultivos que resulten en una mayor eficiencia del sistema agrícola en general.

Agradecimientos

A todo el equipo de Producción de Cultivos, KSUCROPS Lab, Kansas State University. ●

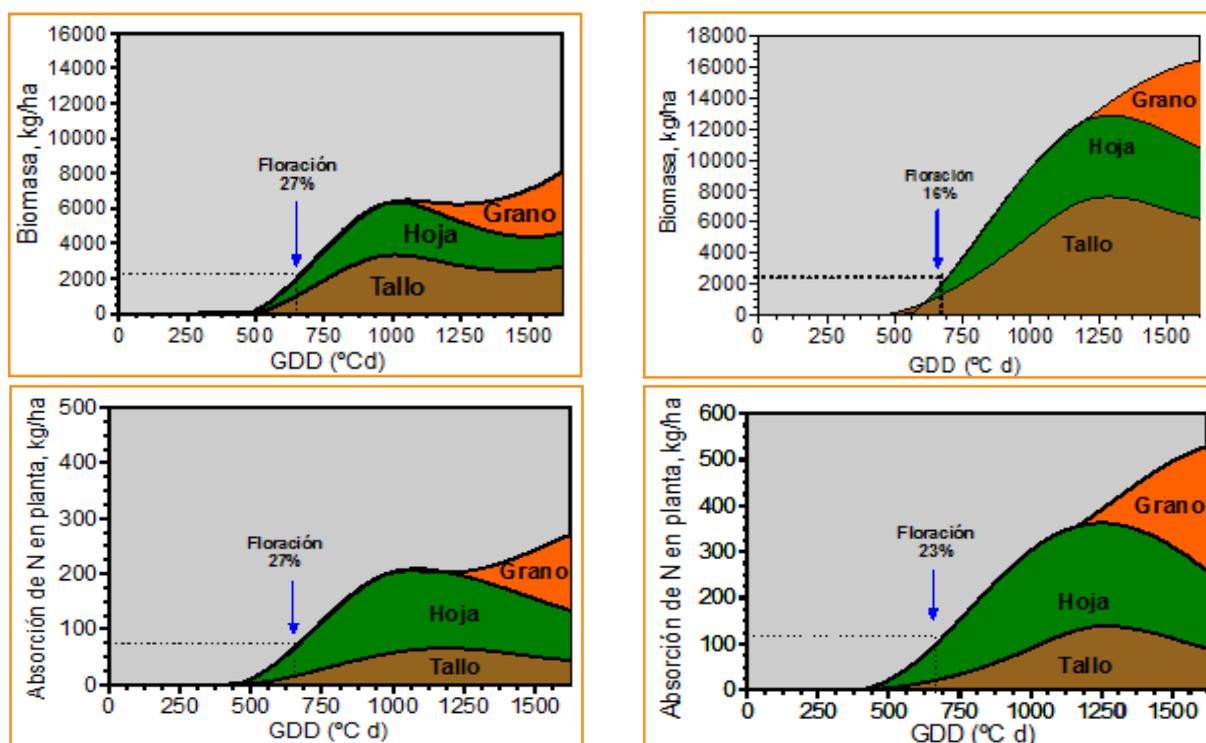


Figura 4. Acumulación de biomasa (paneles superiores) y absorción de N en planta (paneles inferiores) por hectárea durante la estación de crecimiento en soja para los tratamientos prácticas comunes (PC) e intensificación ecológica (IE). Valores expresados para las distintas fracciones de la planta en condiciones de riego, Scandia, Kansas, EE.UU. Promedio de las campañas agrícolas 2014 y 2015. GDD= grados días.

Panel: Trigo, apuntando a rendimiento y calidad

Jorge Bassi*

Fertilizar Asociación Civil

*Contacto: jbassi@fertilizar.org.ar

En los últimos 20 años, resultado de la incorporación de nuevas tecnologías, se observaron mejoras en los rendimientos de trigo con un deterioro en la concentración de proteína. En la campaña 15/16 se generaron serios problemas en la comercialización del trigo, ya que el nivel de proteína se encontraba por debajo de los estándares típicos del mercado internacional, que indican un contenido mínimo para trigo pan de 12% (base seca = 10,4 base húmeda). La campaña 16/17, aun con rendimientos mayores a los de la campaña anterior, revirtió levemente la tendencia, mostrando una mejora en el contenido de proteína. Esto puede ser atribuido en parte a un mayor uso de fertilizante nitrogenado.

Contenido de proteína por región en la Pampa Húmeda

Si realizamos un recorrido temporal del contenido de proteína que se produce en la Pampa Húmeda, podemos ver una marcada reducción en todas las regiones (Figura 1), que derivó en niveles relativamente uniformes entre 10% y 10,7% en base húmeda (Tabla 1).

Un conjunto de factores contribuyen a esta disminución. La difusión de variedades de trigo "blando" sumado a la degradación de los suelos y las bajas dosis de fertilizante nitrogenado utilizadas, que limitan la disponibilidad de nitrógeno (N), componente básico de las proteínas, son mencionadas como las más importantes.

En este panel vamos a analizar las causas de esta disminución y la relación entre la fertilización nitrogenada, el rendimiento y el contenido de proteína; poniendo un especial énfasis en el componente genético.

Rendimiento y proteína

Si se realizan comparaciones entre distintas campañas, el rendimiento y el contenido de proteína tienen una correlación negativa: las campañas de mayores rendimientos coinciden con bajas en el contenido de proteína (Figura 2). Esto se explica en parte, por un efecto de dilución del N, base de las proteínas, y genera el falso concepto que a mayor rendimiento cae irremediablemente la calidad.

Sin embargo, los ensayos de fertilización nitrogenada demuestran que una mayor disponibilidad de N aumenta tanto el rendimiento como el contenido de proteína del grano. De hecho, la producción de proteína total, medida en kilogramos por hectárea, aumenta linealmente con la disponibilidad de N (Figura 3) aunque esto no

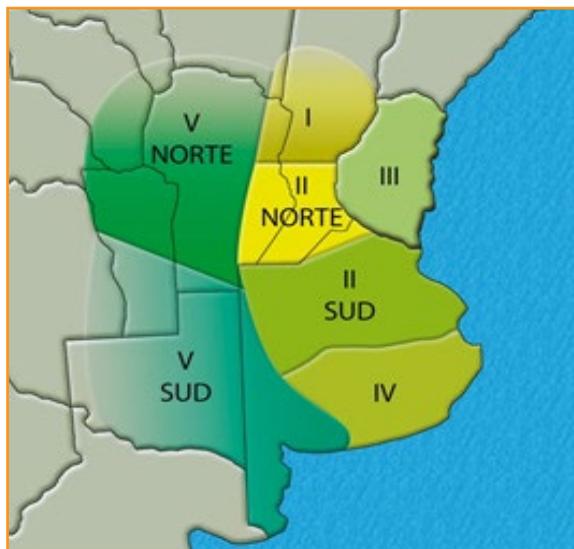


Figura 1. Regiones trigueras de la Pampa Húmeda argentina.

Tabla 1. Contenido de proteína base húmeda para las distintas regiones de la Pampa Húmeda. Se compara un promedio de las campañas 1999-2000, 2000-01 y 2001-02 con un promedio de las campañas 2014-15 y 2015-16. Fuente: Trigo Argentino.

Región	I	II Norte	II Sur	III	IV	V Norte	V Sur
	----- % -----						
1999-02	12.1	11.9	11.5	11.7	10.8	12.0	10.7
2014-16	10.0	10.1	10.2	10.3	9.8	10.7	10.0

se traduce en forma directa al contenido de proteína en porcentaje, debido a los mencionados aumentos de rendimiento (Figura 4). Los mismos experimentos demuestran que el aumento esperable en rendimiento y contenido de proteína, depende en gran medida del tipo de genotipo cultivado.

Rendimiento + calidad: El desafío

En nuestro país, las curvas de respuesta a la disponibilidad de N (N suelo + N fertilizante) están normalmente focalizadas en rendimiento de trigo, sin profundizar en la repercusión del contenido de proteína del mismo. Sin embargo, hay una notable interacción entre la disponibilidad de N, rendimiento y contenido de proteína. En esta relación las características varietales son un factor fundamental a tener en cuenta.

Interacción N, proteína y rendimiento: la importancia del factor varietal

Las variedades usualmente denominadas de "calidad" tienen un alto contenido de proteína y gluten con buena calidad panadera. En los ensayos de fertilización recopilados, estas variedades son estables en su calidad ya que sostienen un contenido de proteína cercano al 11% aun con bajas dosis de fertilizante.

En contraposición, denominaremos variedades de rendimiento a aquellas que logran los mayores rendimientos pero que comprometen fuertemente su contenido de proteína, llegando a ser menor a 8% cuando hay restricciones severas de N. Estas variedades logran una alta eficiencia en el uso del nutriente, pero sólo alcanzan el contenido de proteína estándar para la comercialización cuando tienen alta disponibilidad de N en el suelo. Su rendimiento, a igualdad de condiciones, fue hasta 20% superior al de las variedades de calidad.

El desafío es lograr un manejo de la fertilización que permita sostener altos rendimientos con proteínas en estándar de comercialización del trigo pan y con manejo del riesgo económico y el impacto ambiental. El análisis de suelo y el conocimiento de las características varietales son fundamentales para lograr este objetivo.

En este panel vamos a discutir algunos de los posibles factores de esta disminución y analizar los aportes de estrategias de fertilización nitrogenada, tanto sobre los rendimientos de trigo, como los contenidos de proteínas según genotipos y regiones de producción. ●

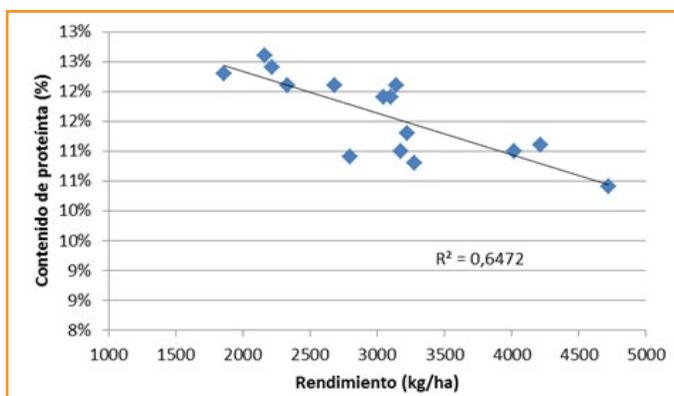


Figura 2. Correlación de contenido de proteína base húmeda y rendimiento promedio para la Región II Norte en la serie de años 1990-2000 a 2015-16. Fuente: Trigo Argentino.

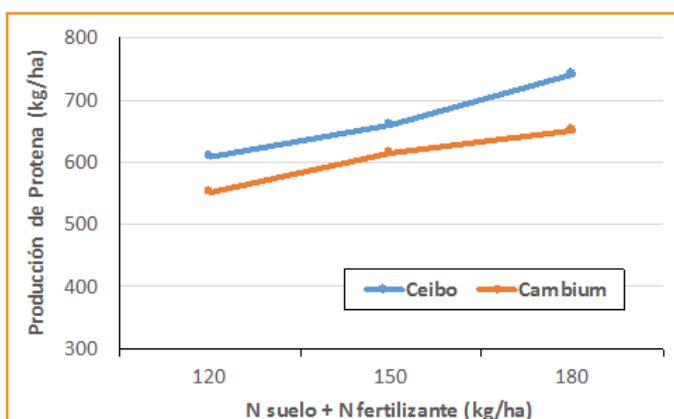


Figura 3. Producción de proteína por hectárea para dos variedades con disponibilidades crecientes de N. Ceibo es considerada una variedad para rendimiento y Cambium para calidad. Promedio de 9 ensayos Región II Norte y II Sur, campaña 2016-17. Acuerdo Don Mario- Bunge.

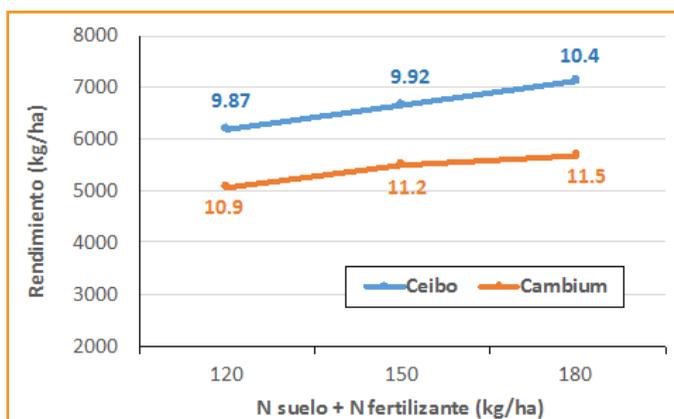


Figura 4. Rendimiento y contenido de proteína para dos variedades con disponibilidades crecientes de N. Ceibo es considerada una variedad para rendimiento y Cambium para calidad. Los números en cada punto de las curvas identifican la concentración de proteína. Promedio de 9 ensayos Región II Norte y II Sur, campaña 2016-17. Acuerdo Don Mario- Bunge.

Manejo de la nutrición de trigo en la región de la pampa arenosa atendiendo a rendimiento y calidad

Cristian Brambilla^{1,*}, G.A. Duarte¹ y M. Díaz-Zorita²

¹DZD Agro, ²Desarrollo de Tecnologías Monsanto y Comité Técnico Fertilizar AC

*Contacto: cbrambilla@dzdagro.com.ar

En la región de la pampa arenosa, los suelos destinados a la producción de trigo son mayormente profundos con texturas franco-arenosas a arenosas con moderados a bajos contenidos de materia orgánica restringiendo sus aportes de nitrógeno (N) y azufre para la normal producción de cultivos. Además, los niveles de fósforo extractable de estos suelos limitan frecuentemente el crecimiento trigo y otros cereales de invierno. Es así, que la corrección de limitaciones en la oferta de nutrientes es una necesidad generalizada en la región por lo que en general el manejo adecuado de la nutrición de trigo explica aproximadamente el 30% de los rendimientos alcanzados por el cultivo. Para su manejo eficiente se requiere de la implementación de planteos integrando diagnósticos mayormente sustentados por análisis de suelos e implementación de recomendaciones de fertilización específicas que atienden no solo a necesidades de mejora en rendimiento sino también en la calidad de los granos producidos.

El ajuste de **necesidades de fertilización nitrogenada** se sustenta en la evaluación de la oferta de N en los suelos determinada en el momento de la siembra por los niveles extraídos de nitratos hasta 40 cm de profundidad. Con esta información, los modelos simples de diagnóstico consideran la fertilización con fuentes nitrogenadas en dosis tal de alcanzar la necesidad teórica o aparente de N (Nobjetivo). Este último se estima según el rendimiento objetivo (o alcanzable) según ubicación, sitio (ej. contenido de materia orgánica y de arenas, espesor sobre la capa de tosca, etc.), manejo (ej. sistema de siembra, corrección de otros nutrientes limitantes, etc.) y pronósticos climáticos. En general, en condiciones de alta productividad la corrección de necesidades de N considera alcanzar 145 kg/ha de Nobjetivo mientras que en sitios con menores rendimientos este objetivo se reduce llegando en sitios de baja productividad a niveles de 90 kg/ha. En toda la región, es recomendable la aplicación de las necesidades de corrección nitrogenada entre la siembra y el inicio del

estadio de macollaje (Z30) evitando postergar esta práctica luego de agosto. En general, al plantearse estrategias no restrictivas en la oferta de N no se observan restricciones en la calidad de los granos producidos evaluada principalmente por el contenido de proteínas. Estudios recientes sugieren que la caracterización de los sitios incluyendo un indicador adicional de oferta potencial de N, tal como la evaluación del nivel de N anaeróbico (Nan), contribuiría a la discriminación entre sitios con diferente potencial de aportes nitrogenados y mejoraría el ajuste en el diagnóstico de necesidades de fertilización.

En esta presentación discutiremos sobre avances regionales en el manejo de la fertilización con N atendiendo a sus aportes sobre los rendimientos y la concentración de proteína de los granos a partir de los resultados de varios estudios desarrollados en sitios representativos de la región de la pampa arenosa durante la campaña 2016.

En un estudio comparativo de genotipos de calidad panadera 1 y 2 con rendimientos de entre 4522 y 6695 kg/ha se validó que, al incrementarse el aporte de N al fertilizar, independientemente del tipo de variedad, aumentaron tanto los rendimientos como la concentración proteica de los granos (**Figura 1**). Los máximos rendimientos alcanzados por los genotipos de alta calidad panadera (5109 kg/ha) requirieron de mayores dosis de N (162 kg/ha) que en el caso de las variedades de calidad 2 que para lograr su máxima producción (6776 kg/ha) fueron fertilizados con 138 kg/ha de N. Los contenidos medios de N-NO₃ en la capa de 0 a 40 cm de profundidad de los suelos determinados en el momento de la siembra de los cultivos (junio 2016) variaron entre 16 y 26 kg/ha. Por lo tanto, en las condiciones de estos estudios, los niveles de N disponible (N_{suelo} + N_{fertilizante}) para alcanzar estos rendimientos variaron entre aproximadamente 180 kg/ha para el cultivo de variedades de alta calidad panadera y 160 kg/ha en genotipos de calidad panadera inferior. Estos niveles de N disponible superan los valores

frecuentes empleados en la región de la pampa arenosa y, en el caso de los materiales de calidad 2, se explican por la mayor producción lograda en la campaña 2016.

En el caso de la concentración de proteínas de los granos, las relaciones entre dosis de fertilización y las respuestas según genotipos se invirtieron. Los materiales de mayor calidad panadera mostraron sus máximos valores (10,1 %) con la aplicación de 129 kg/ha de N y las variedades del grupo de calidad 2 requirieron la aplicación de 138 kg/ha de N para obtener su máximo contenido proteico (9,5 %).

El momento de aplicar la corrección nitrogenada entre la siembra y el inicio del estadio de ma-

collaje (Z30), en las condiciones meteorológicas de la campaña 2016 en la región de la pampa arenosa, no habría sido un factor relevante para la formación del rendimiento en variedades de calidad 2 (**Figura 2**). En cambio, al retrasar la aplicación del fertilizante, los genotipos de alta calidad redujeron sus rendimientos, aunque se incrementó la concentración proteica de sus granos.

También se evaluó el aporte de la aplicación reiterada de N en dosis de 20 kg/ha a partir de Z30 sobre la producción de trigo y la concentración proteica de sus granos. Se observó que al aplicar 120 kg/ha de N, los rendimientos y el contenido de proteínas, independientemente

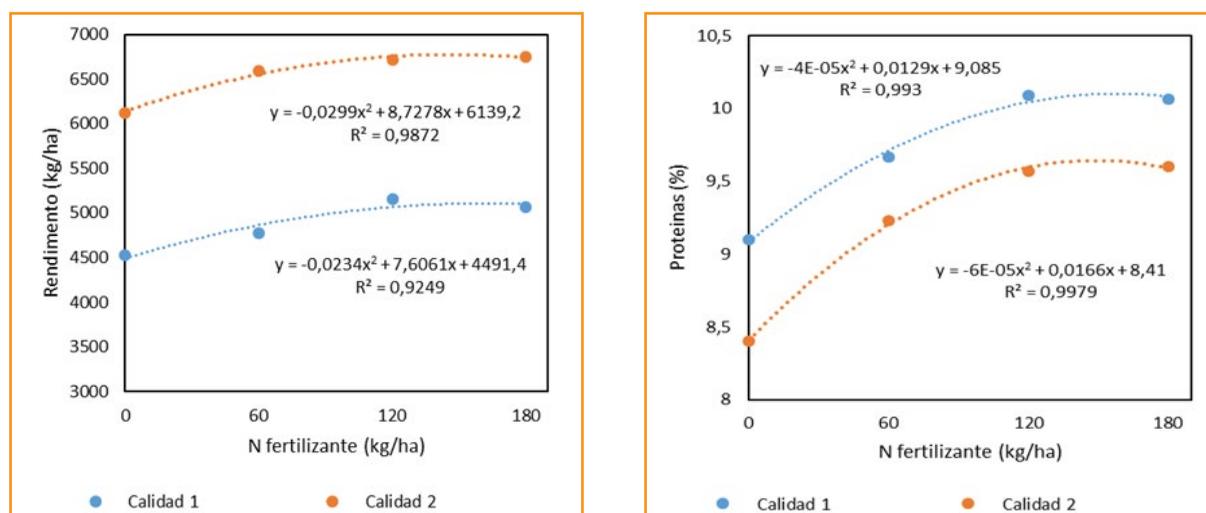


Figura 1. Rendimiento de trigo y concentración según calidad panadera de variedades y niveles de fertilización con N en 3 sitios de producción de la región de la pampa arenosa.

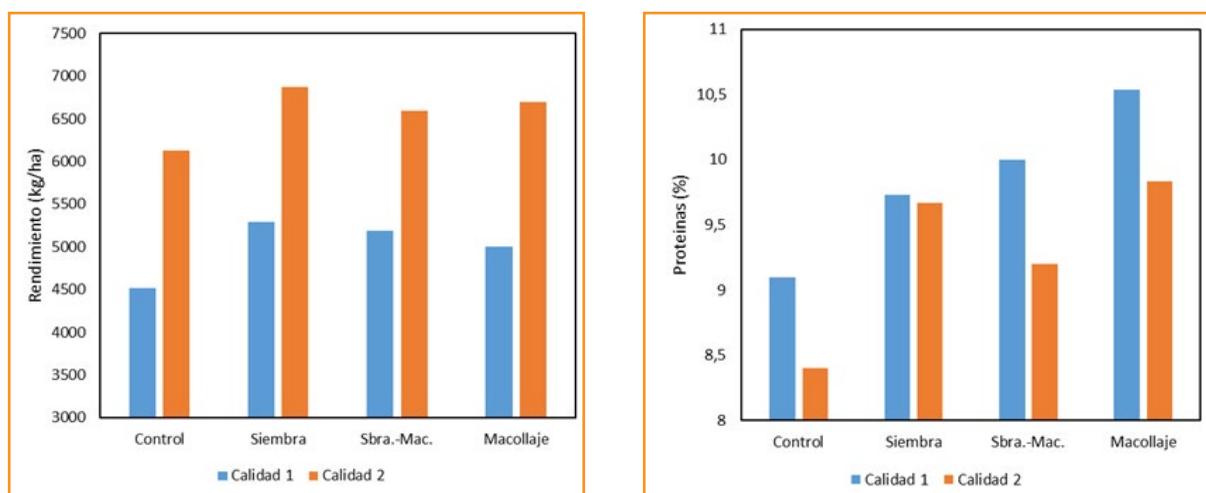


Figura 2. Rendimiento de trigo y concentración proteína según calidad panadera de variedades y momento de fertilización con 120 kg/ha de N en 3 sitios de producción de la región de la pampa arenosa.

del tipo de variedad, fueron mayores que en ausencia de fertilización o al aplicarse solo 60 kg/ha de N (**Figura 3**). En los materiales de alta calidad panadera la concentración de proteínas se incrementó al fraccionar la dosis de 120 kg/ha de N y aplicar el nutriente con posterioridad al inicio del macollaje.

En la campaña estudiada y combinando los resultados de 30 sitios de producción y de evaluación con pares de variedades según calidad panadera, se observó que la brecha productiva entre genotipos de alta calidad y de calidad 2 se incrementó al aumentar los rendimientos máximos del sitio a partir de los 5500 kg/ha (**Figura 4**). El cambio en los rendimientos bonificados según la concentración proteica de los granos fue en todos los casos insuficiente para atenuar esta brecha y en las condiciones productivas de la campaña analizada aún en los casos con menores aportes de N la concentración de los granos fue suficiente para su comercialización superando 8.2 %.

Comentarios finales

En condiciones de alta productividad en la región de la pampa arenosa, la fertilización nitrogenada incrementa la producción y concentración de proteínas de granos de trigo diferencialmente según el grupo de calidad panadera de los genotipos. En materiales de alta calidad se requieren

mayores aportes de N para maximizar los rendimientos y es conveniente fraccionar la fertilización durante el ciclo del cultivo para incrementar la concentración de proteínas en los granos. Los genotipos del grupo de calidad panadera 2 incrementan su brecha productiva con respecto a los de alta calidad principalmente a partir de condiciones de producción superiores a 5500 kg/ha y alcanzan máximos rendimientos con la aplicación de menores dosis de fertilización nitrogenada. Sin embargo, requieren de la aplicación de dosis superiores de N para lograr maximizar los contenidos proteicos de los granos. ●

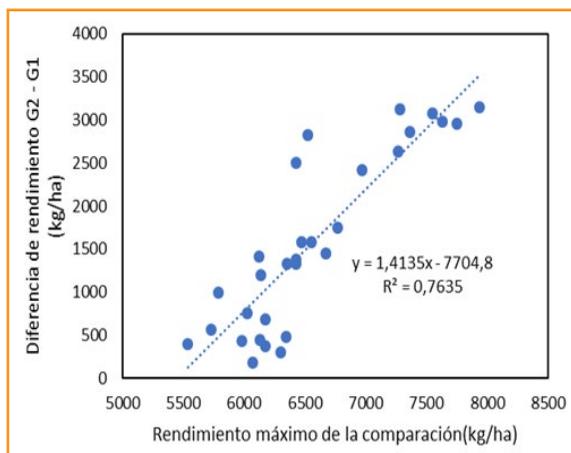


Figura 4. Brecha de rendimientos entre genotipos de calidad panadera 1 y 2 según rendimientos máximos de pares de comparaciones en 30 sitios experimentales de la región de la pampa arenosa.

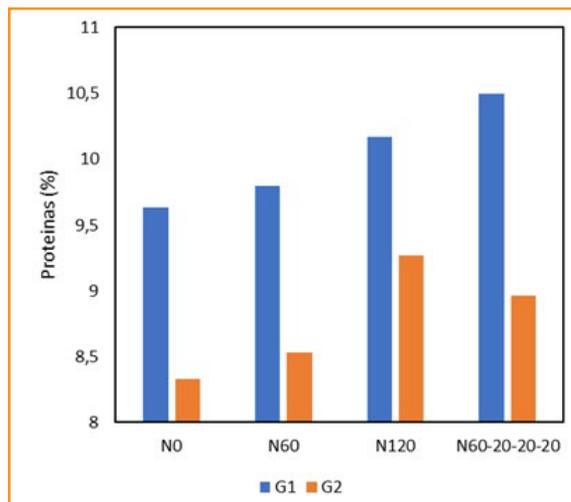
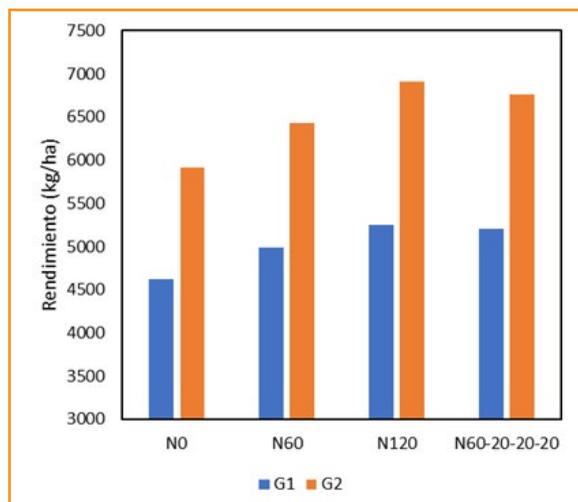


Figura 3. Rendimiento de trigo y concentración de proteínas según calidad panadera de variedades y momento de fertilización nitrogenada en 3 sitios de producción de la región de la pampa arenosa. N60 = 60 kg/ha de N en la siembra, N120 = 120 kg/ha de N en la siembra, N60-20-20-20 = 120 kg/ha de N aplicados 60 kg/ha en la siembra y 20 kg/ha cada 15 días desde Z30.

El Cultivo de Trigo y Cebada en el Norte de Buenos Aires

Matías Ermacora*

Coordinador de Agricultura Zona CREA Norte de Buenos Aires

*Contacto: matiasermacora@hotmail.com

En los últimos años, los sistemas agrícolas en secano de la zona de Buenos Aires (NBA), sufrieron cambios significativos en la asignación de cultivos, en ajustes en los sistemas de producción y en los resultados de las distintas secuencias de cultivos. Se destacaron el incremento del monocultivo de soja en detrimento de gramíneas de invierno (**Figura 1**) y sobre el cultivo de maíz, el que contó con el aporte de los planteos de maíces tardíos y de segunda sobre leguminosas de invierno limitando su retroceso en superficie. Por otro lado, la zona cambió la utilización de cultivos de cobertura por cultivos de cosecha de grano. Allí aparecieron alternativas invernales como cebada, arveja verde / amarilla y colza (en menor medida y de manera puntual, garbanzo y lenteja), con el objetivo de aumentar el aprovechamiento de recursos, incrementar la producción, mejorar el aporte de rastrojos y generar alternativas de negocios al trigo que transitó un período con complicaciones comerciales.

La mayor variabilidad del resultado de los cultivos no tradicionales (rendimiento y precio) determinó que, el cultivo de trigo se presente como el componente clave en la intensificación de la rotación en la zona NBA. Cebada y arveja hicieron sus aportes a la intensificación de la rotación, pero de manera más zonificada. Por ello, el cultivo de trigo formó parte en los esquemas de rotación de nuestros sistemas de producción, aunque el margen bruto del cultivo se encon-

traba en desventaja coyuntural. No debe ser el margen bruto proyectado el único indicador que define incorporar o no a la gramínea de invierno. Dentro del Grupo CREA NBA nunca se dejó de hacer trigo, sino que, se ajustaron las superficies agrícolas por adversidades climáticas (inundación y sequía) o por inconvenientes comerciales y descontento general (**Figura 1**). Hemos dedicado tiempo y esfuerzo en evaluar el impacto de la incorporación de cultivos de invierno sobre otros indicadores tan relevantes como el resultado económico presupuestado para una determinada campaña. Eficiencias en el uso de recursos (agua, radiación, nutrientes), aportes de rastrojos, cambios en parámetros físicos y químicos y sobre la comunidad de malezas, así como rendimiento y el resultado económico global de las secuencias han sido evaluados y lo siguen siendo. En todos los casos hemos visto aportes significativos por la incorporación de cultivos de invierno como es el caso del trigo.

Trigo, apuntando a rendimiento y calidad

Entendiendo que es relevante la incorporación del trigo en la rotación, la segunda pregunta y muy pertinente en estas últimas campañas es, que tipo de trigo hacer y que margen de maniobra tenemos desde lo técnico. En la zona, prácticamente no se hacen trigos pertenecientes al grupo de calidad 3 donde peso hectolitrico

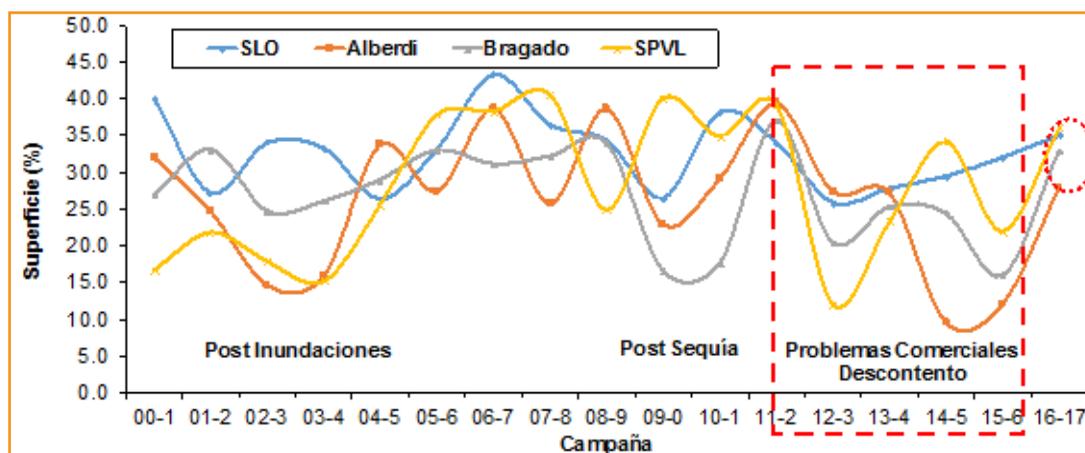


Figura 1. Evolución de la superficie de trigo en cuatro grupos CREA de la Zona Norte de Buenos Aires.

(PH) y proteína son un doble riesgo importante en nuestra región para estas variedades. Además, a escala experimental, no nos han aportado un salto de rendimiento respecto a variedades pertenecientes al grupo de calidad 2. Este grupo 2, es el más sembrado en la zona, con marcada variabilidad entre variedades del mismo grupo respecto a PH, proteína, gluten y rendimiento. Existen variedades más equilibradas y otras de mayor rendimiento, pero inestables en los parámetros de calidad comercial. Particularmente en estas variedades se presenta el mayor desafío de poder manejar rendimiento y calidad. Respecto a los trigos de calidad, en los últimos años con mercado de trigo intervenido, precios, bonificaciones y castigos variables, la elección de la genética no sólo pasó por rendimiento; trigos de calidad superior fueron incorporados de manera significativa a los sistemas de producción buscando diversificar y estabilizar el negocio. En tres variedades se concentró casi el 70% de lo sembrado, una de ellas de calidad 1, situación nunca antes explorada.

Tenemos una base de datos de varias campañas manteniendo un grupo de variedades constante. Esto nos permite analizar la interacción Genotipo*Ambiente y ver las diferencias de rendimiento entre variedades de distinto grupo

de calidad en función del ambiente productivo explorado. La idea de que las variedades pertenecientes al grupo de calidad 1 determinan mejores negocios relativo a genética de alto potencial en ambientes de baja y media productividad resulta contradictorio con la información generada en la zona. En este tipo de ambientes, el diferencial de rendimiento es mayor (22%) que el diferencial de rendimiento explorado en ambientes de alta productividad (16%) (Figura 2).

Nitrógeno como herramienta para manejar rendimiento y calidad

Triguero, surgido del convenio entre AACREA y Profertil y convalidado con experimentación a campo donde la zona lideró dicho desarrollo, es la herramienta utilizada para la determinación del óptimo económico del planteo de trigo según serie de suelo, variedad y recarga del perfil. Dicha herramienta nos ha permitido ser extremadamente eficientes en el uso de nitrógeno (N) para definir rendimiento, pero no para calidad comercial utilizando variedades de alto potencial de rendimiento. Estamos experimentando dos modelos de N que involucran cantidad y fraccionamiento en variedades de trigo de distinta calidad. La calidad final está fuertemente

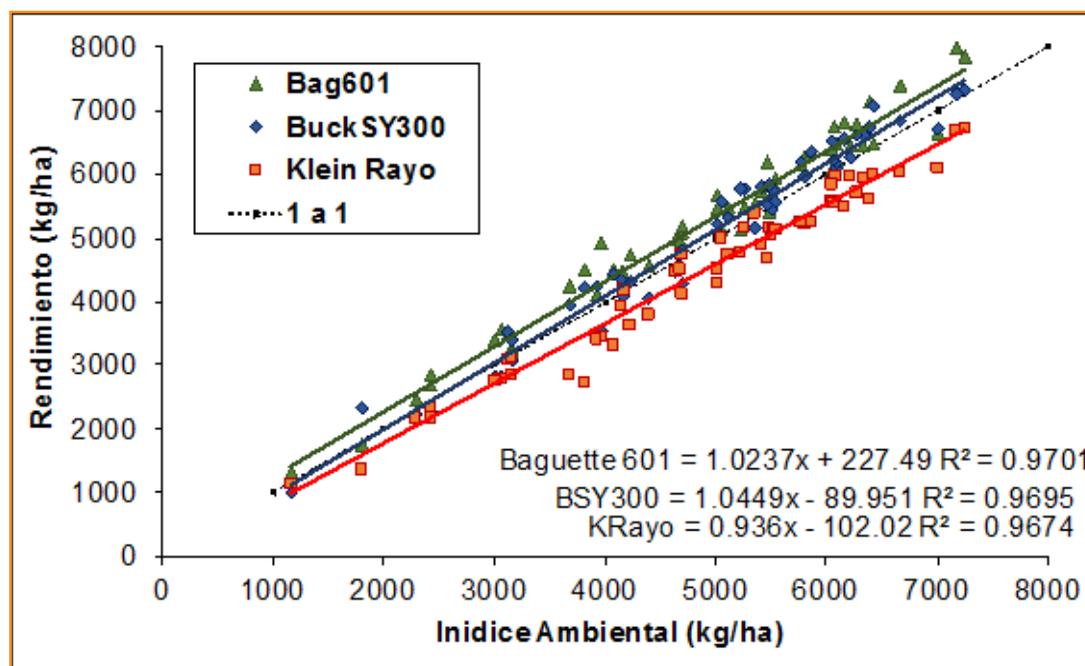


Figura 2. Relación entre el rendimiento de la variedad y la productividad del ambiente como promedio de todas las variedades evaluadas. Datos de las últimas cuatro campañas CREA Norte de Buenos Aires más datos ensayos Crea Sur Santa Fe, Sudeste y Grupo La Reja (Oeste).

influenciada por el ambiente (sitio y campaña) y por la genética. La variable nutrición nitrogenada sólo explicó un 9% la variabilidad de proteína y gluten (genética entre un 40% y 50% y ambiente entre un 33% y 45%). Esto no indica que no se puede trabajar la calidad desde la fertilización nitrogenada, sino que define la importancia relativa de las variables. De hecho, incrementar la oferta total del modelo tradicional de 140-150 N total a 200 N total y fraccionado, aumentó el rendimiento en 400 kg/ha y la calidad en 0.6 y 2.5 puntos de proteína y gluten, respectivamente, sin cambios en el PH, como promedio de variedades evaluados. No se registró interacción significativa entre modelo de N y genética, pero existió una tendencia: las variedades del grupo de calidad 1 respondieron más en los parámetros de calidad y las variedades de alto potencial de rendimiento respondieron más en rendimiento.

Nuestro testigo en calidad 1, Klein Rayo, presentó un 80% de casos con valores de proteína superiores a 11%, independientemente del rendimiento explorado y el modelo de N ofertado. En nuestras variedades testigo en productividad, Baguette 601 y DM Algarrobo, 2 de cada 3 casos quedaron por debajo de 11% proteína cuando la oferta de N fue menor a 30 kg N/t de rendimiento.

Valores por sobre 35 kg N/t trigo minimizaron este riesgo (**Figura 3**).

Manejo de cebada en Norte de Buenos Aires para rendimiento y calidad

El aumento en la frecuencia de golpes de calor durante el llenado y la tendencia en el adelanto de la última helada en 10-15 días, son señales del ambiente que han sido tenidas en cuenta para realizar ajustes en el planteo de cebada. A esto se le sumó el reemplazo masivo de la genética tradicional (Scarlett y Shakira) por variedades de mayor potencial de rendimiento con ciclos más largos y duraciones de llenado más extensas. La mayor parte del salto de rendimiento de la nueva genética, está explicado por los incrementos en el peso de granos y la mejora en la estabilidad del calibre está asociada con este aspecto. Perfil sanitario y características agronómicas (ej. quiebre y vuelco) también fueron incorporadas con la nueva genética. El adelanto de la fecha de siembra para otorgar mejores condiciones durante el llenado y además no retrasar la siembra del cultivo de segunda es una de las decisiones de manejo que estamos evaluando y poniendo en práctica. Los resultados promisorios en rendi-

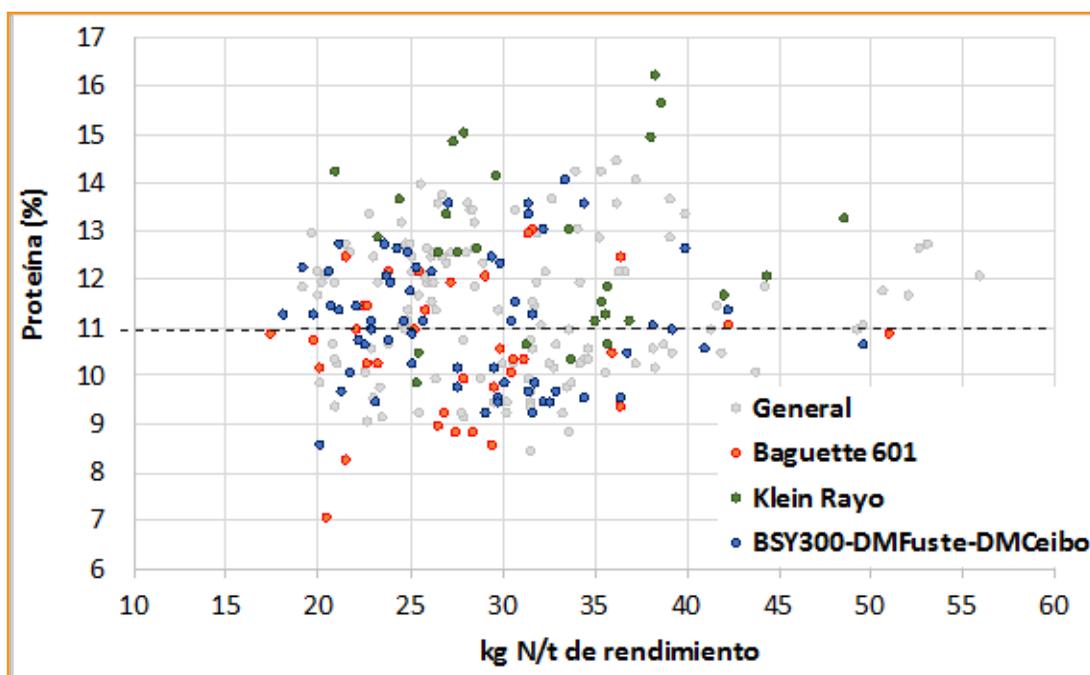


Figura 3. Relación entre el contenido de proteína en grano y el cociente del modelo de nitrógeno total ofertado (N suelo 0-60 cm + N fertilizante) y el rendimiento logrado en toneladas. Se resaltan en color las variedades de distinto grupo de calidad. Datos de las últimas 4 campañas.

miento (interacción con sitio y campaña) y calibre, consecuencia del adelantamiento de 20 días de la fecha tradicional, tuvieron su contrapartida en el contenido de proteína en grano que cayeron por debajo del límite mínimo aceptado (**Tabla 1**). La nueva genética de alto peso de grano y las excelentes condiciones para el llenado de grano,

diluyeron el contenido de proteína en grano. El salto de modelo de N tradicional de 140 kg N a 200 kg N fraccionado, incrementó levemente el rendimiento, pero aumentó la proteína en dos puntos porcentuales como promedio de fechas de siembra (**Tabla 2**), siendo más marcado en el planteo de fecha temprana. ●

Tabla 1. Rendimiento, componentes y parámetros de calidad comercial de cebada, diferenciado entre planteos de fecha de siembra por localidad.

Local*Fecha Siembra	Rendimiento (kg/ha)	Granos/m ²	P1000 (g)	Espigas/m ²	Granos/esp	Plantas/m ²	Espigas/Pl	Proteína (%)	Calibre >2.5
Pergamino - 2° FS	7243 a	15498	46.7	825	18.8	220	3.76	12	92.2
Pergamino - 1° FS	7008 b	14504	48.3	859	16.9	208	4.13	10.9	94.6
San Pedro 1° - FS	5625 c	12488	45.1	647	19.3	209	3.10	10.7	89.2
San Pedro - 2° FS	5426 d	12397	43.8	617	20.1	214	2.90	11.9	87.3
<i>Probabilidad</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.02</i>	<i>0.00</i>	<i>0.01</i>	<i>0.94</i>	<i>0.77</i>
<i>DMS 5%</i>	<i>110</i>	<i>326</i>	<i>0.5</i>	<i>16</i>	<i>0.6</i>	<i>3</i>	<i>0.10</i>	<i>1.8</i>	<i>2.5</i>

Tabla 2. Rendimiento, componentes y parámetros calidad comercial de cebada, diferenciado entre planteos de nitrógeno como promedio de sitios y fechas de siembra.

Modelo Ns+f	Rendimiento (kg/ha)	Granos/m ²	P1000 (g)	Espigas/m ²	Granos/esp	Espigas/Pl	Proteína (%)	Calibre >2.5
200	6385	13816	46.1	744	18.6	3.5	12.2	89.8
140	6267	13627	45.9	730	18.7	3.4	10.6	91.8
<i>Probabilidad</i>	<i>0.00</i>	<i>0.10</i>	<i>0.22</i>	<i>0.02</i>	<i>0.56</i>	<i>0.03</i>	<i>0.02</i>	<i>0.03</i>
<i>DMS 5%</i>	<i>78</i>	<i>230</i>	<i>0.4</i>	<i>11</i>	<i>0.4</i>	<i>0.05</i>	<i>1.3</i>	<i>1.8</i>

Pautas de manejo de la fertilización de trigo y cebada

Martín Zamora¹ y Guillermo Pugliese²

¹Chacra Exp Integrada Barrow (INTA-MAIBA) - ²Bunge Argentina SA

Contacto: zamora.martin@inta.gob.ar

El mejoramiento genético de las especies ha mostrado enormes avances en los últimos años. Los nuevos materiales de cereales y oleaginosas de alta productividad requieren de un uso intensivo de los insumos para que logren expresar su potencial. Por lo tanto, las tecnologías de manejo que incrementen la eficiencia en el uso de insumos son básicas, donde debe optimizarse el manejo del agua y nutrientes, junto a otras prácticas manejo, tales como rotaciones, fecha de siembra, control de plagas, malezas y enfermedades, entre otros.

El contenido de proteína y gluten en los granos son tomados por el mercado de trigo como una importante variable de calidad, otorgándose bonificaciones o descuentos de acuerdo a su nivel. En cebada se consideran la proteína y el calibre. Entre los múltiples aspectos del manejo, la fertilización nitrogenada es la que mayor influencia tiene sobre la calidad en general y el porcentaje de proteína en particular.

El manejo de la nutrición comienza con la realización de un correcto diagnóstico, utilizando toda la información que pueda estar disponible (historia agrícola, antecesores, fertilizaciones previas, análisis de suelo y planta, mapas de rendimiento, mapas de suelo, mapas de NDVI, etc.). El diagnóstico permite detectar qué nutrientes pueden aparecer como posibles limitantes a la producción de acuerdo a las restricciones ambientales que posee cada lote y/o zona.

Otro de los aspectos a tener en cuenta para el manejo adecuado de la fertilización es el conocimiento sobre las necesidades nutritivas del cultivo, en base a los requerimientos de los principales nutrientes y al rendimiento objetivo posible de ser alcanzado de acuerdo al grado de restricciones edafo-climáticas del ambiente.

La pérdida de los niveles de fósforo (P) en la región pampeana centro-sur ha sido progresiva, acentuándose en los últimos años debido a la intensificación agrícola. Los valores actuales de P extractable (Bray) en los suelos se ubican en 10-11 mg/kg. Estos niveles de P en el suelo no son suficientes para alcanzar altos rendimientos, por lo que la fertilización con este elemento es una práctica habitual entre los productores. Evaluaciones recientes han demostra-

do que las aplicaciones de fosfato diamónico en la línea de siembra fueron más eficientes que aquellas aplicadas al voleo para los cultivos de trigo y maíz. En secuencias trigo, cebada o colza seguidos de soja de segunda, se han observado efectos residuales de P y de azufre (S) aplicados en el primer cultivo sobre la soja de segunda, por lo tanto, es importante considerar este efecto.

El nitrógeno (N) es el nutriente más comúnmente deficiente para la producción en la región pampeana. El balance de N se ha convertido en el método de diagnóstico más utilizado. Se basa en la evaluación de las formas de N en el suelo disponibles para el cultivo y los requerimientos del cultivo de acuerdo al rendimiento esperado (demanda de N). Para el caso de cebada y trigo se han utilizado modelos de 120-x, 160-x y 200-x (donde x es el contenido de nitratos a la siembra). A través de numerosos ensayos se han evidenciado las respuestas de ambos cultivos a la fertilización con N y el efecto combinado con S y otros nutrientes. Es frecuente, para planteos de alta producción y para contratos de trigo y/o cebada de calidad, la utilización de fertilizaciones foliares tardías con N (entre hoja bandera y antesis). Estas fertilizaciones se diagnostican a través de la utilización del medidor de clorofila (SPAD) y franjas testigo sin deficiencias.

Las fuentes azufradas están teniendo una creciente difusión en cultivos en la región pampeana sur. Esta práctica se emplea para cubrir deficiencias de S en suelos con carencias potenciales, fundamentalmente en suelos arenosos y con moderados contenidos de materia orgánica o para balancear fertilizaciones de cultivos de alta producción. Es difícil, en la práctica, realizar recomendaciones de fertilización análogas al N, principalmente debido a la falta de correlación entre los niveles de sulfatos en el suelo y el rendimiento del cultivo. Los niveles actuales de $S-SO_4$ en los suelos del área varían entre 5 y 10 mg/kg. En la región sur se han encontrado respuestas significativas al agregado de 15 kg/ha de S en cultivos de cebada, trigo, maíz, soja y colza. Debido a que las fuentes de S son de bajo costo, la aplicación de este nutriente en fertilizantes se está generalizando.

Para obtener cultivos de alta producción es necesario, además de N, P y S, adicionar al cultivo algunos micronutrientes como por ejemplo zinc (Zn) y boro (B). Estos nutrientes han sido identificados en los últimos años como deficientes en la región pampeana. En la región pampeana sur se han llevado adelante ensayos para evaluar respuesta de diferentes cultivos a la aplicación de estos nutrientes.

Una vez que se ha realizado el diagnóstico correcto (conocer la necesidad de fertilización, que nutrientes aplicar y en qué dosis), es necesario definir el tipo de fertilizante a usar, la forma de aplicación y el momento.

Diagnóstico de la fertilización nitrogenada para el mejoramiento de la calidad

La fertilización nitrogenada para el mejoramiento de la proteína, como cualquier otra práctica de fertilización, requiere de un método de diagnóstico. Este método debe permitir identificar, con la suficiente anticipación, las situaciones donde el nivel de deficiencia de N implique la probabilidad de obtener un trigo o cebada con bajo contenido de proteína.

El porcentaje de N total en hoja bandera cercano al momento de espigazón está altamente correlacionado con la proteína y, por lo tanto, podría utilizarse como una variable para diagnosticar la deficiencia de N y, consecuentemente, la baja proteína. Un indicador alternativo al N total es el índice de verdor, lectura que se obtiene con un clorofilómetro SPAD (**Figura 1**). Esta determinación se puede realizar en forma rápida y económica a campo. En investigaciones recientes realizadas en Argentina y Estados Unidos se determinó que para trigo existe una alta correlación entre el índice de verdor y el porcentaje de N total en hoja.

Tecnología de la fertilización para el incremento de la proteína

Una de las estrategias para incrementar la proteína es aumentar la dosis de N en aplicaciones tempranas (siembra-macollaje). Si bien en el promedio de todos los sitios y años, el aumento de la dosis parece una estrategia adecuada para mejorar la calidad, las aplicaciones tempranas de N producen cambios en los rendimientos y el contenido de proteína en una magnitud variable y dependiente de las condiciones climáticas de cada año y la capacidad de aportar N de los suelos. En años con

adecuada disponibilidad hídrica durante todo el ciclo de producción, las aplicaciones tempranas de N incrementan los rendimientos, sin aumentos significativos en el contenido de proteínas.



Figura 1. Clorofilómetro SPAD

El contenido de proteína en grano puede ser incrementado a través de fertilizaciones con N en etapas avanzadas del cultivo. La fertilización foliar es la opción más eficiente. Entre las fuentes nitrogenadas disponibles para su aplicación como fertilización foliar, la urea en solución permite aplicar hasta 30 kg/ha de N sin problemas de quemado de las hojas. Otra ventaja de esta tecnología es que en forma simultánea se pueden adicionar funguicidas e insecticidas. Por otro lado, las fuentes sólidas implican mayor riesgo debido a la dependencia de precipitaciones posteriores que permitan el ingreso del N al suelo y su absorción por las raíces.

Resultados de experiencias regionales

Se presentan a continuación una serie de experiencias realizadas en el centro-sur bonaerense (**Tablas 1 a 8**). El objetivo es demostrar la respuesta en rendimiento y calidad de los cultivos de trigo y cebada en ensayos realizados en campo de productores para una campaña húmeda (2015/16) y una seca (2016/17).

En estos ensayos se evaluaron diferentes dosis de N utilizando 2 fuentes (urea y UAN) y luego combinaciones de N con S (N+S), N+S+Zn y N+S+Zn+N complementario. Todas las aplicaciones de base se realizaron al inicio de macollaje y el N complementario en forma foliar en hoja bandera expandida. ●

Tabla 1. Rendimiento del trigo según ajuste de N y combinaciones con S, Zn y N complementario, año húmedo (2015/16). Promedio 2 ensayos.

Dosis de N	Urea	UAN	N+S	N+S+Zn	N+S+Zn+Nc
Testigo	4625	4625	4625	4625	4625
Ajuste 120 N	5391	5751	5923	6090	6200
Ajuste 160 N	6362	6608	6799	6893	6966
Ajuste 200 N	6692	6986	7120	7279	7331
p	<0.0001		DMS	400.7	

Tabla 2. Proteína en grano de trigo según ajuste de N y combinaciones con S, Zn y N complementario, año húmedo (2015/16). Promedio 2 ensayos.

Dosis de N	Urea	UAN	N+S	N+S+Zn	N+S+Zn+Nc
Testigo	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
Ajuste 120 N	8.2	8.3	8.3	8.4	9.2
Ajuste 160 N	8.7	8.7	8.6	8.9	9.9
Ajuste 200 N	9.8	9.9	9.8	9.9	10.5
p	<0.0001		DMS	0.505	

Tabla 3. Rendimiento de cebada según ajuste de N y combinaciones con S, Zn y N complementario, año húmedo (2015/16). Promedio 2 ensayos.

Dosis de N	Urea	UAN	N+S	N+S+Zn	N+S+Zn+Nc
Testigo	4668	4668	4668	4668	4668
Ajuste 120 N	5650	5887	5983	6047	6149
Ajuste 160 N	6123	6290	6442	6618	6721
Ajuste 200 N	6416	6649	6754	6915	6974
p	<0.0001		DMS	274.1	

Tabla 4. Proteína en grano de cebada según ajuste de N y combinaciones con S, Zn y N complementario, año húmedo (2015/16). Promedio 2 ensayos.

Dosis de N	Urea	UAN	N+S	N+S+Zn	N+S+Zn+Nc
Testigo	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2
Ajuste 120 N	8.5	8.7	8.8	8.7	9.3
Ajuste 160 N	9.1	9.3	9.4	9.4	10.1
Ajuste 200 N	9.4	10.2	10.4	10.2	10.8
p	<0.0001		DMS	0.572	

Tabla 5. Rendimiento de trigo según dosis de N y combinaciones con S, Zn y N complementario, año seco (2016/17). Promedio 2 ensayos.

Dosis de N	Urea	UAN	N+S	N+S+Zn	N+S+Zn+Nc
Testigo	4338	4338	4338	4338	4338
50N	5069	5315	5407	5456	5437
100N	5442	5483	5679	5731	5772
150N	5575	5650	5693	5776	5819
200N	5699	5781	5800	5865	5889
p	<0.0001		DMS	403.4	

Tabla 6. Proteína en grano de trigo según dosis de N y combinaciones con S, Zn y N complementario, año seco (2016/17). Promedio 2 ensayos.

Dosis de N	Urea	UAN	N+S	N+S+Zn	N+S+Zn+Nc
Testigo	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
50N	9.3	9.3	9.3	9.4	10.2
100N	10.4	10.6	10.6	10.7	11.3
150N	11.4	11.4	11.5	11.6	12.3
200N	12.2	12.2	12.3	12.4	13.0
p	<0.0001		DMS	0.565	

Tabla 7. Rendimiento de cebada según dosis de N y combinaciones con S, Zn y N complementario, año seco (2016/17). Promedio 2 ensayos.

Dosis de N	Urea	UAN	N+S	N+S+Zn	N+S+Zn+Nc
Testigo	3882	3882	3882	3882	3882
50N	4951	5241	5572	5736	5747
100N	5890	6110	6180	6326	6329
150N	6244	6557	6552	6726	6691
200N	6283	6533	6521	6583	6533
p	<0.0001		DMS	577.9	

Tabla 8. Proteína en grano de cebada según dosis de N y combinaciones con S, Zn y N complementario, año seco (2016/17). Promedio 2 ensayos.

Dosis de N	Urea	UAN	N+S	N+S+Zn	N+S+Zn+Nc
Testigo	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
50N	8.5	8.8	8.8	8.8	9.5
100N	9.7	9.8	9.7	9.8	10.6
150N	10.3	10.4	10.5	10.5	11.1
200N	11.5	11.6	11.7	11.7	12.4
p	<0.0001		DMS	0.606	

¿Por qué no fertilizamos cómo debemos? De la teoría a la práctica, de la ciencia al lote

Federico Bert*

Líder Investigación y Desarrollo de AACREA

*Contacto: fbert@agro.uba.ar

Introducción

Actualmente, la fertilización es un factor clave para maximizar la producción y el resultado económico en la producción agropecuaria argentina. Existen numerosas evidencias que muestran el incremento en rendimiento de los principales cultivos (soja, maíz y trigo) en respuesta a la fertilización, principalmente con nitrógeno (N) o fósforo (P) (e.g., Correndo et al., 2015). A su vez, se han desarrollado una variedad de criterios de fertilización para evitar limitaciones productivas por déficits nutricionales y, eventualmente, para reponer parte de la extracción que hacen los cultivos. Existen evidencias también de la respuesta y se han desarrollado criterios para la fertilización en la producción de forrajes.

Aunque sobren evidencias agronómicas, y en muchos casos económico-empresariales, sobre la necesidad de fertilizar para maximizar la producción y el resultado económico, hoy es frecuente encontrar lotes de producción con dosis de fertilización sub-óptimas o que, incluso, no se fertilizan. Algunos datos muestran que no se fertiliza 40% de los lotes y que las dosis promedio de fertilizante en trigo y maíz son de 194 y 209 kg/ha respectivamente (Fertilizar-CIAFA, 2013-15), implicando aportes de N inferiores a los requeridos para los niveles de rendimiento actuales. Diversos trabajos muestran relaciones de aplicación/extracción de P y N a nivel nacional de entre 0.3 y 0.7. A su vez, gran parte de las zonas productivas de Argentina muestran niveles decrecientes de nutrientes en el suelo (Sainz Rosas et al., 2011, 2012; García y Díaz Zorita, 2015).

La pregunta es entonces ¿por qué no fertilizamos como debemos siendo que la evidencia muestra que en la mayoría de los casos el retorno a la inversión es positivo? En este resumen propongo algunas ideas para contestar esta pregunta, con la intención de que puedan utilizarse como base para diseñar acciones tendientes a cambiar esta realidad.

Factores que pueden explicar el bajo uso de fertilizantes

Antes de ensayar cualquier hipótesis, considero conveniente revisar lo que ocurrió en el pasado. En los últimos 25 años, la producción agrícola argentina aumentó significativamente: desde 1990 a 2015 la producción de los principales cultivos se multiplicó aproximadamente por 3.1. Este aumento fue en parte por la expansión del área agrícola, que en el mismo período se multiplicó por aproximadamente 2.1, pero también por aumento de rendimientos (e.g., más de 30% en soja y de 50% en maíz) (<https://datos.magyp.gob.ar/>). En simultáneo a estos cambios productivos, el consumo de fertilizantes se multiplicó más de 10 veces (de 300 mil a más de 3 millones de toneladas). Estos datos simples muestran indirectamente la incorporación de los fertilizantes a los modelos agrícolas de Argentina, reflejado en una mayor frecuencia de lotes fertilizados y/o dosis de fertilización.

Aunque haya habido progresos notables en los últimos años, el consumo de fertilizantes de Argentina se estancó recientemente y, como se mencionó, se ubica en niveles menores a los deseables desde el punto de vista de reposición de nutrientes. Son varios los factores que influyen la decisión de fertilización del productor y que, por lo tanto, podrían explicar este comportamiento. Algunos de esos factores son estructurales y se asocian a las condiciones agro-ecológicas y/o socio-económicas de la agricultura Argentina. El aspecto común de estos factores es que generan incertidumbre respecto al retorno a la inversión en fertilizantes, desmotivando su uso. Dos de los principales factores, desde mi perspectiva, son: (a) *la variabilidad climática a la que está expuesta la agricultura argentina*, y (b) *el régimen de tenencia de la tierra*.

La *alta variabilidad climática* en todas las regiones productivas de Argentina genera gran variabilidad, en el tiempo, en los rendimientos y, por lo tanto, incertidumbre en los ingresos

económicos de los que depende el retorno a la inversión. A su vez, la respuesta agronómica a la fertilización puede disminuir ante situaciones de baja productividad. Así, la posibilidad de experimentar escenarios climáticos desfavorables que lleven a ingresos bajos y atenúen las respuestas agronómicas, condiciona la decisión de productores que, por naturaleza, son aversos al riesgo. La volatilidad de los precios de los granos afecta en el mismo sentido. La teoría de las perspectivas - que plantea que una pérdida causa mucho más "insatisfacción" (en promedio 2 veces) que la satisfacción que causa una ganancia de igual magnitud - da un marco para analizar la precaución en el uso de fertilizantes.

El *régimen de tenencia* es otro factor estructural que contribuye a explicar decisiones individuales de consumo de fertilizante. Actualmente, más del 60% del área agrícola argentina es operado por arrendatarios. A su vez, la mayor parte de los contratos de alquiler son por un año. Arora et al. (2016) mostraron que los productores que trabajan campos propios ponen más foco en objetivos de largo plazo y en la conservación del valor, mientras que los arrendatarios tienden a enfocarse en maximizar el resultado de la campaña. De esta manera, el régimen de tenencia favorece un uso de fertilizantes enfocado sólo en maximizar la productividad, sin la valorización de los "efectos residuales" dada la incertidumbre respecto a si el año siguiente se operará la misma parcela (aunque más allá de los contratos anuales, es muy frecuente que el mismo arrendatario opere varios años la misma parcela)¹. El dilema de los comunes (dentro del marco de teoría de juegos) también ofrece un marco para analizar este comportamiento.

Además de los factores estructurales analizados antes, existen *factores coyunturales* que moldean las decisiones de fertilización de los productores. En este sentido, tres factores clave que se relacionan entre sí son: (a) las expectativas de resultado económico de la actividad, (b) la situación financiera del productor, y (c) la relación insumo/producto (i.e., kilos de grano necesarios para comprar un kilo de fertilizante). En campañas con mayores probabilidades de buenos resultados económicos (por perspectivas

de buen precio o clima) - y si financieramente tiene la posibilidad - el productor tiende a incrementar la inversión en fertilizantes. Similarmente, las campañas con relación insumo/producto favorable mejora el consumo. Un ejemplo concreto del efecto de los factores mencionados es la campaña 2016/17, en donde aumentó 50% el consumo en respuesta a medidas políticas que generaron certidumbre y mejoraron la situación económico-financiera del productor².

Finalmente, además de todos los factores listados arriba, considero también que los niveles de consumo relativamente bajos responden a un desconocimiento o falta de concientización respecto del aporte de los mismos a la producción y la sostenibilidad. Aunque haya innumerables evidencias, algunos productores no conocen con precisión la magnitud de las respuestas agronómicas y/o no analizan la relación costo-beneficio de la práctica. En consecuencia, les resulta difícil percibir cuánto dejan de producir o ganar por sub-fertilizar (excepto en casos en que es muy clara la limitación, como con N en trigo y maíz). Eso, sumado a la incertidumbre en la respuesta (por cuestiones climáticas, entre otras), distorsiona la evaluación de la relación costo/beneficio al inicio de la campaña (el costo es seguro pero el ingreso es desconocido e incierto).

Comentarios finales

La evolución reciente de la agricultura argentina implicó aumentos significativos en el uso de fertilizantes. Sin embargo, todavía hay un margen de progreso en relación a su uso para maximizar la productividad asegurando la conservación de recursos naturales. Este resumen plantea diversos factores que contribuyen a explicar fallencias en el manejo de la fertilización. Es clave analizar los mismos para diseñar estrategias que mejoren las prácticas de fertilización. Como país no podemos permitirnos niveles sub-óptimos de productividad y/o degradación de nuestros recursos naturales ya que estos son pilares para la competitividad de un sector clave de la economía. A su vez, asegurar la máxima productividad y la conservación de los recursos naturales es clave para el posicionamiento geopolítico de nuestro

¹ Datos de productores de la zona Centro de AACREA (2006 a 2013) muestran menores proporciones de fertilización en los campos arrendados respecto a los propios (83 vs 92% en maíz y 17 vs 30% en soja) y menores dosis de P (22.3 vs 15.3 kg/ha en maíz y 4.17 kg/ha vs 2 en soja). Fuente: AgriZoCe CREA Región Centro.

² Parte de la recuperación del consumo respondió a que las medidas estimularon un aumento en el área de trigo y maíz (en relación a soja), cultivos en los que se utilizan mayores niveles de fertilizante

país en un contexto en el que se demandan cada vez más alimentos pero con alta competitividad para la provisión de los mismos.

En función de los factores analizados en este resumen, surgen algunas alternativas que podrían ayudar a mejorar los niveles de fertilización. A continuación un breve resumen de aquellas relacionadas a factores estructurales (aunque no menos importante, no me enfocaré en los factores coyunturales):

En primer lugar, todas las acciones tendientes a un *manejo integral del riesgo climático* podrían incentivar el uso de fertilizantes. La implementación de prácticas (e.g., ajustes en fechas de siembra) o herramientas (e.g., seguros) que permitan al productor reducir su vulnerabilidad frente a las variaciones del clima y tener más certidumbre y seguridad respecto a sus ingresos, podrían estimular la inversión en fertilizantes, principalmente en los cultivos como trigo y maíz en el que los mismos significan una proporción importante de los costos (e.g., entre 22% y 50% en trigo, comunicación personal área de Economía de AACREA).

En segundo lugar, la posibilidad de realizar acuerdos de arrendamiento de mayor duración (e.g., 3 años) permitiría a los arrendatarios poner foco en objetivos de más largo plazo. Así, se tomarían decisiones orientadas no sólo a maximizar la producción de la campaña actual sino también a conservar los recursos productivos (principalmente el suelo). Entre otras cosas, podrían esperarse cambios en el portafolio de cultivos (i.e., esquema de rotaciones) y en los niveles de inversión en fertilizantes. Los *incentivos para la adopción de "buenas prácticas"*, más allá del régimen de tenencia también, permitirían avanzar en el mismo sentido.

Finalmente, resta mucho trabajo de transferencia de tecnología por realizar, a pesar de que la fertilización no sea un tema novedoso. La difusión de información sólida sobre las respuestas a la fertilización y el desarrollo de herramientas de apoyo a las decisiones pueden contribuir a cambiar los esquemas de fertilización actuales. Asimismo, la experimentación con involucramiento de los productores y las redes de productores y técnicos son clave para generar conciencia y estimular cambios de prácticas (la experiencia del programa de experimentación de la zona Sur de Santa Fe de AACREA con IPNI y ASP es un claro ejemplo de esto). El estado puede jugar un rol clave para una implementación masiva de esta estrategia.

Referencias

- Arora, P., F.B. Bert, G.P. Podestá, y D. Krantz. 2015. Ownership effects in the wild: Influence of land ownership on agribusiness goals and decisions in the Argentine Pampas. *Journal of Behavioral and Experimental Economics* 58: 162-170.
- Correndo, A.A., M. Boxler, y F.O. García. 2015. Análisis económico del manejo de la fertilización con enfoque en el largo plazo. *Ciencia del Suelo* 33(2), 197-212.
- García, F.O., y M. Díaz-Zorita. 2015. Capítulo del libro "El Deterioro del Suelo y del Ambiente de la Argentina". Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura (FECIC), http://fecic.org.ar/prosa.php?area=prosa_editorial
- Sainz-Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H.P. Angelini. 2011. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extra pampeana. *Ciencia del Suelo* 29, 29-37.
- Sainz-Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H.P. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y extra pampeana argentina. *RIA, Revista de Investigaciones Agropecuarias* 2012, 38, 33-39. ●

Modelos integrados de recomendación de fertilización en la región pampeana

Martín Díaz-Zorita

Monsanto BioAg y Comité Técnico Fertilizar AC

Calle 10 753, Parque Industrial Pilar, (1629) Pilar, Buenos Aires, Argentina

*Contacto: martin.diaz.zorita@monsanto.com

El sostenimiento de la producción agropecuaria en la región pampeana requiere de la implementación, entre otras prácticas, de estrategias integradas de manejo de la nutrición de cultivos en el marco de sistemas productivos diversos y complejos. La diversidad de los sistemas resulta, entre otros varios elementos, de condiciones de sitio divergentes (ej. tipos de suelos, relieve, antecedentes productivos, escenarios climáticos, etc.) en combinación con decisiones de manejo de cultivos y empresariales (ej. cultivos, duración de barbechos, sistemas y logística de siembra, etc.). La complejidad surge de la combinación entre estos factores, que en términos generales supera límites geográficos y, dependiendo de la escala de decisión empresarial y operativa, conduce a la elaboración de modelos de recomendación de la fertilización específicos o únicos. Sin embargo, estos modelos contemplan algunos elementos estructurales y conceptuales comunes. En esta presentación se prevé su descripción y discusión atendiendo a desafíos para su diseño e implementación.

Nutrición integral de cultivos en sistemas intensificados

El manejo intensivo de la fertilización, en el contexto de ajustes en otras prácticas de producción agrícola, es uno de los elementos a considerar para mejorar sostenidamente los rendimientos por sobre las condiciones actuales de producción. La intensificación agrícola sustentable considera dos estrategias complementarias procurando por un lado implementar prácticas a nivel de cultivos individuales y por el otro incrementar la cantidad de cultivos por unidad de tiempo. Ambas estrategias se complementan al aportar recursos energéticos y funcionales a través del ciclado y actividad de los suelos más allá de mejoras en la captación de nutrientes excedentes entre cultivos sino también al promover a la actividad biológica y así a múltiples procesos ligados a la nutrición,

sanidad y crecimiento de las plantas. La combinación de prácticas puede mejorar la eficiencia de uso de recursos en secuencias aun cuando la cantidad de insumos aplicados se incrementa en comparación a prácticas de producción corrientes (Caviglia, 2016). En tal sentido, entre otros, estudios de fertilización de larga duración en sitios representativos de sistemas agrícolas de la región sur de Santa Fe (Argentina) lo validan. La producción acumulada de granos mejoró entre 27% y 120% con respecto a decisiones de manejo sin aplicación de fertilizantes o con uso moderado de estos. Además, en condiciones no limitantes de nutrición con nitrógeno, fósforo y azufre, no se observaron diferencias relevantes entre sitios, pero sí en los tratamientos con nutrición insuficiente (Correndo et al., 2015).

En la región pampeana, al incrementarse el aporte de nutrientes (intensificación de la fertilización) con respecto a su uso corriente, se observan aumentos en la producción. Resultados de la recopilación de unos 171 casos de fertilización en secuencias de cultivos de al menos 2 años de duración, indican mejoras de hasta aproximadamente 20%. En general, los aportes relativos de la fertilización mejorada fueron mayores en los estudios desarrollados recientemente (2011 a 2015) que entre las campañas 2000 y 2005. Este comportamiento es en parte atribuido a menor productividad media en los tratamientos "del productor" atribuible al continuo deterioro de la fertilidad de los suelos al limitarse la implementación de prácticas "mejoradas" de nutrición (Díaz-Zorita y Grasso, 2016).

El aprovechamiento de la diversidad biológica, natural y agronómicamente inducida, que se encuentra en la rizosfera de los cultivos es de gran potencial para el beneficio de la producción de los cultivos. Son crecientes los estudios científicos que sustentan el uso de productos biológicos mejoradores de la producción de diversas plantas entre los que se encuentran microorganismos seleccionados por su contribución a atenuar factores de estrés abiótico tales

como salinidad y limitaciones nutricionales. En la producción de cereales, la inoculación con microorganismos benéficos muestra resultados similares a los que se describen en leguminosas al incrementar la eficiencia de aprovechamiento de nutrientes aplicados (Díaz-Zorita y Fernández Canigia, 2016). Es así que entre los desafíos actuales en el planteo de modelos superadores de manejo de los cultivos se encuentra la adaptación de alternativas eficientes de incorporación de microorganismos benéficos mejoradores de la nutrición de las plantas atendiendo a diversas condiciones de cultivo y condiciones de manejo (ej. compatibilidad con otros tratamientos de semillas y condiciones de almacenamiento previo a la siembra, aplicaciones simultáneas en el surco de siembra, etc.).

El punto de partida: conociendo el suelo para caracterizar la oferta de nutrientes

En el estado actual de los suelos agrícolas argentinos es creciente la ocurrencia de sitios con oferta limitada de nutrientes, tanto por sus características originales como por los frecuentes balances negativos entre aportes y extracciones. La disponibilidad de nutrientes limita la normal producción de todos los cultivos y es por esto necesario incrementar el uso de diagnósticos de fertilidad y mejorar la aplicación de recomendaciones de fertilización. Con frecuencia asociamos los modelos de diagnóstico de nutrición de cultivos con el conocimiento o la caracterización de la oferta de nutrientes a partir de algunos indicadores provenientes de análisis de los suelos. Esta herramienta es fundamental para avanzar en la mejora de implementar recomendaciones de fertilización y actualmente es poco empleada (García y Ciampitti, 2010).

El punto de partida es la toma de muestras de los suelos. En la región pampeana se reconoce que los protocolos para el muestreo son específicos de los sitios (i.e. región, tipo de suelo), nutrientes (i.e., P, N, otros) y cultivos (i.e. trigo, maíz, otros) considerados. Además, se realizan empleando diversas formas de recolección de muestras (i.e. lotes completos, zonas de manejo, grillas, etc.). Es por esto conveniente definir con claridad los propósitos del muestreo considerando también el momento de su ejecución en relación con el de su interpretación y de la consecuente aplicación de la estrategia de corrección nutricional. Si bien en Argentina,

el muestreo de suelos para ajustes de fertilización es de baja intensidad de uso, uno de los avances la elaboración de diagnósticos de fertilidad es la utilización de muestreos de suelos inteligentes o sectorizados según unidades de manejo y geo-referenciados en integración con otros índices. En este sentido, la delimitación de sectores productivos contrastantes a través de la fotointerpretación de imágenes satélites, mapas de rendimiento, sensores remotos y otras herramientas requiere ser seleccionada y aplicada en concordancia con los propósitos de su implementación. Estudios de variabilidad espacial de nutrientes a partir de muestreos en grilla sugieren que, para sitios de la región de la pampa arenosa, equidistancias de 50 m entre observaciones serían insuficientes para establecer modelos geospaciales de distribución de fósforo extractable (Pérez, 2017). Alesso et al. (2012), en evaluaciones en un Argiudol del centro de Santa Fe, no encontraron correlaciones espaciales aun empleando grillas espaciadas a 25 m. Estas características limitan la aplicación de modelos de corrección variable continua o zonificada de necesidades de nutrición fosfatada y otros nutrientes con comportamientos similares en cuanto a su distribución espacial.

En la región pampeana abundan los estudios que describen relaciones entre indicadores de fertilidad de suelos y producción de cultivos o de sus respuestas a la fertilización. Estos han sido compilados, discutidos y están disponibles en diversas publicaciones (ej., entre otras Echeverría y García, 2014; Alvarez, 2015) las que se encuentran en continua revisión y actualización. Independientemente del cultivo en cuestión, los diagnósticos se basan principalmente en la determinación de concentraciones de elementos en sus fracciones extractables. Por ejemplo, en el caso del fósforo, los diagnósticos frecuentes de necesidades de fertilización de cultivos de cosecha en suelos agrícolas contemplan la determinación de la cantidad extractable según la metodología de Bray y Kurtz 1 sobre muestras representativas del sitio productivo en la capa de 0 a 20 cm de los suelos. Los niveles críticos para discriminar entre rangos de probabilidades de respuesta a la corrección por fertilización, muestran diferencias tanto según los cultivos como las regiones consideradas mayormente en relación a su textura. Estos son mayores en cultivos de cereales de invierno para producción de granos (i.e. trigo, cebada), menores en oleaginosos es-

tivos (i.e. soja y girasol) e intermedios en maíz. En Vertisoles de la provincia de Entre Ríos, los niveles críticos son menores que en el resto de la región pampeana.

Las leguminosas (ej. soja, maní, arveja, etc.) se nutren mayormente del N atmosférico a partir por el proceso de fijación biológica del nutriente que se encuentra estrechamente ligado en su eficiencia a la incorporación de rizobios específicos y efectivos junto con una adecuada provisión de nutrientes, principalmente fósforo y algunos microelementos específicos (ej., cobalto y molibdeno). Es así que los análisis para la determinación de niveles extractables de nitrógeno son requeridos para el diagnóstico de necesidades de nutrición nitrogenada en cereales y otros cultivos sin capacidad de nutrirse desde el aire (ej. girasol, colza, etc.). En suelos profundos y con texturas francas a arenosas, el espesor del suelo evaluado difiere entre cultivos (0 a 60 cm en maíz y 0 a 40 cm en trigo). En cambio, en suelos pesados (i.e. Vertisoles) este diagnóstico puede aplicarse con resultados similares en eficacia al evaluar la oferta de nitrógeno en la capa superior de los suelos (Díaz Valdez et al., 2014).

La identificación de sitios con potenciales limitaciones en la nutrición con otros nutrientes se realiza evaluando niveles extractables del suelo (ej. zinc en maíz, boro en girasol), mayormente en regiones y cultivos donde es mayor la posible ocurrencia de limitaciones a la normal nutrición y producción de los cultivos. Evaluaciones recientes de resultados regionales de análisis de suelos sugieren áreas en la región pampeana con diferentes niveles medios de micronutrientes extractables (Sainz Rozas et al., 2013). Estas condiciones de deficiencia se intensifican al incrementarse los rendimientos de los cultivos en producción (Salvagiotti et al., 2013). Los niveles críticos de respuesta o de referencia varían, entre otros factores, según la solución extractante y el cultivo diagnosticado, tal es el caso del zinc para la nutrición de maíz (Larsen et al., 2016).

El diagnóstico de necesidades de fertilización más allá del análisis del suelo

Los resultados de los análisis de los suelos son solo una parte que requiere de la incorporación de información adicional para mejorar su eficiencia y aplicabilidad. Para la elaboración de algunas recomendaciones, y dependiendo de los alcances de su implementación, se requiere

de información complementaria que describa el estado nutricional específico del cultivo (ej. evaluaciones en tejidos vegetales), antecedentes productivos (ej. rendimientos y manejo de rastrojos), uso de nutrientes (ej. composición de fertilizantes aplicados con anterioridad) y expectativas de rendimientos. Por ejemplo, recomendaciones de nutrición azufrada consideran, junto con resultados de análisis de suelos, la ocurrencia de antecedentes de manejo predisponentes para la manifestación de deficiencias específicas (Carciochi et al., 2015).

En maíz, diferencias en la eficiencia de uso del nitrógeno entre genotipos sugieren su consideración específica al diagnosticar necesidades de fertilización en planteos de alta producción (Maltese et al., 2016). Similares observaciones se aplican en planteos de producción de trigo atendiendo a diferencias varietales entre grupos de calidad panadera y en interacción con los rendimientos alcanzables según ambientes productivos (Brambilla et al., 2017). En girasol, además del resultado de nitrato extraído del suelo se recomienda complementar el diagnóstico determinando la concentración de nitrato en los pecíolos en estadios tempranos del desarrollo de las plantas y otras observaciones en el cultivo, tales como el sistema y fecha de siembra, oferta hídrica, etc.

Los modelos integrados de diagnóstico, principalmente para el manejo de la nutrición nitrogenada de cereales contemplan estimadores del rendimiento esperable de los cultivos. Algunos emplean relaciones con indicadores de suelos tales como contenidos de materia orgánica y espesor de suelos sobre capas limitantes al normal desarrollo de las raíces. Por ejemplo, para la producción de trigo en la región semiárida-subhúmeda pampeana, al aumentar los contenidos de materia orgánica los rendimientos alcanzables se incrementan en respuesta a mejoras en las reservas de agua en el suelo durante ciclos con balances hídricos desfavorables como también por mayor disponibilidad potencial de algunos nutrientes (i.e. nitrógeno) en períodos hídricos favorables. En el sur bonaerense y en sitios con limitaciones a la profundidad de los suelos (i.e. presencia de tosca), la producción decae al reducirse el espesor explorable por las raíces y lo hace con relaciones diferentes según los cultivos considerados. Otros modelos recurren a la integración de fotointerpretación de imágenes satelitales históricas donde identifican niveles

contrastantes y recurrentes de productividad aparente como así también evaluaciones de precisión de descriptores del relieve (i.e. cotas, pendientes, curvaturas, etc.) e índices derivados de determinaciones de conductividad eléctrica de los suelos.

Interpretación de diagnósticos de fertilidad y estrategias de manejo de la nutrición

Las diferencias en la interpretación de los diagnósticos de fertilidad y propuestas de manejo estratégico de la nutrición surgen mayormente al considerar los nutrientes individuales, su dinámica en los suelos (i.e. movilidad, residualidad) y oportunidades de incorporación y ciclado en los sistemas productivos (i.e. fertilización, fijación biológica). Los planteos según criterios de suficiencia de nutrientes buscan corregir necesidades anuales de nutrientes (“fertilizando el cultivo”) y conducen en el largo plazo al establecimiento de rendimientos menores al máximo alcanzable al reducir potenciales riesgos de no lograr respuestas rentables en el año de aplicación de la corrección (Leikam et al., 2010). En contraposición, las estrategias de fertilización de mantenimiento (y en su caso extremo de crecimiento), buscan correcciones nutricionales que compensen la extracción de estos y que no se limite la productividad maximizando los rendimientos (Leikam et al., 2010). La brecha de rendimientos entre ambos planteos para el manejo de la nutrición de los cultivos es variable entre cultivos y en interacción con condiciones ambientales. Resultados de un estudio de larga duración en la EEA del INTA “General Villegas” (Drabble, Buenos Aires, Argentina) validan mayores respuestas con dosis de fósforo equivalentes a la extracción de los cultivos (reposición) al producir trigo y maíz que en el caso de soja y de girasol (Barraco et al., 2014). Los planteos de fertilización por reposición permiten alcanzar más frecuentemente mayores productividades del sistema (i.e. rendimientos acumulados anuales de todos los cultivos en la secuencia).

En sistemas intensivos agrícolas, el fósforo tendría que ser manejado en función del sistema en su conjunto considerado la estrategia del balance como guía para el manejo de la fertilización (Hoffman Berasain, 2013). Para este propósito es de importancia conocer, además del nivel extractable de los suelos, la cantidad aparentemente extraída por los cultivos a partir

de registros precisos de rendimientos y de concentración del nutriente en granos. Al aumentar la cantidad de cultivos en producción por unidad de superficie, como es en el doble cultivo trigo-soja, la estrategia de uso del fósforo no difiere entre aplicar todo el nutriente en trigo o dividirlo aplicándolo en el momento de la siembra de cada cultivo (Salvagiotti et al., 2005). No obstante, la mayor eficiencia en el uso agronómico del fósforo se observa cuando los aportes son directos en cada cultivo dado que, en suelos con bajos niveles extractables, los efectos residuales se observan al incrementar las dosis de fertilización frecuentemente aplicadas en los cultivos individuales (Hernández et al., 2009). Es así que en los planteos de fertilización inicial en cultivos de cosecha gruesa al procurar una alta eficiencia de captación de los nutrientes facilita la rápida implantación y crecimiento de las plantas consolidando condiciones mejoradas de producción. Esta práctica contempla el aporte combinado de nutrientes rápidamente accesibles para las plantas atendiendo principalmente a cubrir demandas tempranas de estos. Localización y distribución de fertilizantes próximos al crecimiento de las raíces junto con ajustes de dosis en planteos integrados de nutrición son elementos a considerar al establecer modelos eficientes de manejo de la fertilización.

La decisión de correcciones de necesidad de nutrición nitrogenada es conveniente de manejar según planteos de suficiencia atendiendo a evitar limitaciones en su provisión a los cultivos, donde al aumentar la información de diagnóstico se mejora la eficiencia de aprovechamiento del insumo. Los sistemas de cultivos con leguminosas tienen el potencial interno de regular su ciclo de nitrógeno. Entre el 50 y el 60% de la demanda de nitrógeno para la producción de soja es cubierta por la fijación biológica por lo que sólo parte del crecimiento del cultivo es sustentada por el consumo y extracción de nitrógeno del suelo. En condiciones de alta productividad se observan los mayores niveles de aportes relativos de fijación (Collino et al., 2015). Normalmente, la fijación biológica mantiene la disponibilidad del nitrógeno para las plantas dentro de niveles adecuados para el crecimiento, desarrollo y producción de soja en un amplio rango de condiciones de manejo y productividad. Es así que los aportes a la nutrición nitrogenada y a los rendimientos al inocular soja con *Bradyrhizobium* sp. y arveja con *Rhizobium leguminosarum* son

altamente valorados. Además, la eficiencia de aprovechamiento de otros nutrientes aplicados por fertilización se incrementa bajo condiciones de manejo del cultivo no limitadas en nitrógeno logradas al inocular (Díaz-Zorita y Fernández Canigia, 2016). En otros cultivos, por ejemplo, de cereales, las recomendaciones de fertilización nitrogenada requieren la caracterización precisa del sitio de producción integrando, además de la oferta actual de nitrógeno extractable del suelo, otros indicadores de caracterización del sitio y pronósticos o escenarios productivos esperados considerando prácticas de manejo tales como fecha de siembra, genotipo, densidad de siembra, etc.

Comentarios finales

La abundante información disponible y actualizada sobre los aportes de la nutrición para la producción de sistemas agropecuarios en la región pampeana nos permite identificar elementos comunes para el diagnóstico de las condiciones de fertilidad con ajustes específicos entre regiones y cultivos. Sin embargo, al diseñar planteos sustentables, la intensificación, resultante del aporte preciso, continuo y adecuado de nutrientes junto con la incorporación de cereales y doble cultivos en las secuencias productivas, es un común denominador al plantear modelos de manejo en toda el área. Dependiendo de los nutrientes identificados como limitantes, las estrategias de interpretación y planteos recomendados de manejo varían entre decisiones dirigidas a cada cultivo atendiendo a la suficiencia nutricional o a la combinación de este propósito y la recuperación de niveles de fertilidad de los suelos y reposición de cantidades extraídas en granos principalmente. Esta última estrategia es la recomendada para el manejo de la nutrición fosfatada dónde el monitoreo geoposicionado de los rendimientos es una de las herramientas que complementan la elaboración de planteos integrados de fertilización.

En el caso del manejo de necesidades nitrogenadas en cereales, los desafíos actuales se centran en ajustar el análisis de necesidades de corrección nutricional a los cultivos atendiendo a las expectativas de demanda asociadas a la precisa caracterización del sitio productivo en interacción con genotipos, su manejo y cualidades específicas del destino productivo. La nutrición nitrogenada en cultivos de leguminosas que se

logra a partir de la fijación biológica es facilitada tanto por la implementación de estrategias modernas de inoculación con rizobios como por la adecuada oferta de otros nutrientes para el normal crecimiento de estos cultivos.

La integración de información productiva, consistente en la consideración de antecedentes de manejo y sus resultados como la previsión o expectativas de rendimientos en el contexto de condiciones ambientales diversas, es uno de los pilares sobre los que se apoyan los planteos de recomendaciones de manejo de la fertilización. Otro de los pilares es la diversificación en las secuencias de cultivos permitiendo así ampliar las alternativas de corrección de necesidades de nutrición acordes a comportamientos diferenciales de estos en relación al consumo, la eficiencia y la residualidad de la práctica. Surgen así complejos y variados modelos de recomendación donde se conjugan elementos propios de los nutrientes y cultivos que atienden a diferencias provenientes del conocimiento del sitio integrado a decisiones empresariales estratégicas. En la integración de decisiones de manejo de nutrientes se mejora la intensificación sustentable de la producción agrícola.

Referencias

- Alesso, C. A., M.A. Pilatti, S. Imhoff y M. Grilli. 2012. Variabilidad especial de atributos químicos y físicos en un suelo de la pampa llana santafesina. *Ciencia del Suelo* 30: 85-93
- Alvarez, R. 2015. Fertilidad de suelos y fertilización en la región pampeana. Ed. FAUBA, Buenos Aires (Argentina), 485 pp.
- Barraco, M., M. Díaz-Zorita, C. Justo y A. Lardone. 2014. ¿Fertilización fosfatada por suficiencia o mantenimiento en secuencias agrícolas de la pampa arenosa? En: Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo - II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Producción sustentable en ambientes frágiles. AACs (ed.), Bahía Blanca, Bs. As., 5-9 mayo. 2014. AACs. Argentina.
- Brambilla, C., G.A. Duarte y M. Díaz-Zorita. 2017. Manejo de la nutrición de trigo en la región de la pampa arenosa atendiendo a rendimiento y calidad. En Simposio Fertilidad 2017, 17 y 18 de Mayo de 2017, Rosario (SF, Argentina).
- Carciochi W.D., G.A. Divito, N.I. Reussi Calvo, y H.E. Echeverría. 2015. ¿Qué sabemos del diagnóstico de azufre en los cultivos de la región pampeana argentina? Actas Simposio Fertilidad 2015. Rosario, 19 y 20 de mayo. En CD.
- Caviglia O. 2016. Proyecto: Productividad e impacto

- ambiental de sistemas intensificados de producción de granos en la región pampeana argentina. Resultados de productividad de los recursos. Presentación en 4° Jornada de intercambio ámbito público y privado. 3 y 4 de marzo de 2016. Balcarce (BA).
- Collino, D. J.; F. Salvagiotti; A. Perticari; C. Piccinetti; G. Ovando; S. Urquiaga y R. W. Racca. 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationship with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil* 392: 239-252.
- Correndo A.A., M. Boxler, y F. O. García. 2015. Análisis económico del manejo de la fertilización con enfoque en el largo plazo. *Cienc. Suelo (Argentina)* 33(2):197-212.
- Díaz Valdez, S., F. García y O. Caviglia. 2014. Maíz tardío en Entre Ríos, Argentina: calibración de umbrales críticos en nitrógeno. *IAH* 13: 18-20.
- Díaz-Zorita, M. y A. Grasso. 2016. Fertilización intensificada de planteos agrícolas. XXIV Congreso de AAPRESID, Rosario (SF, Argentina).
- Díaz-Zorita, M. y M. V. Fernández Canigia. 2016. El aporte de la microbiología para mejorar el uso de fertilizantes y reducir efectos ambientales. En: R. S. Lavado, *Sustentabilidad de los agroecosistemas y uso de fertilizantes*, Orientación Grafica Editora, Buenos Aires (Argentina), pp. 223-249.
- Echeverría, H y F. García. 2014. Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2da Ed. Bs As. Ed. INTA, Buenos Aires (Argentina), 903 pp.
- García F. e I. Ciampitti. 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: El enfoque "tradicional". Actas CD XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS. Rosario (Santa Fe). 31 Mayo-4 Junio 2010.
- Hernández, C.; F. Sosa, G. Sanzano, M. Morandini, H. Rojas y M. Devani. 2009. Efecto de distintas alternativas de fertilización fosfatada en la secuencia trigo-soja sobre el fósforo asimilable y los rendimientos en la provincia de Tucumán, Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 86: 31-36.
- Hoffman Berasain, E.M. 2013. Criterios y estrategias de fertilización que apunten a asegurar suministro de fósforo en cultivos de segunda. *IAH* 11: 2-7
- Larsen, B., H. Sainz Rozas, M. Eyherabide, H.E. Echeverría, E.A. Rampoldi, P.A. Barbieri, N. Reussi Calvo, F. Salvagiotti, G. Ferraris, P. A. Barbagelata. 2016. Diagnóstico de disponibilidad de cinc en suelo para el cultivo de maíz: comparación de extractantes. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo; Río Cuarto (Córdoba, Argentina). En CD.
- Leikam, D.; G. Randall y A. Mallarino. 2010. Are current soil test-based phosphorus and potassium fertilizer recommendations adequate? *Crops and Soils* 43: 27-32.
- Maltese, N., R. J. M. Melchiori, M. Robles, J. Cagnola, G. A. Maddonni y J. M. Ferreyra, 2016. Nitrogen Use Efficiency and Its Components of Maize in Different Environments. *ASA-CSSA-SSSA Annual Meetings*, Phoenix, AZ.
- Pérez, G. 2017. Análisis geoespacial de la respuesta de maíz y de soja a la fertilización con fósforo en Hapludoles de la región subhúmeda pampeana. En Taller Agronómico de Problemas Específicos sobre Nutrición Mineral y Fertilización de Cultivos, EPG-FAUBA.
- Sainz Rozas, H. R., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P.A. Barbieri, H.P. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris, y M.R. Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? En Simposio Fertilidad 2013. Mayo de 2013. Rosario, Santa Fé. Argentina
- Salvagiotti, F. 2013. ¿Cómo podemos aumentar los rendimientos de soja?. La visión desde la nutrición. *Proc Simposio de Fertilidad 2013*. Rosario, pp. 45-50.
- Salvagiotti, F., G. Gerster, S. Bacigaluppo, J. Castellarin, C. Galarza, N. Gonzalez, V. Gudelj, O. Novello, H. Pedroll y P. Vallone. 2005. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo* 22: 92:101. ●

Productividad del cultivo de maíz en la región semiárida pampeana: eficiencia de uso de agua y nitrógeno

Cristian Alvarez^{1,*}, Matías Saks², Luis Verri³ y Carlos Pedro Lienhard³

¹INTA-Pico, ²Bunge Argentina S.A y ³Asesor Privado

*Contacto: alvarez.cristian@inta.gob.ar

Introducción

En la región de la pampa arenosa el cultivo de maíz se ha implantado tradicionalmente en siembras tempranas de setiembre-octubre y en secuencias donde el cultivo antecesor es soja o girasol. Bajo estas condiciones se han determinado umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada de 120 a 140 kg N ha⁻¹, según suelos Hapludoles thaptos o típicos, respectivamente (Barraco y Díaz Zorita, 2006). En las últimas campañas y fundamentalmente debido a la variabilidad en las precipitaciones primavera-estivales, se ha generalizado la siembra de maíces tardíos (sembrados hacia fines de noviembre-mediados de diciembre) y/o maíces de segunda (sobre gramíneas de cosecha o ensiladas). En cualquiera de estas situaciones, la dinámica del nitrógeno (N) es afectada no sólo por el efecto del cultivo antecesor, sino también por la mineralización de la materia orgánica (MO) ya que el cultivo se implanta en una época de mayor disponibilidad de agua y mayores temperaturas.

Las variaciones en los rendimientos pueden explicarse a partir de efectos del genotipo, del ambiente y de su interacción. Generalmente el efecto ambiental, explica la mayor parte de las variaciones del rendimiento. Las propiedades del suelo (físicas y químicas) en interacción con las variables climáticas (disponibilidad de radiación y agua, así como también de los diferentes regímenes térmicos) determinan diferentes ambientes para el cultivo de maíz. Por lo tanto un ambiente de cultivo puede ser definido por la combinación de los factores lote, genotipo y manejo, es decir que, para una misma campaña y localidad, un mismo lote sembrado con distintos genotipos pueden ser tratados como ambientes distintos (Bacigaluppo et al., 2009).

El manejo diferencial sitio-específico cobra especial interés en regiones donde las propiedades edáficas de los suelos es altamente variable en escalas espaciales a nivel de potrero, y en las cuales las condiciones agro-ecológicas imponen diferentes grados de limitaciones para la producción de cultivos. Es por este motivo que el manejo sitio-específico resultará en mayores beneficios tanto económicos como ambientales, en regiones marginales, tales como la Región Subhúmeda y Semiárida Pampeana. La posición en el terreno ha sido señalada por diversos autores como una de las propiedades estrechamente ligada con la variabilidad en la producción de los cultivos dentro de los lotes de producción (Yang et al., 1998; Changere y Lal, 1997).

El objetivo de este estudio fue cuantificar el efecto de la ubicación topográfica (posición en el relieve), y la fertilización con N (N) y Azufre (S) sobre la variación de rendimiento del cultivo de maíz.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló durante la campaña 2014/15 en el establecimiento "Loma Arisca", próximo a la localidad de Intendente Alvear (La Pampa) en la Región Semiárida Pampeana, se delimitaron tres ambientes productivos pertenecientes a los subgrupos de suelos: Ustisament Típicos (Loma) y Haplustoles Énticos (Media Loma y Bajo).

Tabla 1. Ambiente de Loma, Bajo y Media Loma: contenido de fracciones de arcilla (Ar), limo (L) y arena (A) (g kg^{-1}), contenidos de materia orgánica (MO) (g kg^{-1}) y fósforo extractable (P) (mg kg^{-1}), Capacidad de intercambio catiónico (CIC) ($\text{meq } 100 \text{ g de suelo}^{-1}$), Azufre total (mg kg^{-1}) y pH.

Ambiente	Prof. cm	Ar	L	A	MO	MO/L+A	pH	CIC	P	S total
Loma	20	40	100	860	10.8	7.7	6.07	7.12	46	115
	40	40	100	860			6.42			
	60	40	100	860			6.55			
Bajo	20	160	220	620	22.6	5.9	6.17	10.6	30	249
	40	100	220	680			6.42			
	60	100	200	700			6.55			
½ Loma	20	100	200	700	17.0	5.6	5.95	9.2	35	237
	40	110	150	740						
	60	90	170	760						

Se establecieron cuatro niveles de N en el estadio de V6 (Ritchie y Hanway, 1982): (i) Testigo, ii) 40 kg de N ha^{-1} , iii) 80 kg de N ha^{-1} , y iv) 120 kg de N ha^{-1} . Luego se dividió la parcela principal (N) y se aplicó a una mitad 0 kg de S ha^{-1} y a otra mitad 15 kg de S ha^{-1} . En cada ambiente productivo los tratamientos se aleatorizaron y establecieron con 4 repeticiones. Se utilizó como fuente de N solución de urea y Nitrato de Amonio líquido (UAN) y como fuente de S Tiosulfato de Amonio (TSA). La siembra se realizó el 5 de octubre con una densidad de plantas a cosecha de 2.5 plantas por m^2 sobre un cultivo de cobertura secado en el mes de (15-9). En cada ambiente productivo se obtuvieron muestras de 0-20 cm y se determinó materia orgánica total (MO), P extractable (Bray-Kurtz I), pH, Capacidad de intercambio catiónico (CIC), N incubado en anaerobiosis (Nan), índice (MO/arcilla+limo $\times 100$, Pieri, 1995) y N-NO_3^- en dos profundidades (0-20 y 20-60 cm). Las distintas fracciones texturales se determinaron por el método de hidrómetro de Bouyoucos cada 20 cm hasta la profundidad de 60 cm. En el momento de la siembra del cultivo, y en los estadios reproductivos de R2 y en R6 (Ritchie y Hanway, 1982) se determinó el contenido de agua total del suelo (AT) en capas de 20 cm de espesor hasta los 200 cm de profundidad (método gravimétrico). A partir de los valores de textura se estimó a través del software SPAW (Saxton et al., 2006) capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PMP), y DA. Se calcularon los contenidos de agua útil (AU) (Ec. 1) y el uso

consuntivo (ET, Ec. 2) según la ecuación de López y Arrúe (1997):

$$\text{AU (mm)} = [\text{CC (g kg}^{-1}) - \text{PMP (g kg}^{-1})] \times \text{DA (gr/m}^3) \times \text{espesor (mm)}$$

Ec 1

Donde, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, DA: densidad aparente.

$$\text{ET: } \Delta S + R$$

Ec 2

Donde, ET: evapotranspiración, ΔS : cambio en el agua almacenada y R: precipitaciones.

En madurez fisiológica se cosechó manualmente una superficie de 5 m^2 y se determinó la producción de granos, el número de granos por unidad de superficie (NG) y el peso de 1000 granos, (PG). Los resultados de rendimiento en grano se expresaron con contenidos de 135 g kg^{-1} de humedad. Se obtuvo a través del rendimiento R y el UC, la eficiencia uso de agua (EUA). Se calculó la eficiencia agronómica de uso del N: $\text{EA} = (\text{R}-\text{R}_0)/\text{F}$; en donde R es el rendimiento del tratamiento fertilizado, R_0 es el rendimiento del tratamiento testigo y F es la cantidad de nutriente aplicado respectivamente. En el análisis de resultados se realizó análisis de la varianza y la comparación entre medias se efectuó mediante el test de LSD Fisher ($p \leq 0.05$), utilizándose para ello el software Infostat (Di Rienzo, 2011).

Resultados y discusión

El ambiente de Loma se caracterizó por un perfil de textura arenosa, con bajos contenidos de materia orgánica (MO), valores altos de fósforo extractable (P Bray). El ambiente de Bajo se caracterizó por un perfil de textura franca-arenosa, con contenidos medios a altos de MO, valores elevados de P, (Tabla 1). Las características intrínsecas de los suelos ubicados en la Loma y en el Bajo (Tabla 1) permiten que este último tenga, entre sus propiedades, una mayor capacidad de retención de agua (1 mm cm⁻¹ vs 0.5 mm cm⁻¹, respectivamente). La disponibilidad de N-NO₃⁻ a la siembra fue de 24, 50 y 39 kg ha⁻¹ en los primeros 60 cm de los ambientes Loma, Media Loma y Bajo, respectivamente.

Las precipitaciones registradas durante el estudio fueron un 28% menores durante etapa vegetativa-reproductiva respecto a serie histórica 612 mm desde la decaria de diciembre hasta la segunda de enero (**Figura 1**).

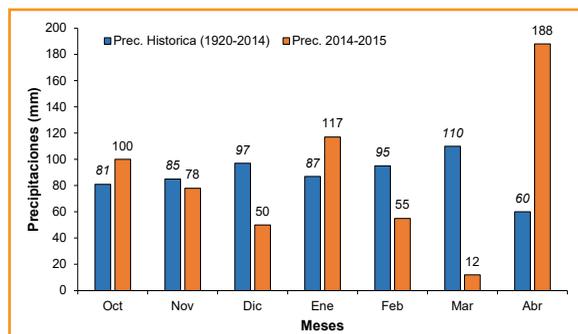


Figura 1. Distribución de precipitaciones históricas mensuales (serie 1920-2014) y de la campaña 2014/15 para el establecimiento Loma Arisca (Intendente Alvear, La Pampa).

La disponibilidad hídrica varío entre ambientes productivos y fechas de muestreo, registrándose 165, 476 y 521 mm de agua disponible al momento de la siembra para el ambiente Loma, Media Loma y Bajo respectivamente (Tabla 2). La presencia de la napa freática al momento de la siembra en los ambientes de Media Loma (140 cm) y Bajo (60 cm) incidió positivamente en los contenidos hídricos del suelo. Similar tendencia se observó al momento de floración del cultivo de maíz en el ambiente de Media Loma y Bajo, (170 y 100 cm Media Loma y Bajo, respectivamente). Sin embargo, en el ambiente Loma no se registró la presencia de napa hasta 200 cm de profundidad.

Tabla 2. Contenido de agua disponible al momento de la siembra, floración y madurez fisiológica del cultivo de maíz.

Estado	Loma	Media Loma	Bajo
Siembra (mm)	165	476	521
R2 (mm)	60	200	400
Ró (mm)	60	332	443

Tabla 3. Contenido de N-NO₃⁻ y Nam al momento de la siembra de maíz sobre cultivo de cobertura.

Variable	Loma	Media Loma	Bajo
N-Nitrato-20 (kg ha ⁻¹)	7	29	18
N-Nitrato-20-60 (kg ha ⁻¹)	17	21	11
Nan (mg kg ⁻¹)	10	36	50

Tabla 4. Rendimiento de maíz, número de granos por m² (NG) y peso de mil granos para los distintos tratamientos y ambientes evaluados (L=Loma, ML=Media Loma, B=Bajo) (p<0.05).

Tratamiento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)			NG m ²			PG (g 1000 granos ⁻¹)		
	L	ML	B	L	ML	B	L	ML	B
0	4326 a	7845 a	6687 a	1790 a	2658 a	2367 a	246 a	280 a	282 ab
0+S	4448 a	8206 ab	7276 b	1799 a	2972 ab	3094 ab	247 a	285 a	268 a
40	6143 ab	9983 ab	8268 ab	2363 ab	3402 bc	2875 ab	263 ab	294 a	287 ab
40+S	6817 b	9849 bc	8391 ab	3004 b	3431 bc	2963 ab	228 a	279 a	286 ab
80	7252 b	10345 c	10504 bc	2850 ab	3620 bc	3499 b	264 ab	288 a	302 ab
80+S	7404 b	10427 c	10493 bc	2662 ab	3701 c	3696 b	283 ab	279 a	284 ab
120	6792 b	10232 bc	10756 c	2550 ab	3774 c	3526 b	267 ab	288 a	304 ab
120+S	6812 b	10435 c	11034 c	2398 ab	3879 c	3693 b	305 b	271 a	305 b

La productividad del cultivo de maíz varío entre 4326 y 7404 kg ha⁻¹ en el ambiente de loma. La fertilización con N incremento el rendimiento del cultivo entre el 42 y 67% respecto al testigo y entre 0.4 y 15% por el agregado de S (Tabla 4). En el ambiente de media Loma la productividad del cultivo varió entre 7845 y 10427 kg ha⁻¹. La respuesta a la fertilización con N varió entre el 33 y 38 % respecto al tratamiento Testigo y entre -2 y 12% por el agregado de S en cada nivel de N. La productividad del cultivo de maíz varío entre 6687 y 11 034 kg ha⁻¹ en el ambiente de Bajo. Registrándose incrementos en la productividad por el agregado de N entre el 23 y 61% respecto al tratamiento (p<0.05) y entre -0.6 y 23% por la aplicación de S.

Tabla 5. Uso consuntivo (mm) y eficiencia de uso de agua (kg grano mm⁻¹ ha⁻¹) de los tratamientos testigos y fertilizados con N y S (120 kg N ha⁻¹ + 15 kg S ha⁻¹) en los tres ambientes evaluados. Letras diferentes entre tratamiento por ambiente indican diferencias significativas (p<0.05).

Ambientes	Tratamientos	UC	EUA
Loma	Testigo	550 a	7.9 a
	Fertilizado	529 a	12.8 b
Media Loma	Testigo	568 a	13.2 a
	Fertilizado	538 a	19.4 b
Bajo	Testigo	522 a	12.8 a
	Fertilizado	502 a	21.9 b

La fertilización con N y S no produjo diferencias significativas en la evapotranspiración del cultivo (p>0.05). Sin embargo se observaron incrementos significativos en la EUA del 62, 47 y 71 % para el ambiente de Loma, Media Loma y Bajo, respectivamente (Tabla 5). Estos resultados y efectos de la fertilización nitrogenada sobre la evapotranspiración y mejora en la EUA en el cultivo de maíz, coinciden con los obtenidos por Caviglia et al., (2010) en el Litoral, Barbieri et al., (2012) en el SE Bonaerense y Saks et al., (2014) en la Región Semiárida Pampeana.

La eficiencia agronómica en el uso del N (EAN) varió entre ambientes y dosis de aplicación de N (Figura 2). Si bien la EAN disminuyó a mayores dosis de fertilizante aplicado en los ambientes de Loma y Media Loma, en el Bajo pudo estar condicionada por la presencia de napa cercana a la superficie (< 80 cm). La combinación de N+S mejoró la eficiencia de EAN entre un 1 y 37% respecto a igual dosis de N aplicado en los ambientes evaluados.

Conclusiones

El rendimiento de maíz varió en función de la dosis de N aplicado y del ambiente, permitiendo identificar respuestas hasta la dosis de 40 kg de N ha⁻¹ en el ambiente de Loma y Media Loma, y de 80 kg de N/ha en el ambiente de Bajo. La aplicación de N combinado con el azufre mejoró la productividad del cultivo, la eficiencia de EUA y EAN. En este estudio se comprobó

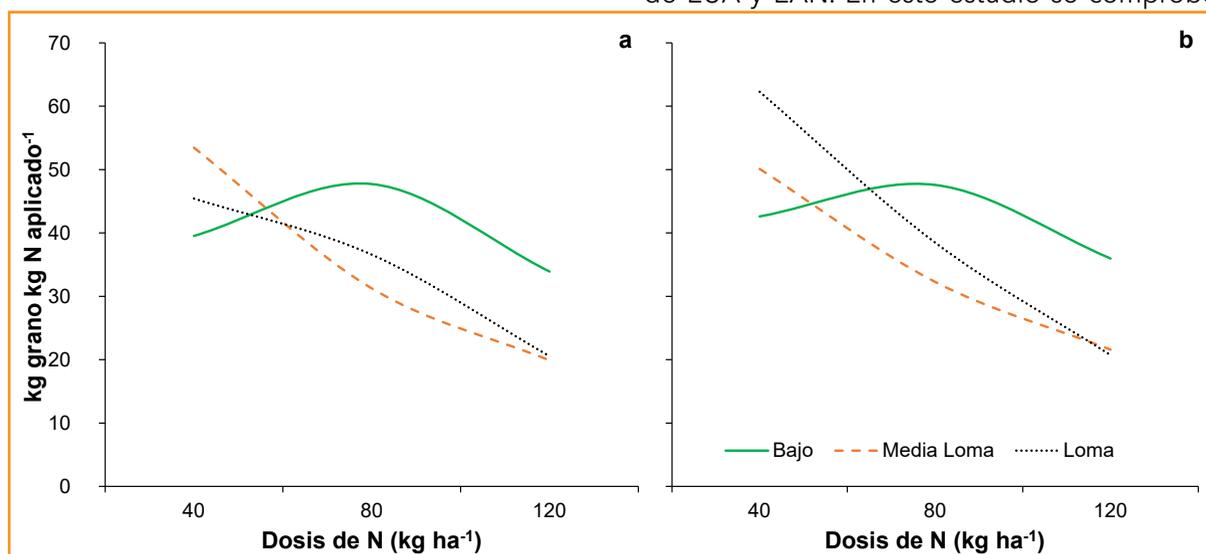


Figura 2. Eficiencia agronómica en el uso del N (kg grano kg N⁻¹) en función de la dosis de nutriente aplicado-a) N, b) N + S.

que la fertilización con N fue condicionada por la disponibilidad hídrica (efecto ambiente). No obstante, son necesarios estudios adicionales que analicen detalladamente la variabilidad en la eficiencia de uso de los insumos (fertilización) para desarrollar pautas y estrategias de manejo-sitio específico para la Región Semiárida y Sub-húmeda Pampeana.

Bibliografía

- Bacigaluppo, S., M. Bodrero, J. Andriani, M. De Emilio, J. Enrico, O. Gentili, G. Gerster, A. Malmantile, A. Manilla, J. Méndez, R. Pagani, R. Prieto, J. Rossi, N. Trentino, y J. Trosero. 2009. Evaluación de cultivares de soja de los grupos de madurez III, IV, V y VI en siembras de primera época en diferentes ambientes del sur de Santa Fe. Campaña 2008/9. Boletín Soja 2009. Para mejorar la Producción N° 42. Ed. INTA EEA Oliveros. pp 7-13.
- Barbieri, P.A., A. Della Maggiora, H.E. Echeverría, M. Pietrobon, y F. Alvarez. 2012. Evapotranspiración y eficiencia en el uso de agua del cultivo de maíz en respuesta a la fertilización con nitrógeno. Actas XIX Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo y XXIII Congreso argentino de la ciencia del suelo.
- Barraco, M., y M. Díaz-Zorita. 2006. Fertilización postergada de nitrógeno en maíz en la región de la pampa arenosa. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. I Reunión de suelos de la región Andina. 19 al 22 de setiembre de 2006. Salta- Jujuy. Argentina.
- Caviglia, O.P., N.V. Van Opstal, V.C. Gregorutti, R.J.M. Melchiori. 2010. Captura y uso del agua y de la radiación en maíz: efectos de la densidad de plantas y de la fertilización nitrogenada. 2010. Actas IX Congreso Nacional de Maíz. Simposio de Sorgo, Rosario, Argentina.
- Changere, A., y R. Lal. 1997. Slope position and erosional effect on soil properties and corn production on a Miamian soil in central Ohio. *J. Sustainable Agric.* 11: 5-21.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- López M.V., y J.L. Arrúe. 1997. Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. *Soil y Tillage Research* 44: 35-54
- Ritchie, S.W., y J.J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames Iowa. Special report N° 48.
- Saks, M.G., R. Fernández, A. Gili, y A. Quiroga. 2014. Efecto de la Fertilización con nitrógeno en distintos genotipos de maíz. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias Húmicas. Bahía Blanca-Argentina, 5 al 9 de mayo de 2014
- Salvagiotti, F., J. Capurro, y J. Enrico. 2009. El manejo de la nutrición nitrogenada en soja. Boletín Soja 2009. Para mejorar la Producción N° 42. Ed. INTA EEA Oliveros. Pp 45-51.
- Saxton, E., y W.J. Rawls. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Homepage: <http://www.ars.usda.gov/ba/anri/hrsl/ksaxton>.
- Yang, C., C.L. Peterson, G.L. Shropshire, y T. Otawa. 1998. Spatial variability of field topography and wheat yield in the Palouse region of the Pacific Northwest. *Tran. ASAE* 41: 17-27. ●

Cambios en la capacidad de mineralización de nitrógeno de los suelos pampeanos relacionados al uso agrícola

Roberto Alvarez^{1,2,*}, Analía Gimenez¹, Federico Pagnani¹, Verónica Recondo¹, Denise Ramil¹, Facundo Facio¹, María Rosa Mendoza¹, Haydee Steinbach¹, Gonzalo Berhongaray²

¹Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires, Argentina.; ²CONICET

*Contacto: ralvarez@agro.uba.ar

Introducción

El aporte de nitrógeno (N) por mineralización es la principal vía de suministro del nutriente a cultivos como trigo y maíz en la Región Pampeana, representando entre el 50% y el 75% de la absorción total según los casos (Alvarez et al., 2015). En el Sudeste bonaerense este proceso se ha estudiado y modelizado en las capas superficiales (0-40 cm) del suelo (Echeverría et al., 1994; Studdert et al., 2000), aunque no se ha establecido la magnitud del aporte desde las capas profundas. En suelos de la Región Semiárida Pampeana (Alvarez et al., 2016; Romano et al., 2016) y de la Pampa Ondulada (Alvarez et al., 2016; Giambiagi y Kraljev 1973) se ha determinado que la mayor parte de la mineralización del suelo se produce en el estrato 0-40 cm, aunque un 20-30 % proviene de las capas más profundas.

La agricultura produce una disminución de los stock de materia orgánica (MO) de los suelos (Guo y Gifford, 2002), lo que lleva a una disminución paralela de su capacidad de mineralización de N (Hass et al., 1957). Cuánto impacta el uso agrícola a la capacidad de aportar N de los suelos a los cultivos, tanto desde las capas superficiales como profundas del perfil, se ha estudiado escasamente en la Región Pampeana. En un solo estudio previo se estableció que la agricultura impacta localmente la mineralización en forma significativa hasta 50 cm de profundidad, produciendo una disminución de la mineralización potencial de ca. 30% (Alvarez et al. 2016). Este trabajo incluyó algunos perfiles de la Pampa Ondulada y la Región Semiárida Pampeana y no existe información de otras subregiones pampeanas. Nuestro objetivo es presentar los resultados de una evaluación regional de la capacidad potencial de los suelos pampeanos de mineralizar N, tanto en superficie como en profundidad, basada en un muestreo extensivo que incluyó todas las subregiones pampeanas

Materiales y Métodos

Durante el período 2007-2008 se muestrearon 82 establecimientos productivos distribuidos en la Región Pampeana (**Figura 1**). La ubicación de los mismos permitió lograr una muy amplia variación de las características de clima y suelo que ha sido descripta en detalle anteriormente (Alvarez et al., 2014; Berhongaray et al. 2013). En cada establecimiento se muestrearon cinco usos diferentes del suelo en forma apareada, de los que se reportarán aquí resultados de tres: suelos nunca cultivados, suelos cultivados que al momento del muestreo se encontraban en la fase agrícola de una rotación mixta o se usaban bajo agricultura continua y suelos cultivados en la fase pastoril de la rotación. Los suelos nunca cultivados, que se usaron como tratamiento control sin efecto agrícola, correspondieron en algunos casos a lotes donde no se rompió el pastizal natural y eran explotados con baja carga animal, pero en la mayoría de los casos fueron los cascos de los establecimientos. La vegetación predominante era de tipo graminoide en todos los controles. Los suelos cultivados se eligieron por ser su manejo representativo del que se hacía en cada zona.

En cada suelo se delimitó un área de unos 100 m² que fue usada para el muestreo. En cuatro sitios dentro de esas áreas se tomaron muestras en capas de 25 cm hasta 1 m de profundidad o hasta el límite superior del horizonte petrocálcico cuando estaba presente en ese primer metro del perfil. El barrenado permitía la determinación del volumen muestreado y a la caracterización físico-química de las muestras se sumó la estimación de su densidad aparente. Estos resultados han sido reportados anteriormente (Alvarez et al., 2014; Berhongaray et al. 2013). En muestras secas al aire y tamizadas por 2 mm se determinó el contenido de N mineral (N-mineral = N-amonio + N-nitrato) por extracción con 2N KCl y destilación por arrastre con vapor (Mulvaney, 1996).

La capacidad de mineralización de N del suelo (N-mineralizado) se determinó en incubaciones aeróbicas de 15 días de duración en la forma descrita en Alvarez et al. (1998). Usando la densidad aparente de cada capa de suelo se estimó el stock de N mineral y la capacidad de mineralización sobre una base areal.

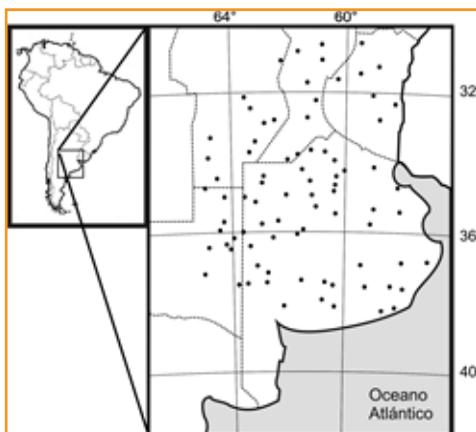


Figura 1. Ubicación de los establecimientos productivos muestreados.

Las variables N-mineral y N-mineralizado de los perfiles completos (suelos sin tosca, n = 198) se acumularon en función de la profundidad y se testeó la capacidad de un modelo potencial usado previamente para describir la variación del carbono orgánico (Berhongaray et al., 2013) de modelar su tendencia con la **Ec. 1**:

$$N_p = Apb \quad \text{Ec. 1}$$

Donde: N_p es la masa acumulada (kg ha^{-1}) a la profundidad p (m) de N-mineral o N-mineralizado, A es la masa acumulada a 1 m (kg ha^{-1}) de esas variables y b es la curvatura de la función. Si la variable no está estratificada b es 1 y la masa acumulada en profundidad se ajusta a una recta. A medida que b decrece la curvatura aumenta por mayor estratificación.

Para estimar la magnitud del efecto del uso agrícola sobre la capacidad de los suelos de

generar N para los cultivos se calculó para las variables N-mineral (**Ec. 2**) y N-mineralizado (**Ec. 3**) el cambio neto (N) entre el correspondiente suelo control (no cultivado) y los suelos cultivados.

$$N\text{-mineral} = N\text{-mineral control} - N\text{-mineral cultivado} \quad \text{Ec. 2}$$

$$N\text{-mineralizado} = N\text{-mineralizado control} - N\text{-mineralizado cultivado} \quad \text{Ec. 3}$$

Los resultados se analizaron por regresión y correlación lineal determinando la significancia por el test de F. Ordenadas y pendientes de datos observados vs. estimados se contrastaron contra 0 y 1 respectivamente usando IRENE (Fila et al., 2003). Los parámetros b del modelo potencial se contrastaron entre usos del suelo por análisis de varianza. Para contrastar el efecto uso del suelo sobre N-mineral y N-mineralizado se utilizó el análisis de varianza por estrato de profundidad en forma independiente. Como la distribución de las variables no fue normal se transformaron los datos por Box-Cox.

Resultados y discusión

Estratificación de N-mineral y N-mineralizado

El modelo potencial presentó un muy buen ajuste a los perfiles de N-mineral y N-mineralizado (**Tabla 1**). En todos los casos los ajustes fueron significativos ($P < 0.05$) y se logró una excelente estimación de los pooles de N acumulados a 1 m de profundidad (parámetro A) (**Figura 2**). La ordenada y la pendiente de las rectas de regresión entre el parámetro A y los valores medidos no difirieron de 0 y 1 respectivamente, indicando que el modelo puede ser usado para estimar masas acumuladas de N-mineral o capacidad de generar N-mineralizado en todo el perfil del suelo sobre la base de mediciones superficiales. Resultados similares han sido reportados para suelos agrícolas de la Región Semiárida Pampeana con anterioridad (Romano et al., 2016).

Tabla 1. Ajuste del modelo potencial a las variables N-mineral y N-mineralizado.

Uso del suelo	N-mineral			N-mineralizado		
	A (kg N ha^{-1})	b	R ²	A (kg N ha^{-1})	b	R ²
No cultivado	236	0.651 a	> 0.94	313	0.456 a	> 0.89
Cultivado fase agrícola	182	0.715 a	> 0.95	239	0.457 a	> 0.95
Cultivado fase pastura	189	0.663 a	> 0.94	255	0.444 a	> 0.93

*Para cada variable parámetros b seguidos de la misma letra no difieren a $P < 0.05$ entre usos del suelo

Las curvaturas medias (parámetro b) no difirieron entre usos del suelo por lo que se podría generalizar un valor medio de 0.68 para N-mineral y 0.45 para N-mineralizado. La mineralización de N está más estratificada que el pool N-mineral. Esto parece ser la consecuencia de que el N-mineral se mueve en el suelo y parte del pool generado en los estratos superficiales del perfil por mineralización se mueve hacia los más profundos.

Uso del suelo y pools de N

El uso agrícola del suelo determinó una disminución del pool de N-mineral y de la capacidad de mineralización evaluada como N-mineralizado (**Figura 3**). Esta disminución se produjo considerando el estrato superficial del suelo (0-25 cm) o hasta 1m de profundidad. En

el estrato 0-25 cm N-mineralizado se redujo en promedio 23% ($P < 0.05$) por el uso agrícola y esta reducción promedio fue del 21% ($P < 0.05$) cuando se tenía en cuenta el suelo hasta 1m de profundidad. El impacto del uso agrícola fue semejante independientemente de la fase de la rotación considerada. Por otro lado, los suelos con mayor capacidad de mineralización fueron los más afectados por la agricultura. Suelos donde N-mineralizado era bajo en el tratamiento control mostraron poco efecto del uso agrícola.

El contenido de nitrógeno total (N-total) de las muestras fue el principal regulador de N-mineralizado ($N\text{-mineralizado} = 0.025 N\text{-total}$, $r^2 = 0.54$, $P < 0.05$, $n = 875$). La regresión entre ambas variables indicó que las muestras generaron durante las incubaciones 25 kg N t^{-1} de N-total.

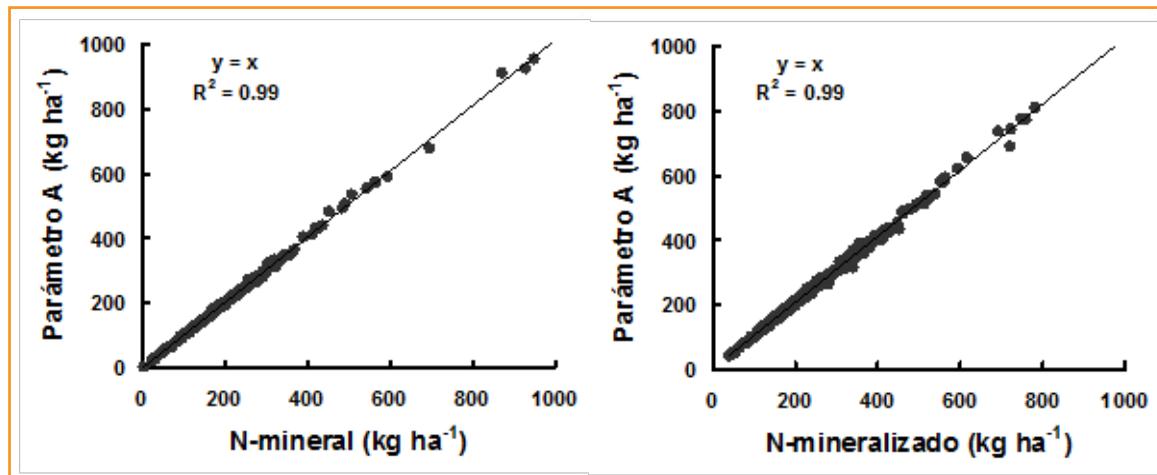


Figura 2. Relación entre el parámetro A del modelo potencial y la masa de N acumulada a 1m de profundidad medida en suelos sin tosca para las variables N-mineral y N-mineralizado.

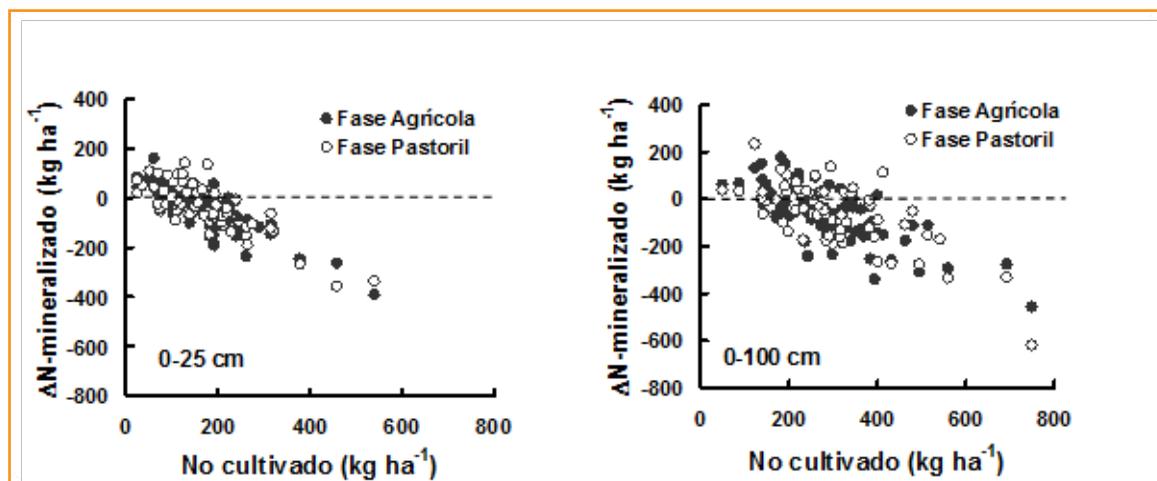


Figura 3. Relación entre el cambio neto de los pools N-mineral y N-mineralizado (N) entre el tratamiento control no cultivado y los suelos cultivados según se muestrearon durante la fase agrícola o la pastoril de la rotación.

Este coeficiente promedio fue similar independientemente del uso del suelo (no cultivado o cultivado). El impacto del uso del suelo sobre el stock de N-total de estas muestras ya ha sido reportado previamente (Alvarez et al., 2014). Se produjo una disminución media de 15% de N-total por efecto de la agricultura respecto de los controles no cultivados, siendo la disminución porcentual mayor en las capas superficiales del suelo que en las profundas. La mineralización de N copió esta tendencia e impacto sobre el stock de N-mineral. Sin embargo, N-mineralizado fue más afectado por el uso agrícola que N-total. Esto se debe a que el uso del suelo tiene efectos más marcados sobre las fracciones lábiles de la MO que sobre el total de ésta (Von Lüzow et al., 2007) y son esas fracciones las que actúan como fuente principal de N para la mineralización (Alvarez et al., 1998).

Conclusiones

La estratificación de los pools de N-mineral y N-mineralizado pudo ser descripta con muy buen ajuste por un modelo potencial que permite estimar valores en profundidad sobre la base de mediciones superficiales reduciendo esfuerzos de muestreo. La curvatura del modelo resultó afectada por el uso del suelo, lo que permitiría generalizar un valor medio para cada variable. El uso agrícola determinó una reducción del 21% en la capacidad de los suelos pampeanos de mineralizar N en todo el perfil. Esta reducción estuvo asociada a la pérdida de N en la MO y llevó a su vez a la disminución del pool de N-mineral en los suelos de la región. Estas pérdidas fueron mayores en suelos originalmente más fértiles.

Agradecimientos

Este trabajo fue subsidiado por la Universidad de Buenos Aires (Proyecto UBACYT 2014-2017, Código 20020130100484BA) y el CONICET (PID 084, período 2016-2019).

Bibliografía

Alvarez, R., C. Alvarez, P. Daniel, V. Richter y L. Blotta. 1998. Nitrogen distribution in soil density fractions and its relation with nitrogen mineralization under different tillage systems. *Austr. J. Soil Res.* 36: 247-256.

Alvarez, R., J. De Paepe, H. Steinbach, G. Berhongaray, M. Mendoza, A. Bono, N. Romano, R. Cantet y C. Alvarez. 2014. Cambios de flujos y stocks de carbono y nitrógeno por el uso del suelo: impacto sobre la productividad pampeana. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Actas 29 pág.

Alvarez, R., D. Ramil, H.S. Steinbach, M.R. Mendoza y G. Berhongaray. 2016. Mineralización de nitrógeno en suelos pampeanos bajo diferentes usos. Actas XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 6 pág. 2016.

Alvarez, R., H.S. Steinbach y J.L. De Paepe. 2015. Nitrógeno. En: *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos en la Región Pampeana*. Ed. R. Alvarez. Editorial Facultad de Agronomía-UBA. Capítulo 4, pág. 93-147.

Berhongaray, G., R. Alvarez, J. De Paepe., C. Caride y R. Cantet. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma* 192:97-110.

Fila, G., G. Bellocch., M. Acutis y M. Donatelli. 2003. IRENE: a software to evaluate model performance. *Eur J Agron* 18:369-372.

Echeverría, H.E., R. Bergonzi, y J. Ferrari. 1994. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudoeste de la Provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 12: 56-62.

Giambiagi, N., y L.B. Kraljev. 1973. Actividad nitrificadora de distintos horizontes en perfiles de Florencio Vorela (Prov. De Buenos Aires): sus causas. *Rev. Inv. Agrop.* 10: 223-236.

Guo, L.B., y R.M. Gifford. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Glob. Change Biol.* 8: 345-360.

Hass, H.J., C.E. Evans, y E.F. Miles. 1957. Nitrogen and carbon changes in Great Plains soils as influenced by cropping and soil treatments. *Tech. Bull.* 1164, 111 pág.

Mulvaney, R.L. 1996. Nitrogen-Inorganic forms. En: *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSABook Series 5*. Madison, Wi., USA. Pág. 1123-1184.

Romano, N., R. Alvarez, y A. Bono. 2016. Modeling nitrogen mineralization at surface and deep layers of sandy soils. *Arch. Agron. Soil Sci.*, DOI: 10.1080/03650340.2016.1241391.

Studdert, G.A., L.S. Carabaca, y H.E. Echeverría. 2000. Estimación del nitrógeno mineralizado para un cultivo de trigo en distintas secuencias de cultivos. *Ciencia del Suelo* 18: 17-27.

Von Lüzow, M., I. Kögel-Knabner, K. Ekschmitt, H. Flessa, G. Guggenberger, E. Matzner, y B. Marschner. 2007. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biol Biochem.* 39:2183-2207. ●

Evaluación del aporte de una fracción orgánica de fósforo del suelo para predecir la respuesta de soja a la fertilización

Stefania C. Appelhans^{1,2,3,*}, Ricardo J.M. Melchiori³, Pedro A. Barbagelata^{2,3} y Leonardo E. Novelli²

¹CONICET, ²Facultad de Ciencias Agropecuarias – UNER, ³INTA EEA Paraná

*Contacto: appelhans.stefania@inta.gob.ar

Introducción

El fósforo (P) es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas (Raghothama, 2005) y generalmente es deficiente en áreas de agricultura extensiva (Sainz Rosas et al., 2013). La disponibilidad de P en el suelo para los cultivos es relativamente baja, en comparación al contenido de P total, ya que se encuentra mayormente en formas insolubles (Beegle, 2005). En sistemas de producción en siembra directa, el P del suelo se estratifica debido a la extracción por parte de los cultivos desde los horizontes más profundos, la deposición y reciclaje del P de los residuos en la superficie del suelo (Selles et al., 1995), y la aplicación de fertilizantes fosfatados (en cobertura). Asimismo, la estratificación de la materia orgánica del suelo (MO) favorece el aumento de la actividad microbiana del suelo (Roldan et al., 2005; Bescansa et al., 2006), y el reciclado de los nutrientes (Hedley et al., 1982; Stewart y Sharpley, 1987; Selles, 2003).

El fósforo total se acumula en formas orgánicas (30-65%) de diferente labilidad, que pueden ser mineralizadas aumentando el P disponible para los cultivos (Hedley et al., 1982; Tracy et al., 1990; Selles et al., 1997; Condrón et al., 2005; Damon et al., 2014). En este sentido, la mineralización del P orgánico ha sido sugerida como más relevante en suelos con bajos contenidos de P disponible (Sharpley, 1985; Stewart y Sharpley, 1987; Thien y Myers, 1992), lo cual puede limitar la capacidad predictiva de la herramienta de diagnóstico más comúnmente utilizado en la Región Pampeana argentina, el método Bray (Salas et al., 2003; Sainz Rosas et al., 2013).

Resultados de algunos estudios de fertilización en el cultivo de soja en la región pampeana, evidencian baja o nula respuesta a la fertilización con P en algunos sitios donde el contenido de P Bray estuvo por debajo de los niveles críticos

calibrados (Melchiori et al., 2008; Gutierrez Boem et al., 2010). Dicha falta de respuesta podría deberse al aporte de P desde fracciones orgánicas del suelo, no contempladas en el P Bray (Suñer et al., 2002; Ciampitti et al., 2011; Wyngaard et al., 2013). Situaciones similares en sitios con bajos niveles de P Bray ha sido reportada como un error frecuente del método de diagnóstico (Heckman et al., 2006).

Se han reportado numerosos métodos para cuantificar fracciones orgánicas de P y determinar índices de biodisponibilidad (Hedley et al., 1982; Thien y Myers, 1992; Tiessen et al., 1994; Ciampitti et al., 2011; Wyngaard et al., 2013). Entre estos, un índice sensible a cambios en el manejo es el contenido de P total de la materia orgánica particulada del suelo (P-MOP) (Wyngaard et al., 2013). La materia orgánica particulada (MOP) es considerada un compartimento lábil de la MO constituida por residuos animales y vegetales parcialmente descompuestos que participa en la liberación de nutrientes (Cambardella y Elliott, 1992). El contenido de P en la MOP ha sido propuesto como un estimador de la mineralización potencial de P (Wyngaard et al., 2013; 2016) y como un posible predictor del estado nutricional de los cultivos (Ciampitti et al., 2011). Sin embargo, según nuestro conocimiento, no se ha reportado la integración de dicho índice en los métodos de diagnóstico de fertilidad fosfatada en el cultivo de soja, el cual puede usar formas orgánicas de P (Belinque et al., 2015). La mejora de los métodos de diagnóstico de fertilidad fosfatada en el cultivo de soja resulta necesaria dado que es el cultivo de mayor área sembrada en Argentina.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el aporte de fracciones orgánicas de P del suelo al diagnóstico de fertilidad del cultivo de soja en comparación con el P Bray en sistemas en siembra directa de la Región Pampeana argentina.

Materiales y métodos

El estudio se realizó sobre muestras de suelo provenientes de una red de experimentos de fertilización fosfatada en el cultivo de soja realizados en la región pampeana argentina durante las campañas agrícolas 2003-2004, 2004-2005 y 2005-2006, en lotes con más de 4 años de siembra directa continua e incluyendo diferentes cultivos antecesores (maíz, soja y pradera) (Melchiori et al., 2008) (Figura 1). Los sitios se ubicaron sobre suelos Pelludertes, Argiudoles, Argiarboles y Hapludoles.

Se seleccionaron sitios experimentales con y sin respuesta a la fertilización de acuerdo a su ubicación relativa a los cuadrantes del procedimiento gráfico de Cate y Nelson (CyNg) (Cate y Nelson, 1965). Los criterios de selección de muestras incluyeron umbrales de rendimiento relativo (RR) del cultivo de soja del 85% y contenido de P Bray (PB) de 9 mg kg^{-1} para determinar los diferentes cuadrantes según el método de Cate y Nelson gráfico (CyNg) (Cate y Nelson, 1965). Se seleccionaron 4 sitios en cada uno de los cuadrantes: I (bajo P disponible y bajo RR), II (bajo P disponible y alto RR) y III (alto P disponible y alto RR), utilizando 3 o 4 repeticiones por sitio.

Contenido de fósforo en la materia orgánica particulada del suelo

Las muestras de suelo, extraídas de dos profundidades (0-5 cm y 5-20 cm), fueron fraccionadas utilizando el método propuesto por Cambardella y Elliott (1992) modificado, utilizando bolitas de vidrio como agente dispersante (Irizar et al., 2010). El contenido de P en la materia orgánica particulada del suelo (P-MOP) se determinó por diferencia entre el contenido de P total (PT) y el contenido de P de la fracción asociada a minerales de tamaño menor a $53 \mu\text{m}$ (P-AM), con corrección por el contenido de arena (Cambardella y Elliott, 1992). El contenido de P de las muestras de suelo fue determinado por digestión con $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ y análisis colorimétrico (Murphy y Riley, 1962; Kuo, 1990). Se calcularon los valores de las fracciones de P ponderados a una profundidad de 0 a 20 cm.

Análisis estadísticos

Se calcularon estadísticos descriptivos y correlaciones para los datos en conjunto, y por cuadrante del método de CyNg. Además, se compararon los promedios de PB, PT, P-AM y P-MOP por cuadrante mediante una prueba de t. Se determinaron los niveles críticos para cada

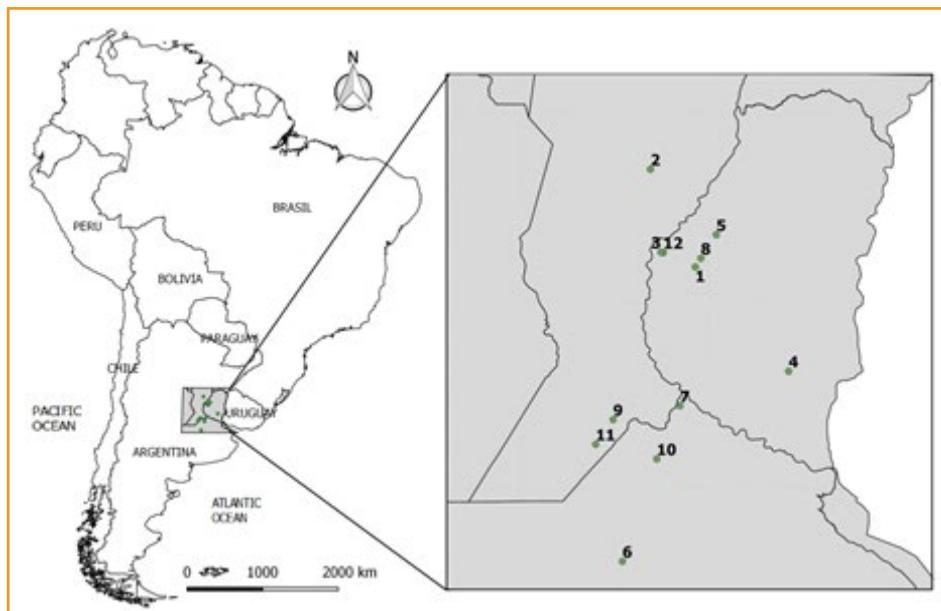


Figura 1. Localización geográfica de los sitios seleccionados de la red de ensayos de fertilización fosfatada en 2003/04, 2004/05, y 2005/06 en la Región Pampeana argentina.

fracción de P y profundidad mediante el procedimiento estadístico de Cate y Nelson (CyNe) (Cate y Nelson, 1971) utilizando el RR del cultivo de soja como variable dependiente. Se utilizó el método gráfico (CyNg) para determinar niveles críticos cuando no fue posible utilizar el método estadístico (CyNe). Se calcularon los errores de clasificación en los cuadrante II y IV del método gráfico de CyNg utilizando los datos de todas las repeticiones en cada experimento ($n=44$), como el número total de puntos en estos cuadrantes respecto del número total de puntos del gráfico. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software Infostat (Di Rienzo et al., 2011).

Resultados y discusión

El pH de los suelos varió entre 5.9 y 7.6 y el contenido de MO fue del 26 a 57 g kg⁻¹. El promedio de rendimiento del cultivo de soja varió entre 1495 y 5291 kg ha⁻¹, y la respuesta a la fertilización fosfatada, calculada como RR, estuvo entre 0.69 y 0.96 (Tabla 1). El rendimiento de soja promedio en el cuadrante I y II (PB < 9 mg kg⁻¹) fue de 2287 kg ha⁻¹ y 3132 kg ha⁻¹, respectivamente, y en ambos casos fueron significativamente menores ($p<0.01$) que el rendimiento promedio en los sitios del cuadrante III (PB > 9 mg kg⁻¹), que fue de 4508 kg ha⁻¹. El rendimiento promedio del cuadrante I fue significativamente menor al del cuadrante II y III ($p<0.01$).

Los valores de PB variaron entre 4.8 y 31.1 mg P kg⁻¹ para la profundidad de 0-20 cm. Los valores de P Bray fueron bajos y medios, considerando los niveles de clasificación establecidos por Sainz Rosas et al., (2013), excepto el sitio 12. Los contenidos de PT, P-AM y P-MOP mostraron una marcada estratificación, de manera similar a lo reportado por Ciampitti et al., (2011). La concentración de P más elevada en los primeros centímetros de suelo es favorecida por los sistemas en siembra directa por la acumulación de residuos en la superficie del suelo (Selles et al., 1997).

El contenido de P total varió entre 281 y 597 mg P kg⁻¹ a 0-5 cm, entre 245 a 540 mg P kg⁻¹ a 5-20 cm de profundidad, y entre 257 a 547 mg P kg⁻¹ a 0-20 cm. El contenido de P-AM varió entre 232 a 503 mg P kg⁻¹ a 0-5 cm, 199 a 434 mg P kg⁻¹ a 5-20 cm, y entre 208 a 446 mg P kg⁻¹ a 0-20 cm de profundidad. El contenido de P total en MOP varió entre 30 a 183 mg P kg⁻¹ a una profundidad de 0-5 cm, entre 15.7 a 167 mg P kg⁻¹ a 5-20 cm y de 19.3 a 171 mg P kg⁻¹ a 0-20 cm (Figura 2). El contenido de PT en las tres profundidades evaluadas, fue similar en los sitios del cuadrante II y III, y significativamente menor ($p<0.05$) en los sitios del cuadrante I. El contenido de P-AM fue significativamente diferente en los sitios del cuadrante I, II y III ($p<0.05$), mientras que el P-MOP no mostró diferencias significativas para los sitios de los distintos cuadrantes (Figura 2).

Tabla 1. Rendimiento (Rto) (kg ha⁻¹) y rendimiento relativo (RR) del cultivo de soja, contenido de P Bray (PB) (mg kg⁻¹), materia orgánica MO (%), pH y textura para los sitios evaluados clasificados por su ubicación en los cuadrantes de Cate y Nelson.

Cuadrante	Sitio	Rto	RR	PB	MO	pH	Arcilla	Limo	Arena
		kg ha ⁻¹		mg kg ⁻¹	%	%.....		
1	1	1613	0.69	4.8	4.5	6.7	39.9	57.5	2.6
	2	3094	0.75	7.8	3.7	5.9	21.5	73.1	5.3
	3	3002	0.66	4.9	3.2	7.1	41.2	48.1	10.8
	4	1440	0.77	4.5	5.1	7.5	37.8	58.0	4.3
2	5	2996	0.91	6.8	2.6	7.6	42.9	55.4	1.8
	6	3459	0.90	6.5	4.5	6.6	18.2	28.3	53.4
	7	3434	0.96	4.8	4.0	6.4	17.1	73.1	9.8
	8	2640	0.89	7.4	4.2	6.9	38.4	58.8	2.7
3	9	4091	0.95	11.1	3.3	6.0	22.7	58.5	18.8
	10	3701	0.96	15.2	3.6	6.2	23.2	58.5	18.3
	11	5291	0.96	12.3	4.1	6.2	21.6	53.6	24.8
	12	4949	0.99	33.8	5.7	6.4	28.0	66.1	5.9

Los contenidos de PT determinados estuvieron dentro de los rangos reportados anteriormente para la Región Pampeana (Gutierrez Boem et al., 2008; Ciampitti et al., 2011; Wyngaard et al., 2013; Suñer y Galantini, 2015). Los contenidos de P-AM fueron similares a los reportados por Suñer y Galantini (2015), aunque estos autores consideraron la fracción AM como aquella <100-µm. Los contenidos de P-MOP fueron mayores a los reportados por Ciampitti et al. (2011) y Wyngaard et al. (2013). Las diferencias podrían estar asociadas al mayor contenido de arcilla de los suelos estudiados en este trabajo,

y al efecto de protección de la materia orgánica que estas ejercen (Hassink y Whitmore, 1997). Sin embargo, los valores de P-MOP fueron menores a los reportados por Suñer y Galantini (2015), probablemente debido a que ellos estudiaron suelos de pastizales naturales en regiones con menores temperaturas. Además, se obtuvo una correlación negativa entre el P-MOP y el contenido de limo ($p < 0.01$) (Tabla 2), en concordancia a Suñer y Galantini (2015), quienes reportaron que los niveles de P-MOP disminuían cuando se incrementaba el contenido de arcilla+limo.

El contenido de P-AM y P-MOP no se relacionó con la MO ni el pH. El contenido de P-MOP no correlacionó con ninguna fracción de P evaluada en ambas profundidades y la relación P-MOP/PT varió entre 5 y 33%.

El rendimiento del cultivo de soja mostró correlación con el contenido de P-AM y con el PT, y no se relacionó con el P-MOP. El rendimiento relativo mostró relaciones similares con las mismas fracciones de P (Tabla 2).

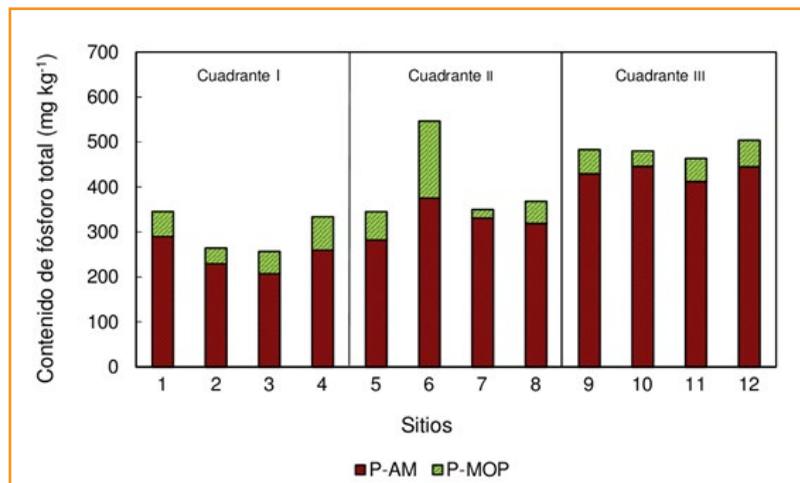


Figura 2. Contenido de P total en la materia orgánica particulada (P-MOP) y en la fracción asociada a minerales del suelo (P-AM) en los sitios evaluados a una profundidad de 0-20 cm.

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson y significancia para las variables rendimiento del cultivo de soja (Rto), rendimiento relativo (RR), contenido de P Bray (PB), contenido de materia orgánica (MO), pH, contenido de arcilla, limo y arena, contenido de fósforo total (PT), contenido de fósforo en la fracción asociada a minerales (P-AM) y contenido de fósforo en la fracción particulada de la materia orgánica (P-MOP) para una profundidad de 0-20 cm.

Rto	RR	PB	MO	pH	Arcilla	Limo	Arena	PT	P-AM	P-MOP	
Rto	1	**	*	ns	*	*	ns	ns	*	**	ns
RR	0.71	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	**	ns
PB	0.67	0.54	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
MO	0.01	0.08	0.47	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
pH	-0.59	-0.34	-0.35	-0.06	1	**	ns	ns	ns	ns	ns
Arcilla	-0.60	-0.55	-0.22	-0.12	0.81	1	ns	*	ns	ns	ns
Limo	0.02	0.09	0.22	0.05	-0.29	-0.08	1	**	ns	ns	**
Arena	0.38	0.30	-0.03	0.04	-0.30	-0.60	-0.75	1	*	ns	**
PT	0.61	0.74	0.55	0.33	-0.38	-0.53	-0.4	0.67	1	**	ns
P-AM	0.71	0.84	0.66	0.25	-0.53	-0.56	-0.07	0.43	0.92	1	ns
P-MOP	-0.05	0.01	-0.08	0.26	0.22	-0.09	-0.85	0.74	0.49	0.11	1

Referencias: ns= no significativo, * = significativo $p < 0.05$; ** = significativo $p < 0.01$. En negrita: correlaciones significativas.

Se ha reportado la correlación entre el P-AM y el PB, y se ha destacado que el PT influye en el contenido de PB, pero que la provisión de P al PB proviene principalmente desde la fracción de P inorgánico en la AM (Wyngaard et al., 2013; Suñer y Galantini, 2015). Por lo tanto, esto podría explicar la baja relación entre el PB y el P-MOP.

El nivel crítico de P para el cultivo de soja determinado utilizando el contenido de P Bray y el RR fue de 8.5 mg P kg^{-1} para una profundidad de 0-20 cm (**Figura 3a**). Para la fracción P-MOP no fue posible determinar un nivel crítico por el método de CyNe, pero sí mediante el método gráfico (CyNg) (**Figura 3b**), obteniéndose un nivel crítico de 50 mg P kg^{-1} . Se calcularon los errores de clasificación de sitios del gráfico de CyNg, siendo del 18% utilizando el PB como variable independiente, y del 39% utilizando el P-MOP.

Asimismo, se calculó un índice compuesto por el contenido de PB sumado al contenido de P-MOP (P-MOP+PB), como fracción complementaria al método comúnmente utilizado para estimar la disponibilidad de P en el suelo. Se determinó un nivel crítico de P de 62 mg kg^{-1} de P-MOP+PB, y los errores de clasificación de la metodología de CyNg fueron del 50%, (Figura 3d). Considerando la alta correlación entre el

P-AM y el RR (**Tabla 2**), se calculó un nivel crítico de 293 mg kg^{-1} de P-AM, y 7% de error de clasificación utilizando CyNe (**Figura 3c**).

El contenido de P-MOP no se relacionó con el rendimiento o rendimiento relativo del cultivo de soja, no obstante, el P-MOP está compuesto por formas inorgánicas y orgánicas de P (Wyngaard et al., 2013), y se ha determinado que el P inorgánico de la MOP es altamente variable y podría explicar parte de la variabilidad observada en el P-MOP (Suñer y Galantini, 2015). El P-MOP es una fuente potencial de P para los cultivos (Ha et al. 2008) que puede ser mineralizada durante su estación de crecimiento, pero su provisión depende de la presencia de las condiciones adecuadas para su mineralización (Condrón et al., 2005), por lo que no todo el P-MOP podría estar disponible para los cultivos. Por otra parte, se ha determinado que la MOP tiene la capacidad de adsorber P (Wyngaard et al., 2013), y que parte del P-MOP puede quedar en las partículas de los residuos o ser absorbida por los microorganismos (Ha et al., 2008).

El contenido de P en la fracción asociada a minerales del suelo se correlacionó con el RR del cultivo de soja y mostró mejor ajuste que las demás fracciones utilizando el procedimiento CyNe, sugiriendo que existe una contribución

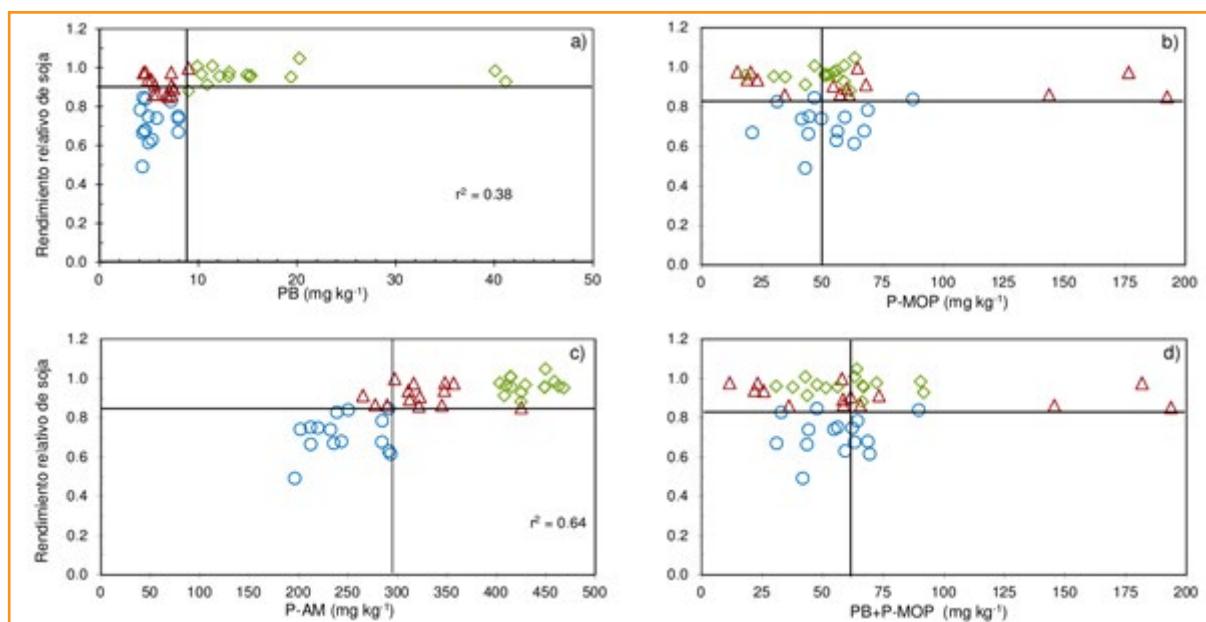


Figura 3. Relación entre el rendimiento relativo del cultivo de soja y: a) el contenido de P Bray en suelo (PB), b) el contenido de P de la materia orgánica particulada (P-MOP), c) el contenido de P de la fracción asociada a minerales (P-AM), d) la suma de los contenidos de P Bray y el P de la materia orgánica particulada (PB+P-MOP). Referencias: Rombos, triángulos, círculos: sitios del cuadrante I, II y III, respectivamente.

desde dicha fracción al P disponible para los cultivos. Algunos sitios clasificados inicialmente en el Cuadrante II de CyNg utilizando el PB, fueron reclasificados en el Cuadrante III cuando el P-AM fue utilizado como variable independiente. De esta manera, mejoró la predicción de la respuesta del cultivo de soja a la fertilización con P comparado con el PB. Se ha determinado que el 47 a 89% del contenido de P-AM es orgánico (Wei et al., 2016; Wyngaard et al., 2016), por lo cual podría suponerse que existe un aporte desde dicha fracción al P disponible para el cultivo de soja no contemplada en el P Bray.

La respuesta en rendimiento del cultivo de soja a la fertilización con P no está únicamente afectada por el contenido de P disponible en el suelo, sino también por otras variables como los cultivos antecesores, la intensidad de uso del suelo, las entradas y salidas de P del sistema. Además, las condiciones ambientales durante la estación de crecimiento del cultivo afectan la dinámica del P (Condrón et al., 2005), especialmente el suministro de P por mineralización desde las fracciones orgánicas del suelo (Sims y Pierzinski, 2005).

Conclusiones

El aporte de P desde la materia orgánica particulada no contribuyó a explicar la ausencia de respuesta a la fertilización en sitios con bajos contenidos de P Bray en sistemas en siembra directa, y mostró menor capacidad predictiva de la respuesta del cultivo de soja a la fertilización fosfatada que la metodología de P Bray utilizada habitualmente en la región pampeana.

El P de la fracción asociada a minerales se relacionó con el rendimiento relativo del cultivo de soja, determinándose un nivel crítico de 293 mg kg⁻¹ de P-AM a una profundidad de 0-20 cm. El contenido de P-AM mejoró la predicción de la respuesta del cultivo de soja a la fertilización fosfatada en comparación al P Bray.

Agradecimientos

Los experimentos utilizados en este trabajo fueron seleccionados de una red financiada por INTA-INPOFOS-MOSAIC (Melchiori, Ferrari, Fontanetto, 2004-2006). Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto PNSUELO-1134024 y ERIOS-1263102 de INTA.

Bibliografía

- Beegle, D. 2005. Assessing soil phosphorus for crop production by soil testing. En: Phosphorus: Agriculture and the Environment, Agronomy Monograph. ASA, CSSA, SSSA. Madison, WI, USA. 46: 123-143.
- Belinque, H., N. Pucheu, N. Kerber y G. Rubio. 2015. Utilization of organic phosphorus sources by oilseed rape, sunflower, and soybean J. Plant Nutr. Soil Sci. 178: 339-344.
- Bescansa, P., M.J. Imaz, I. Virto, A. Enrique, y W.B. Hoogmoed. 2006. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. Soil y Tillage Research 87: 19-27.
- Bray, R.H. y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soil. Soil Sci. 59:39-45.
- Cambardella, C.A. y E.T. Elliott. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. Soil Sci. Soc. Am. J. 56:777-783
- Cate, R.B. y L.A. Nelson. 1965. A rapid method for correlation of soil test analyses with plant response data. North Carolina Agric. Exp. Stn., Int. Soil Testing Series Tech. Bull. N° 1
- Cate, R.B. y L.A. Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35:658:659.
- Ciampitti, I.A., F.O. Garcia, L.I. Picone y G. Rubio. 2011. Soil carbon and phosphorus pools in field crop rotations in Pampean soil of Argentina. Soil Sci. Soc. Am. J. 75:616-625.
- Condrón, L.M., B.L. Turner y J. Cade-Menun. 2005. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. En: J.T. Sims y A.N. Sharpley (Ed) Phosphorus: Agriculture and the Environment p. 87-121. Am. Soc. Agr., Madison, WI.
- Damon, P.M., B. Bowden, T. Rose y Z. Rengel. 2014. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. Soil Biology y Biochemistry 74: 127-137.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Gee, G.W. y J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis.. En: Klute, A. (Ed.). Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph 9 (2ed). 383-411. American Society of Agronomy, Madison, WI
- Gutierrez Boem, F., C. Alvarez, M. Cabello, P. Fernandez, A. Bono, P. Prystupa, y M. Taboada. 2008. Phosphorus retention on soil surface of tilled and no-tilled soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 72 (4): 1158-1162.
- Gutiérrez Boem, F.H., F.O. García, y M. Boxler. 2010. ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para soja, maíz y trigo?. En: Simposio Fertilidad 2011. La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de producción. IPNI Fertilizar AC. Rosario, Santa Fe. pp. 191-193
- Ha, K.V, P. Marschner, y E. K. Bünemann. 2008. Dynamics of C, n, P and microbial community composition in particulate soil organic matter during residue decomposition. Plant Soil 303:253-264.

- Hassink, J., y A.P. Whitmore. 1997. A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 131-139.
- Heckman, J.R., W. Jokela, T. Morris, D.B. Beegle, J.T. Sims, F.J. Coale, S. Herbert, T. Griffin, B. Hoskins, J. Jemison, W.M. Sullivan, D. Bhumbra, G. Estes, y W.S. Reid. 2006. Soil test calibration for predicting corn response to phosphorus in the northeast USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 90:280-288.
- Hedley, M.J., J.W.B. Stewart, y B.S. Chahuan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 970-976.
- Irizar, A., A. Andriulo, D. Consentino, y C. Amendola. 2010. Comparación de dos métodos de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo. *Ci. Suelo (Argentina)* 28 (1): 115-121.
- Kuo, S. 1990. Phosphorus. En: *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series n° 5.*
- Mallarino, A. 2003. Field calibration for corn of the Mehlich-3 soil phosphorus test with colorimetric and inductively coupled plasma emission spectroscopy determination methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1928-1934.
- Melchiori, R.J.M., M. Ferrari, H. Fontanetto, y S.M. Albarrenque. 2008. Fertilidad fosfatada en soja en siembra directa: aporte de la fracción orgánica lábil. *Actas XXI Congreso Argentino de Ciencias del Suelo. Potrero de Los Funes, San Luis.*
- Murphy, J., y H.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27:31-36.
- Raghothama, K.G. 2005. Phosphorus and plant nutrition: an overview. In: J.T. Sims, and A. Sharpley, editors. *Phosphorus: agriculture and the environment. Am. Soc. Agr., Madison, WI.* p. 355-378.
- Roldán, A., J.R. Salinas-García, M.M. Alguacil, y F. Caravaca. 2005. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. *Applied Soil Ecology* 30:11-20.
- Sainz Rozas, H., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P. Barbieri, H. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris, y M. Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos?. *Actas del Simposio de Fertilidad 2013. Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable.* 62-72.
- Salas, A.M., E.T. Elliott, D.G. Westfall, C.V. Cole, y J. Six. 2003. The Role of Particulate Organic Matter in Phosphorus Cycling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:181-189.
- Selles, F. 2003. Influencia de la siembra directa en la dinámica del fósforo en el suelo. *Actas Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.* pp. 12-19.
- Selles, F., C.A. Campbell, y R.P. Zentner. 1995. Effect of Cropping and Fertilization on Plant and Soil Phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:140-144.
- Selles, F., R.A. Kochhann, J.E. Denardin, R.P. Zentner, y A. Faganello. 1997. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil y Tillage Research* 44: 23-34.
- Sharpley, A. N. 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:905-911.
- Sims, J.T., y G.M. Pierzinski. 2005. Chemistry of phosphorus in soils. En: M.A. Tabatabai y D.L. Sparks (ed.) *Chemical processes in soils. SSSA Book Ser. 8. SSSA, Madison, WI.*
- Stevenson, F.J. 1986. *Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients.* Ed. John Wiley y Sons. pp. 380.
- Stewart, J., y A. Sharpley. 1987. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. En: R. Follet, J. Stewart y C. Cole (ed.) *Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. SSSA Spec. Pub. No. 19. SSSA-ASA. Madison, Wisconsin, EE.UU.*
- Suñer, L., y J.A. Galantini. 2015. Texture influence on soil phosphorus content and distribution in semiarid pampean grasslands. *IJPSS* 7(2):109-120.
- Suñer, L.G., J. A. Galantini, R.A. Rosell, y M.D. Chamadoira. 2002. Cambios en el contenido de las formas de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana cultivados con trigo (*Triticum aestivum*). *Rev. Fac. Agron., La Plata* 104(2):105-111.
- Thien, S.J., y R Myers. 1992. Determination of bioavailable phosphorus in soil. *Soil Sci Soc Am J.* 56:814-818
- Tiessen, H., J.W.B. Stewart, y A. Oberson. 1994. Innovative soil phosphorus availability indices. Assessing organic phosphorus. En: J.L. Havlin y J.S. Jacobsen (eds.) *Soil testing: prospects for improving nutrient recommendations.* *Soil Sci. Soc. Am. Spec., Madison, WI.* 40:143-162.
- Tracy, P.W., D.G. Westfall, G.A. Peterson, E.T. Elliott, y C.V. Cole. 1990. Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Sulfur Mineralization in Plow and No-Till Cultivation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 (2): 457-461.
- Van Lierop, W. 1990. Soil pH and lime requirements determination. 73-126. En: Westerman, R.L. (Ed). *Soil testing and plant analysis.* 3er ed.
- Walkley, A. y I.A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37 (1): 29-38.
- Wei, Z., J. Wu, X. Yan y G. Ni. 2016. Phosphorus and carbon status of a paddy soil under different fertilization regimes. *J. Soils Sediments* 16(1):1-8
- Wyngaard, N., A. Vidaurreta, H.E. Echeverría, y L.I. Picone. 2013. Dynamics of phosphorus and carbon in the soil particulate fraction under different management practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:1584-1590.
- Wyngaard, N., M. L. Cabrera, K.A. Jarosch, y E.K. Bünemann. 2016. Phosphorus in the coarse soil fraction is related to soil organic phosphorus mineralization measured by isotopic dilution. *Soil Biol. Biochem.* 96:107-118
- Zamuner, E., L.I. Picone, y H.E. Echeverría. 2007. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. *Soil y Tillage Research* 99: 131-138. ●

Fertilización nitrogenada con dosis variable en el Sudeste Bonaerense ¿Donde se justifica?

Eduardo Daniel Arana^{1,*} y Agustín Pagani^{1,2}

¹Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce.

²Clarion, 9 de Julio, Buenos Aires.

*Contacto: arana.eduardo@inta.gob.ar

Introducción

El nitrógeno (N) es el nutriente que limita con mayor frecuencia la producción del maíz en la región pampeana argentina (Sainz Rozas et al., 2011). En este sentido, la fertilización nitrogenada es una práctica habitual, representando una importante fracción del costo de producción del cultivo, por lo que el manejo del N tiene un alto impacto económico (Pagani et al., 2008). Además, este nutriente tiene grandes implicancias ambientales ya que su uso en exceso puede derivar en pérdidas del sistema con consecuencias negativas sobre la calidad del agua y aire (Aparicio et al., 2008).

En la actualidad, existen estudios nacionales que muestran como variaciones en las propiedades edáficas a nivel intra-lote determinan que el nivel óptimo de fertilizante nitrogenado a aplicar varíe espacialmente de manera considerable (Gregoret et al., 2006; Peralta et al., 2013; Puntel y Pagani, 2013). En estas condiciones, el manejo tradicional de N con dosis uniforme puede potencialmente derivar en la subfertilización en algunas áreas y sobrefertilización en otras (Scharf et al., 2005).

Diferentes estrategias han sido propuestas sobre las cuales basar la fertilización nitrogenada con dosis variable. El enfoque llamado "proactivo" requiere de la previa delimitación de áreas homogéneas dentro del lote que se asume responderán de manera uniforme a la aplicación de N, llamadas zonas de manejo (ZM) (Sawyer, 1994). En este sentido, se han propuesto numerosos criterios para la delineación de ZM de N como el uso de mapas de rendimiento de cultivos anteriores, cartas de suelo, altimetría, mapas de CEa, muestreo de suelo en grilla, mapas de profundidad de tosca, napa u horizonte thapto, fotografías aéreas, imágenes satelitales,

etc. (Wibawa et al., 1993; Doolittle et al., 1994; Kravchenko y Bullock, 2000; Fraisse et al., 2001; Kaspar et al., 2004; Shaner et al., 2008, Peralta et al., 2015).

Entre los atributos del suelo asociados al rendimiento y su variabilidad espacio-temporal, la disponibilidad de agua es considerada como la de mayor significancia en agricultura de secano. La capacidad de retención hídrica del suelo según la posición en el paisaje y la profundidad efectiva se ha utilizado para predecir la variabilidad espacial del rendimiento de maíz y otros cultivos (Wright et al., 1990; Sadras y Calviño, 2001). En este sentido en el Sudeste Bonaerense (SEB), las condiciones del suelo suelen ser espacialmente heterogéneas y complejas a escala de lote agrícola (Amiotti et al., 2001), especialmente debido a la presencia de un horizonte petrocálcico que limita la profundidad efectiva del suelo, localmente conocido como "tosca" (Domenech et al., 2017). La tosca, además de limitar el rendimiento (Calviño et al., 2003), tiene un efecto directo sobre la dinámica espacial de otras propiedades del suelo tales como la materia orgánica (MO) y el contenido de arcilla (Cabria y Culot, 1994; Castro Franco et al., 2015). Por otro lado se han reportado evidencias de que la tosca influencia la respuesta a la fertilización nitrogenada. En este sentido, Calviño et al. (2002) reportaron que la respuesta en rendimiento del cultivo de trigo a la fertilización nitrogenada y los umbrales hasta los cuales se observaba respuesta eran mayores en suelos profundos que en suelos someros y asociaron estas diferencias a la disponibilidad de agua en cada uno de los distintos tipos de suelos.

En la actualidad no son abundantes los trabajos que evalúan la variabilidad espacial de la respuesta a N y la DOE para el cultivo de maíz en lotes de producción, utilizando tecnologías de agricultura de precisión. El desarrollo de fun-

ciones de respuesta a N en forma sitio-específica para el cultivo de maíz en el SEB es necesario para mejorar el diagnóstico de las necesidades de este nutriente y posibilitar la fertilización con dosis variable siguiendo un criterio técnicamente sólido.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el uso de mapas de profundidad efectiva de suelo como una herramienta para delinear zonas dentro del lote con respuesta diferencial a la fertilización nitrogenada para el cultivo de maíz en el SEB.

Materiales y Métodos

En la campaña 2013-14 se realizaron 3 ensayos de fertilización con N en Benito Juárez y 2 en Balcarce, mientras que en el ciclo 2014-15 se condujeron 2 ensayos en cada localidad. Se evaluaron ocho dosis de N (13, 38, 63, 88, 113, 138, 163 y 213 kg N ha⁻¹) como urea (46-0-0) aplicadas al momento de la siembra en Benito Juárez y al estadio de 6 hojas desarrolladas (V6, Ritchie y Hanway, 1982) en Balcarce. La forma de aplicación fue incorporada en el suelo en el entresurco de siembra.

Los ensayos fueron sembrados usando la maquinaria de cada establecimiento. En todos los casos se aplicaron aproximadamente 26 kg P ha⁻¹ como fosfato monoamónico (11-52-0) a la siembra en toda el área experimental. Los ensayos se mantuvieron libres de malezas, plagas y enfermedades. Se utilizaron los híbridos DK 692 VT3PRO (Monsanto) y el AX852 RRMG (Nidera) en Balcarce y Benito Juárez, respectivamente, con una densidad de siembra 75000 pl ha⁻¹. La fecha de siembra fue el 1 y el 3 de noviembre para Benito Juárez y Balcarce, respectivamente.

El diseño de ensayos fue en franjas con bloques completos aleatorizados (DBCA) y 2 repeticiones, utilizando una metodología similar a la reportada por Scharf et al. (2005); Bermúdez y Mallarino (2007); Pagani y Mallarino (2015). El ancho de la franja fue igual al ancho de trabajo de la fertilizadora (9.8 m) y el largo fue igual al largo del lote (de 430 a 1500 m).

Mediante un esquema de muestreo en grilla sistemático con celdas de 30 x 30 m, se realizó la determinación georreferenciada de la profundidad efectiva del suelo en todos los sitios

experimentales usando un muestreador manual y un GPS de alta precisión. Dependiendo del sitio, dos impedancias físicas fueron identificadas a profundidad variable: por un lado un manto lítico asociado a sistemas serranos y por otro lado el horizonte petrocálcico compuesto por carbonato de calcio endurecido y cementado (Cabria y Culot, 1994). Se realizó la interpolación de los valores de profundidad efectiva de suelo (**Figura 1**) relevados con el procedimiento Krigging ordinario, el cual cuantifica la estructura espacial de los datos usando semivariogramas (Oliver, 2010) y realiza predicciones en zonas no relevadas asumiendo que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que disminuye conforme se aleja del punto de interés (Bullock et al., 2007).

Dependiendo de la variabilidad del sitio, se delimitaron dos o tres ZM en función de la profundidad efectiva de suelo, utilizando el método de la clasificación difusa fuzzy c-medias contenido en el programa "Management Zone Analyst" (MZA) (Fridgen et al., 2004).

Se cosecharon los 10 surcos centrales de cada franja con cosechadoras equipadas con monitor de rendimiento y DGPS utilizando una metodología similar a la reportada en trabajos previos (Scharf et al., 2005; Bermúdez y Mallarino, 2007; Pagani y Mallarino, 2015). Los mapas de rendimiento generados fueron procesados mediante el programa Yield Editor 2.0 (USDA, 2014), Spatial Management System (Ag Leader, 2014) y ArcGIS (ESRI, 2014). Se dividieron las franjas con los tratamientos de N en transectas de 20 m de longitud y se promediaron los puntos de rendimiento dentro cada transecta y para cada dosis de N. Finalmente, se obtuvieron promedios de rendimiento para cada dosis de N y ZM de profundidad efectiva de suelo. Con esta información, se ajustaron curvas de respuesta del rendimiento de maíz a la fertilización nitrogenada usando el modelo cuadrático o cuadrático plateau, según lo sugerido por Cerrato y Blackmer (1990). Mediante el método de la derivada primera y la relación de precios histórica N:grano de maíz de 10:1, se determinó para cada curva la DOEN de manera similar a lo reportado por Pagani et al. (2008).

Tabla 1. Identificación de cada sitio experimental en función de la localidad y la campaña agrícola. Tipo y series de suelo predominantes.

Sitio	Partido	Lote	Campaña	Tipo de suelo	Serie
1	Balcarce	8SM	2013-14	Argiudol Típico	Mar Del Plata
2	Balcarce	4EP	2013-14	Argiudol Típico	Mar Del Plata
3	Benito Juárez	12	2013-14	Argiudol Típico	Tandil
4	Benito Juárez	13A	2013-14	Argiudol Típico	Tandil
5	Benito Juárez	13B	2013-14	Argiudol Típico	Tandil
6	Balcarce	7LC	2014-15	Argiudol Típico	Mar Del Plata
7	Balcarce	8LC	2014-15	Argiudol Típico	Mar Del Plata
8	Benito Juárez	37A	2014-15	Argiudol Lítico/Típico	Cinco Cerros/Azul
9	Benito Juárez	11	2014-15	Paleudol Petrocálcico	Azul

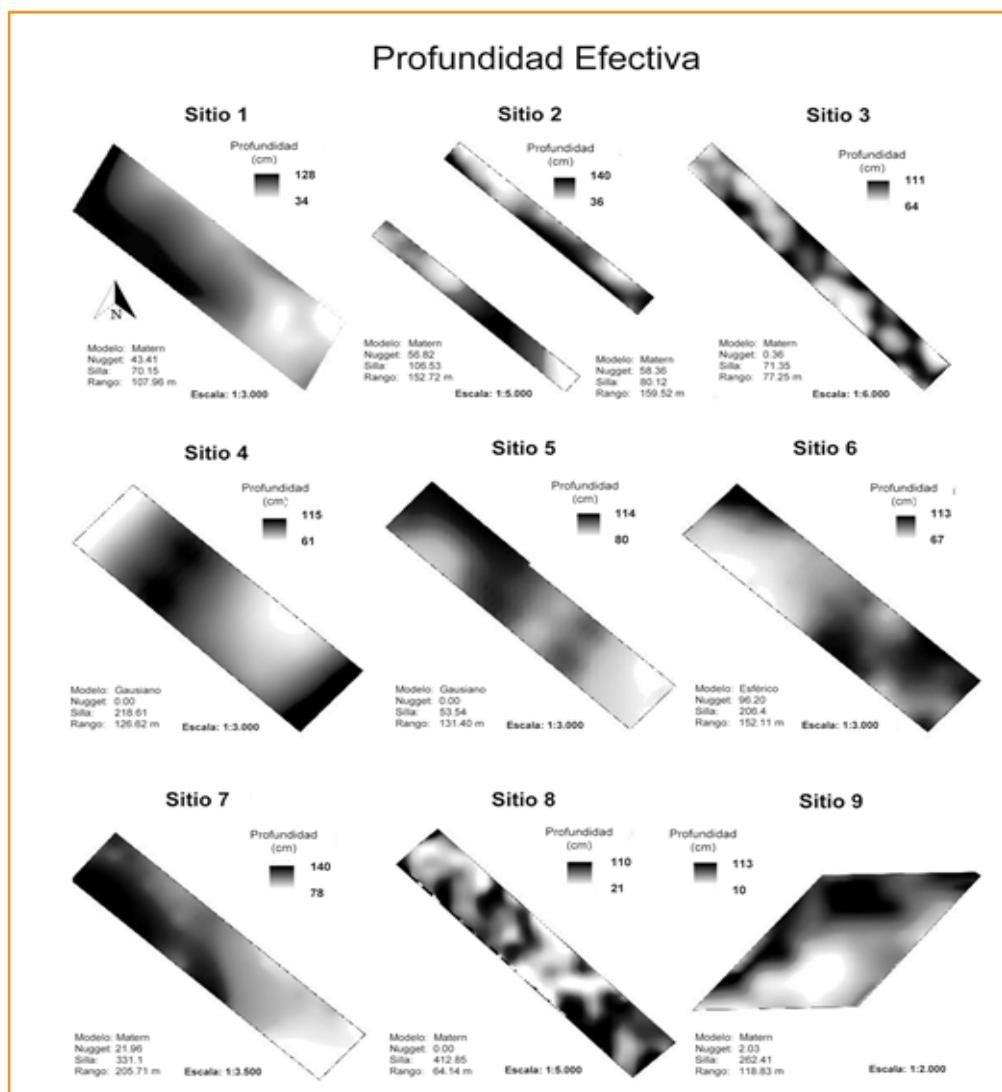


Figura 1. Distribución espacial de la profundidad efectiva de suelo para los 9 sitios de Balcarce y Benito Juárez. Modelo de interpolación utilizado según el método Krigging ordinario y parámetros del semivariograma ajustado.

Resultados y discusión

Caracterización meteorológica de las campañas

Las precipitaciones acumuladas durante el ciclo del cultivo para ambas localidades y campañas fueron inferiores respecto al promedio histórico, lo que sumado a temperaturas estivales superiores a la media de cada localidad derivó en balances hídricos negativos (datos no mostrados). Esta situación generó condiciones restrictivas para el crecimiento del cultivo, el rendimiento (Calviño et al., 2003) y la respuesta a N.

Análisis de rendimiento promedio del sitio en función de la dosis de N

La **Figura 2** muestra las curvas respuesta del rendimiento del maíz a la fertilización nitrogenada a través de las franjas que atravesaron todo el lote para las 9 localidades. El estudio de las curvas de respuesta a nivel de franja, que sería equivalente al uso de información proveniente de tolvas con balanza normalmente empleadas en agricultura de producción, es relevante para demostrar como la consideración de las respuestas promedio puede parcialmente enmascarar el impacto de la fertilización y en algunos casos derivar en conclusiones erróneas (Scharf et al., 2005; Pagani y Mallarino, 2015).

En términos generales, las condiciones de estrés hídrico que se presentaron en ambas campañas restringieron el rendimiento y la respuesta a N. En este sentido, el rendimiento máximo ante suficiencia de N no superó en ningún caso los 11000 kg ha⁻¹ y estuvo por debajo de 10000 kg ha⁻¹ en 5 de los 9 sitios (**Figura 2**). Estos rendimientos máximos son inferiores a los generalmente observados en el SEB (Pagani et al., 2008). Por otro lado, las respuestas máximas a la aplicación de N (diferencia entre el rendimiento a la DOE y el rendimiento del testigo sin N) fueron variables dependiendo del sitio pero en general fueron mayores para la campaña 2013/14, especialmente en los Sitios 6, 8 y 9 (**Figura 2**). Los máximos incrementos de rendimiento por fertilización nitrogenada (con respecto al rendimiento del testigo sin N) fueron de 23, 24, 6, 29, 13, 46, 34, 48, y 42% para las sitios 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, respectivamente. Numerosos estudios nacionales e internacionales demuestran claramente como la capacidad del cultivo de maíz para res-

ponder a la fertilización nitrogenada interactúa con la disponibilidad hídrica del suelo (Al-Kaisi y Yin, 2003; Kim et al., 2008; Rimski-Korsakov et al., 2009). Esta interacción puede manifestarse a nivel temporal (Pagani et al., 2008), a nivel espacial (Gregoret et al., 2011) o a ambos niveles (Lambert et al., 2006).

El modelo cuadrático fue selecto como el más apropiado para representar la relación entre el rendimiento de maíz y la dosis de N aplicada utilizando la información promedio del sitio. En todos los casos a excepción del Sitio 5 y 7, el rendimiento del maíz tendió a disminuir a medida que aumentó la dosis de N luego de alcanzado el rendimiento máximo. Este comportamiento no era esperado con el rango de dosis empleadas en este trabajo (Scharf et al., 2005) y puede estar relacionado con el estrés hídrico (Calviño et al., 2003) y/o con la variabilidad típica asociada a los experimentos en franja (Pagani y Mallarino, 2015). En el cultivo de trigo existen evidencias que indican una disminución en el rendimiento con altas dosis de N en condiciones de deficiencias hídricas, debido al agotamiento del agua en el suelo en periodos vegetativos y por ende condiciones de mayor estrés hídrico durante las etapas de definición del rendimiento (Debaeke y Aboudrare, 2004). Sin embargo, para el cultivo de maíz este comportamiento no ha sido reportado de manera generalizada (Scharf et al., 2005).

Si bien este análisis aporta valiosa información acerca de la respuesta promedio de cada sitio, ignora por completo la distribución espacial del rendimiento, la respuesta a N y la DOE dentro de cada lote. Lo anterior no es un problema grave en campos relativamente homogéneos en cuanto a sus características edáficas, topográficas y de manejo previo. Sin embargo, considerando el nivel de variabilidad espacial de la mayoría de los lotes de producción del SEB y los seleccionados en este trabajo, es evidente que este análisis es limitado. Por lo tanto a continuación se estudió la variación de la respuesta a N dentro de cada sitio considerando la profundidad efectiva del suelo.

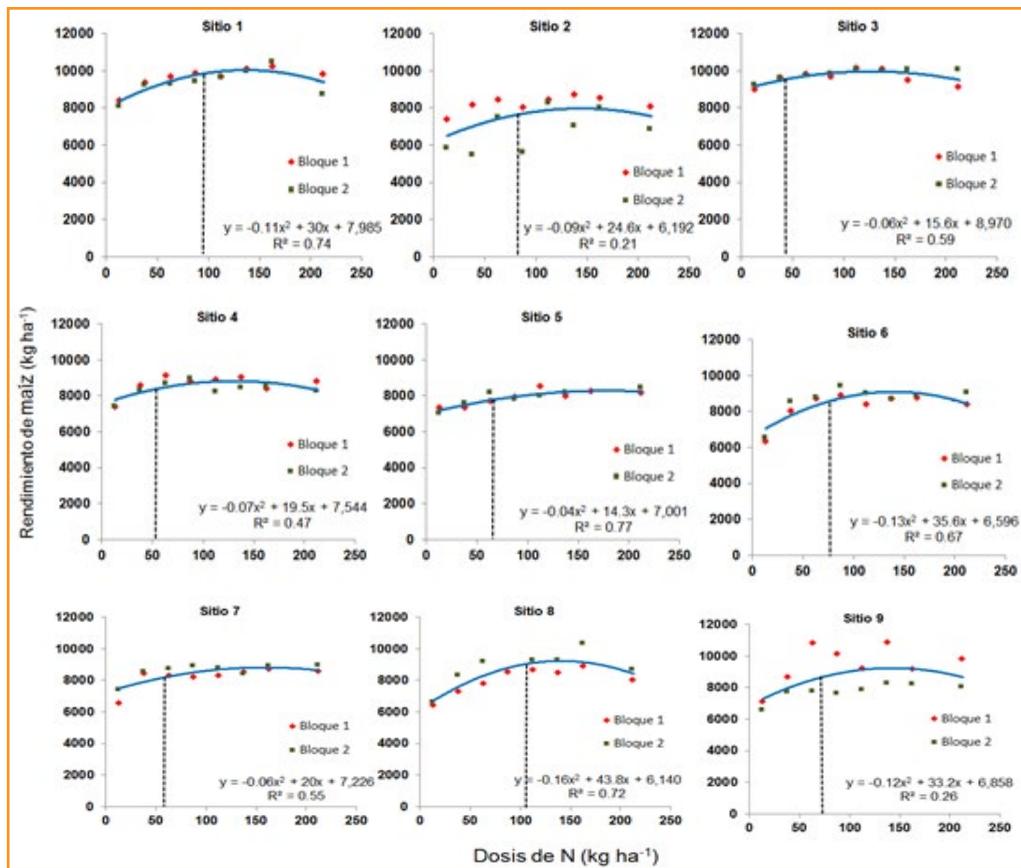


Figura 2. Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicada considerando el promedio de cada franja para los 9 sitios de los partidos de Balcarce y Benito Juárez en las campañas 2013/14 y 2014/15. Las líneas punteadas indica la dosis óptima económica de N.

Análisis por zonas de manejo según profundidad efectiva del suelo

La **Figura 3** muestra la relación entre el rendimiento de maíz en función de la dosis de N aplicada para cada sitio y zona de manejo delineada según la profundidad efectiva del suelo. Como era esperable, en todos los sitios (excepto en los Sitio 3 y 5 que contaron con suelos profundos) el rendimiento máximo, sin limitaciones de N se incrementó a medida que lo hizo la profundidad efectiva del suelo de la ZM. Si bien el rendimiento del cultivo con dosis subóptimas siguió la misma tendencia, los incrementos (a medida que se incrementó la profundidad efectiva del suelo) fueron variables dependiendo del sitio. Como se encuentra ampliamente difundido, la tosca y el manto lítico disminuyen el rendimiento de los cultivos, debido a una reducción de la disponibilidad de agua y nutrientes, sumado a la impedancia mecánica que limita la elongación radicular (Sadras, Calviño, 2001). Esta condición

es particularmente crítica en años con balances hídricos negativos durante el período reproductivo del cultivo como las dos campañas evaluadas.

Analizando conjuntamente todos los sitios y zonas de manejo, se observó una débil relación lineal y positiva del rendimiento del testigo sin N ($R^2=0.24$) y del rendimiento máximo ($R^2=0.20$) con la profundidad efectiva de la zona de manejo, pero no se estableció asociación alguna con la respuesta o la DOE (datos no mostrados). Estos resultados no son los originalmente esperados teniendo en cuenta que en años secos normalmente se observan mejores asociaciones entre el rendimiento y la profundidad efectiva de suelo ya que las zonas someras ven severamente afectada su productividad (Sadras y Calviño, 2001; Calviño et al., 2003; Peralta et al., 2013). Por otro lado también se esperaba encontrar algún grado de asociación entre la respuesta a N y la profundidad efectiva del suelo en concordancia con lo reportado por Calviño et al. (2002).

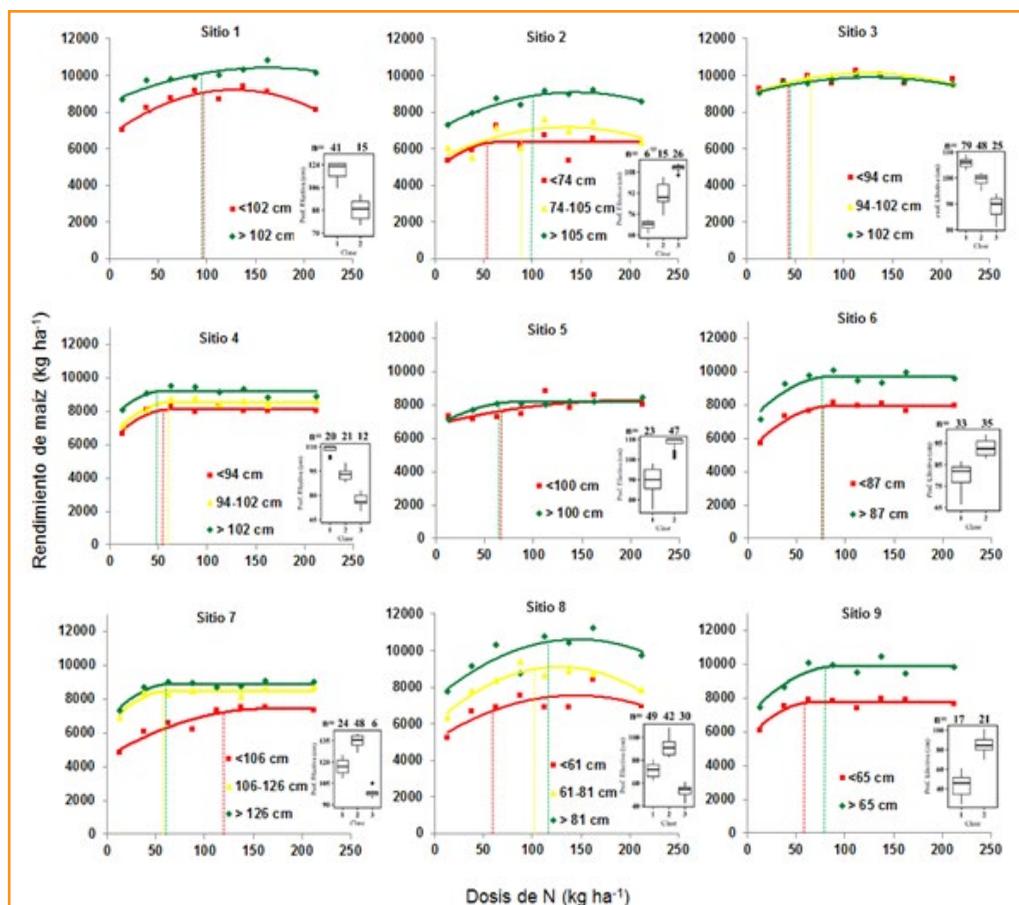


Figura 3. Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicada para cada zona de manejo delineadas en base a la profundidad efectiva del suelo (cm) para los 9 sitios de los partidos de Balcarce y Benito Juárez en las campañas 2013/14 y 2014/15. Los gráficos de caja internos representan la distribución de la profundidad efectiva del suelo dentro de las 2 o 3 clases generadas. El símbolo n hace referencia al número de transectas incluidas en cada clase de profundidad efectiva del suelo. Las líneas verticales indican la DOE de cada ZM.

Sin embargo, considerando solamente los Sitios 1, 2, 8 y 9, que fueron los que presentaron mayor variabilidad en la profundidad efectiva del suelo (con áreas tan someras como 20 cm) se observaron relaciones positivas y particularmente robustas entre esta variable y el rendimiento, la respuesta a N y la DOE (Figura 4) cuando se agruparon los valores de profundidad efectiva de suelo en incrementos de 20cm. Para este análisis se agruparon los sitios por localidad debido a la diferente magnitud de rendimiento y respuesta a N observada. Mediante este análisis pudo establecerse que en las dos campañas evaluadas, la DOE de N para el cultivo de maíz se incrementó en 0.53 y 0.82 kg N ha⁻¹ para Balcarce y Benito Juárez, respectivamente, por cada cm de incremento en la profundidad efectiva del suelo en el rango evaluado (desde 20 cm a ausencia de limitaciones).

Se considera a esta relación como un resultado muy interesante teniendo en cuenta los múltiples y complejos factores que afectan la respuesta a N en el cultivo de maíz (Havlin et al., 2005).

Es probable que ante un escenario de precipitaciones normales o por encima del promedio de la región, los patrones de rendimiento y respuesta a la fertilización nitrogenada varíen significativamente en relación a los observados en este trabajo. Es esperable que el efecto de la profundidad efectiva del suelo sobre el rendimiento, la respuesta a N y la DOE pierda importancia relativa en años con condiciones hídricas más favorables donde el perfil del suelo se recargue más frecuentemente. Ante esta situación y en lotes con características similares a los seleccionados para este trabajo, sería lógico que disminuya la variabilidad espacial del

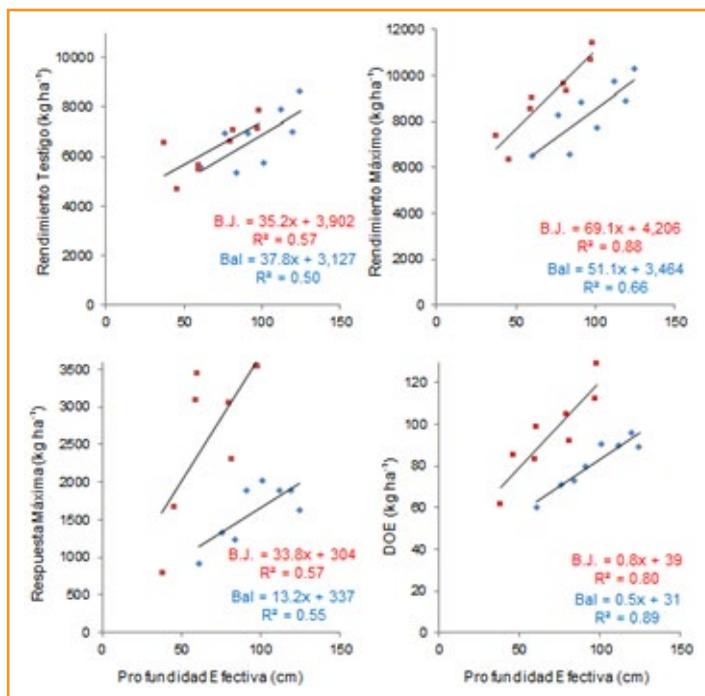


Figura 4. Rendimiento del testigo sin nitrógeno (N), rendimiento máximo, respuesta máxima y dosis óptima económica (DOE) de N en función de la profundidad efectiva expresada en incrementos de 20cm para los Sitios 1, 2 (Balcarce), 8 y 9 (Benito Juárez) en las campañas 2013/14 y 2014/15.

rendimiento y de la respuesta a N respecto a lo observado en las dos campañas evaluadas. Más aún, en condiciones hídricas muy favorables podría esperarse mayor respuesta a la fertilización N en los sectores someros que en los profundos ya que los primeros normalmente se asocian con menor capacidad para mineralizar N.

Otro posible escenario hubiese sido el retraso de la fecha de siembra del cultivo a fin de ubicar el período crítico para la determinación del rendimiento en un momento de menor demanda atmosférica, disminuyendo así el estrés hídrico en el momento de mayor sensibilidad. Si bien este escenario hubiese hipotéticamente contribuido a obtener mayores rendimientos máximos incrementando la demanda de N por parte del cultivo, especular sobre el posible efecto de este desplazamiento temporal sobre la oferta de N del suelo sería dificultoso. Normalmente, atrasos en la fecha de siembra se asocian con mejores condiciones para la mineralización de N, aunque esto y la capacidad del cultivo de absorber en N mineralizado dependen fuertemente de humedad del suelo. Consecuentemente, el efecto del atraso en la fecha de siembra sobre los patrones

de rendimiento y respuesta a la fertilización nitrogenada hubiesen dependido de la sincronía entre las precipitaciones y los períodos claves durante el ciclo del cultivo.

Consideraciones finales

Los sitios seleccionados presentaron los niveles y patrones de variabilidad típicos del SEB por lo que los resultados de este trabajo serían extrapolables a toda la zona. Sin embargo, las condiciones de estrés hídrico que sufrió el cultivo durante ambas campañas no representan apropiadamente la condición meteorológica promedio del SEB, lo que parcialmente limita los alcances de los resultados obtenidos.

En ambas campañas, la escasez de precipitaciones condicionó severamente la disponibilidad de agua para el cultivo durante el período reproductivo, lo que limitó el rendimiento y la respuesta a N.

Los sitios presentaron diferente grado de variabilidad espacial en el rendimiento del testigo sin N, el rendimiento a la

DOE, la respuesta máxima a N y la DOE. Dicha variabilidad estuvo o no asociada a la profundidad efectiva del suelo, dependiendo del sitio. Considerando todos los sitios, el rendimiento del cultivo y la respuesta a N tendieron a aumentar a medida que lo hizo la profundidad efectiva del suelo. Sin embargo, considerando sólo los cuatro sitios con mayor variabilidad en la profundidad efectiva de suelo, se pudo establecer una relación consistente entre esta variable y la DOE dentro y a través de sitios selectos. Esta información puede ser utilizada directamente por productores y técnicos de la región como herramienta sobre la cual basar la generación de un mapa de prescripción sitio-específica de N para el cultivo de maíz.

Se espera que los resultados de este trabajo sean de algún modo generadores de nuevas líneas de investigación que contribuyan a entender en que situaciones el uso de herramientas de agricultura de precisión orientadas al manejo sitio-específico de N es económica y ecológicamente conveniente.

Bibliografía

- Al-Kaisi M.M., y X. Yin. 2003. Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. *Agron J.* 95:1475-1482.
- Amiotti N., M. del C. Blanco, y L.F. Sanchez. 2001. Complex pedogenesis related to differential aeolian sedimentation in microenvironments of the southern part of the semiarid region of Argentina. *Catena.* 43:137-156.
- Aparicio V., J.L. Costa, y M. Zamora. 2008. Nitrate leaching assessment in a long-term experiment under supplementary irrigation in humid Argentina. *Agric Water Manage.* 95:1361-1372.
- Bermudez, M., y A.P. Mallarino. 2007. Impacts of variable-rate phosphorus fertilization based on dense grid soil sampling on soil-test phosphorus and grain yield of corn and soybean. *Agron. J.* 99:822-832.
- Bullock, D.S., N. Kitchen, y D.G. Bullock. 2007. Multidisciplinary Teams: A Necessity for Research in Precision Agriculture Systems. *Crop Sci.* 47:1765-1769.
- Cabria, F., y J.P. Culot. 1994. Selección y utilización de características edáficas para discriminar series de Argiudoles en el sudeste bonaerense. *Ciencia del suelo.* 12:41-45.
- Calviño, P., F. Andrade, y V. Sadras. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agron J.* 95:275-281.
- Calviño, P., H. Echeverría, y M. Redolatti. 2002. Diagnóstico de nitrógeno en trigo con antecesor soja bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del suelo.* 20:36-42.
- Castro Franco, M., J.L. Costa, N. Peralta, y V. Aparicio. 2015. Prediction of Soil Properties at Farm Scale Using a Model-Based Soil Sampling Scheme and Random Forest. *Soil Sci.* 180:1-12.
- Debaeke, P., y A. Aboudrare. 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *Eur J Agron.* 21:433-446.
- Domenech, M.B., M. Castro-Franco, J.L. Costa, y N.M. Amioti. 2017. Sampling scheme optimization to map soil depth to petrocalcic horizon at field scale. *Geoderma.* 290:75-82.
- Doolittle, J.A., K.A. Sudduth, N.R. Kitchen, y S.J. Indorante. 1994. Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. *J Soil Water Conserv.* 49:572-575.
- Fraisse, C., K. Sudduth, N. Kitchen. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Trans ASAE.* 44:155-166.
- Fridgen, J.J., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, S.T. Drummond, W.J. Wiebold, y C.W. Fraisse C.W. 2004. Management zone analyst (MZA). *Agron J.* 96:100-108.
- Gregoret, M.C., J. Dardanelli, R. Bongiovanni, y M. Díaz-Zorita. 2006. Modelo de respuesta sitio-especifica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. *Ciencia del suelo.* 24:147-159.
- 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.
- Kaspar, T.C., D.J. Pulido, T.E. Fenton, T.S. Colvin, D.L. Karlen, D.B. Jaynes, y D.W. Meek. 2004a. Relationship of corn and soybean yield to soil and terrain properties. *Agron J.* 96:700-709.
- Kaspar, T.C., D.J. Pulido, T.E. Fenton, T.S. Colvin, D.L. Karlen, D.B. Jaynes, y D.W. Meek. 2004b. Relationship of Corn and Soybean Yield to Soil and Terrain Properties. *Agron. J.* 96:700-709.
- Kim, K., D.E. Clay, C.G. Carlson, S.A. Clay, e Y. Troien. 2008. Do synergistic relationships between nitrogen and water influence the ability of corn to use nitrogen derived from fertilizer and soil? *Agron. J.* 100:551-556.
- Kravchenko, A.N., y D.G. Bullock. 2000. Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. *Agron J.* 92:75-83.
- Lambert, D., J. Lowenberg-Deboer, y G. Malzer. 2006. Economic analysis of spatial-temporal patterns in corn and soybean response to nitrogen and phosphorus. *Agron J.* 98:43-54.
- Oliver, M.A. 2010. *Geostatistical Applications for Precision Agriculture.* Springer, United Kingdom. 337 pp.
- Pagani, A., H.E. Echeverría, Sainz-Rozas H.R., y P.A. Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del suelo.* 26:183-193.
- Pagani, A., y A.P. Mallarino. 2015. On-farm evaluation of corn and soybean grain yield and soil pH responses to liming. *Agron J.* 107:71-82.
- Peralta, N., J.L. Costa, M.C. Franco, y M. Balzarini. 2013a. Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo. *Interciencia.* 38:418.
- Peralta, N.R., J.L. Costa, M. Balzarini, y H. Angelini. 2013b. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Can J Soil Sci.* 93:205-218.
- Peralta, N.R., J.L. Costa, M. Balzarini, M. Castro Franco, M. Córdoba, D. Bullock. 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. *Comput Electron Agric.* 110:103-113.
- Puntel, L., y A. Pagani. 2013. Site-specific analysis of maize yield response to nitrogen in Argentina. *ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings Madison, Wis:* 1 p.
- QGIS v2.16.1 Nodebo. 2016. Development Team. Consultado en: <http://www.qgis.org>. [Fecha de consulta: 01/05/2016]
- Quarmby, N., M. Milnes, T. Hindle, y N. Silleos. 1993. The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *Int J Remote Sens.* 14:199-210.
- Rimski-Korsakov, H., G. Rubio, y R.S. Lavado. 2009. Effect of water stress in maize crop production and nitrogen fertilizer fate. *J Plant Nutr.* 32:565-578.
- Sadras, V.O., y P.A. Calviño. 2001. Quantification of Grain Yield Response to Soil Depth in Soybean, Maize, Sunflower, and Wheat. *Agron J.* 93:577-583.
- Sainz-Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H.P. Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del suelo.* 29:29-37.
- Sawyer, J. 1994. Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application. *J Prod Agric.* 7:195-201.
- Scharf, P.C., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, J.G. Davis, V.C. Hubbard, J.A. Lory. 2005. Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agron J.* 97:452-461.
- Shaner, D., R. Khosla, M. Brodahl, G. Buchleiter, y H. Farhani. 2008. How well does zone sampling based on soil electrical conductivity maps represent soil variability? *Agronomy Journal.* 100:1472-1480.
- Wibawa, W.D., D.L. Dlundu, L.J. Swenson, D.G. Hopkins, y W. Dahnke. 1993. Variable fertilizer application based on yield goal, soil fertility, and soil map unit. *J Prod Agric.* 6:255-261.
- Wright, R.J., D.G. Boyer, M.M. Winant, y H.D. Perry. 1990. The influence of soil factors on yield differences among landscape position in an Appalachian cornfield. *Soil Sci.* 149: 375-382. ●

Fertilización potásica en cultivos agrícolas de Uruguay

Mónica M. Barbazán^{1,*}, M. Bordoli¹, J. Coitiño¹, A. del Pino¹, O. Ernst¹, M. Ferrando¹, F.O. García², E. Hoffman¹, S. Mazzilli¹, y L. Rocha¹

¹Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Av. Garzón 780 Montevideo, Uruguay

²IPNI Cono Sur. Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso, Buenos Aires, Argentina

*Contacto: mbarbaz@fagro.edu.uy

Introducción

El aumento en la productividad de los cultivos requiere de la existencia de un adecuado manejo de nutrientes, para lo cual es necesario contar con pautas bien definidas de fertilización. Esto es relevante particularmente para Uruguay, donde la agricultura -principal actividad económica del país- es estrictamente dependiente de fertilizantes importados.

Históricamente, trigo y cebada han sido los cultivos dominantes en Uruguay, producidos, además, en rotación con pasturas, pero desde hace poco más de 10 años la soja pasó a ser el cultivo más sembrado. Las prácticas de laboreo conservacionistas adoptadas desde fines de la década de 1980, junto a la aparición de nuevo germoplasma y manejo de cultivos contribuyeron, entre otros factores, no solo al incremento del área total bajo producción agrícola, sino también al incremento en la intensidad del uso del suelo, llegando a realizarse 1.5 cultivos por año (DIEA 2014).

Desde la segunda mitad del siglo XX, nitrógeno (N) y fósforo (P) han sido incluidos en los programas de fertilización e investigación, pero el potasio (K) no fue considerado prioritario, dado su relativamente alto nivel natural en los suelos dedicados a la agricultura. Este nutriente fue recientemente identificado como una de las principales limitantes de la producción en varios cultivos y pasturas (Morón y Baethgen, 1996; Barbazán et al., 2007; Bordoli et al., 2012), observándose un descenso en los niveles de K, aún en los suelos más fértiles del área agrícola tradicional (Morón y Quincke 2010).

A nivel mundial existe abundante información mostrando los efectos de la fertilización con K en diferentes cultivos y tipos de suelos, y usando el análisis de K intercambiable a la siembra como

predictor de las necesidades de fertilización (Mallarino y Blackmer 1994, Mallarino et al., 1991a; 1991b; Bordoli y Malarino, 1998; Borges y Mallarino, 2000; Yin y Vyn 2002; Slaton et al., 2010).

Debido a la escasez de este tipo de información en un sistema de producción agrícola que ha experimentado cambios sustanciales como los ocurridos en Uruguay, resulta necesario establecer pautas de recomendación de aplicación de K. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue estudiar la respuesta a K en distintos cultivos y correlacionar el rendimiento en grano con el análisis de suelos de muestras tomadas del horizonte Ap en suelos bajo agricultura.

Materiales y métodos

En este trabajo se resumen los resultados publicados previamente por Barbazán et al. (2011) y los resultados de experimentos realizados entre 2010 y 2015 por la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, totalizando 116 experimentos de respuesta a K (**Tabla 1**). Los experimentos se ubicaron en cultivos comerciales en cebada, maíz, soja y trigo, sobre suelos representativos de la agricultura en Uruguay. La mayoría de los sitios han estado sometidos a un manejo continuo de laboreo conservacionista por lo menos 15 años antes de la aplicación de los tratamientos, y nunca recibieron una fertilización significativa de K durante todo el período de producción agrícola. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones para todos los experimentos. Los tratamientos fueron al menos dos dosis de entre 0 y 200 kg K₂O ha⁻¹, usando cloruro de potasio (KCl), aplicado en superficie antes o inmediatamente después de la siembra. Excepto la fertilización con K, el resto de las prácticas de manejo de los cultivos fueron las normalmente recomendadas en cada sitio. Previamente a la aplicación de tratamientos se tomaron muestras compuestas

(15 tomas) de suelo desde los primeros 15 a 20 cm de profundidad. El suelo se secó a 40°C, se molió y se pasó a través de un tamiz de 2 mm. En cada muestra de suelo se determinó materia orgánica por el método de Walkley Black (Nelson y Sommers, 1982), pH por potenciometría (relación suelo:agua de 1:2.5 (**Tabla 1**)). El Ca, Mg, K y Na intercambiables se extrajeron con 1 mol L⁻¹ de NH₄OAc.

El grano de cultivo fue cosechado desde el centro de cada parcela y los rendimientos se corrigieron a 155 g kg⁻¹ de humedad para el maíz, 140 g kg⁻¹ para el trigo y cebada y 130 g kg⁻¹ para la soja.

El análisis de la varianza para los efectos de los tratamientos sobre el rendimiento de grano se llevó a cabo por separado para cada sitio de acuerdo con el procedimiento de los Lineales Generales (GLM) de SAS (SAS Inst., Cary, NC). Los niveles críticos de K se calcularon con el método estadístico Cate-Nelson (Cate y Nelson, 1971).

Resultados y discusión

El valor de K intercambiable en los sitios previo a la aplicación de tratamientos varió de 0.12 a 1.22 cmol K kg⁻¹, con una media de 0.44 cmol K kg⁻¹ (**Tabla 1**) y una mediana de 0.36 cmol K kg⁻¹.

El rendimiento en grano debido a la aplicación de K aumentó significativamente ($P < 0.10$) en 32 de los 116 sitios. En los suelos que presentaron < 0.20 cmol K kg⁻¹, los cultivos respondieron positivamente a la aplicación de K en el 58% de los casos; entre 0.21 y 0.30 cmol kg⁻¹ respondió el 43%; entre 0.30 y 0.40 cmol kg⁻¹, respondió el 34%, y en suelos que tenían entre 0.40 a 0.50 cmol kg⁻¹, respondió el 29% de los sitios (**Figura 1**). Dos sitios con cebada y uno con maíz respondieron positivamente cuando el nivel de K intercambiable fue > 0.51 cmol kg⁻¹.

El rendimiento de los cultivos en los tratamientos testigo en suelos que respondieron positivamente a la aplicación de K, fue de 2582, 3367, 2127 y 2626 kg ha⁻¹ para cebada, maíz, soja y trigo, respectivamente, con un rendimiento relativo con respecto al rendimiento más alto en cada sitio de 72%, 64%, 71% y 80%, respectivamente. Para los sitios que no respondieron significativamente a la aplicación de K, el rendi-

miento promedio de los tratamientos testigo fue 3224, 4970, 2315 y 4884 kg ha⁻¹ para cebada, maíz, soja y trigo, respectivamente. Los cultivos que más frecuentemente respondieron a la aplicación de K fueron el maíz (40%) y la cebada (39%), seguidos por el trigo (24%) y finalmente por la soja (11%). Las pérdidas de rendimiento más altas observadas por deficiencia de K se registraron en un sitio con maíz (92%) y en un sitio con soja (54%).

Comparado con los rendimientos logrados en otras regiones de producción, los rendimientos obtenidos en los sitios sin respuesta a K podrían considerarse bajos, indicando que hay otros factores que podrían estar incidiendo en la obtención de mayores rendimientos, como disponibilidad de agua, pH del suelo, condiciones de absorción de K. Parte de la variabilidad encontrada entre la respuesta a K en los distintos cultivos podría ser explicada por la distribución vertical típica de nutrientes poco móviles en sistemas de producción de cultivos con laboreo reducido, así como por las características de las raíces y la incidencia del cultivo predecesor en la dinámica de este nutriente. En relación a la estratificación del K, Bordoli y Mallarino (1998) lograron aumentar el rendimiento de maíz al aplicar el K en forma localizada en profundidad, aunque en soja, no se encontraron diferencias entre aplicaciones sobre la superficie o localizadas (Borges y Mallarino, 2000; Yin y Vyn, 2002).

Las concentraciones críticas calculadas por el procedimiento estadístico de Cate y Nelson fueron similares a los valores previos de 0.3-0.4 cmol K kg⁻¹ establecidos por Barbazán et al. (2011) (**Figura 2**). Estos valores son similares también a los encontrados por otros investigadores en otras partes del mundo. La relación entre la respuesta al rendimiento del grano y los valores de K en el suelo muestra una gran variabilidad, lo que indica la incidencia de otros factores afectando la dinámica del K en el suelo, como textura, formas no intercambiables de K y/o mineralogía.

Conclusiones

La aplicación de K en superficie aumentó significativamente el rendimiento de los cultivos, principalmente en los suelos con menores niveles de K intercambiable. Para el total de casos analizados, el nivel crítico fue similar al sugerido.

El cultivo de maíz fue de los que más frecuentemente respondieron a K y en menor frecuencia y más variable, el de soja. Una discriminación por textura, mineralogía y formas no intercambiables de K podrían mejorar la predicción de las necesidades de fertilización con este nutriente.

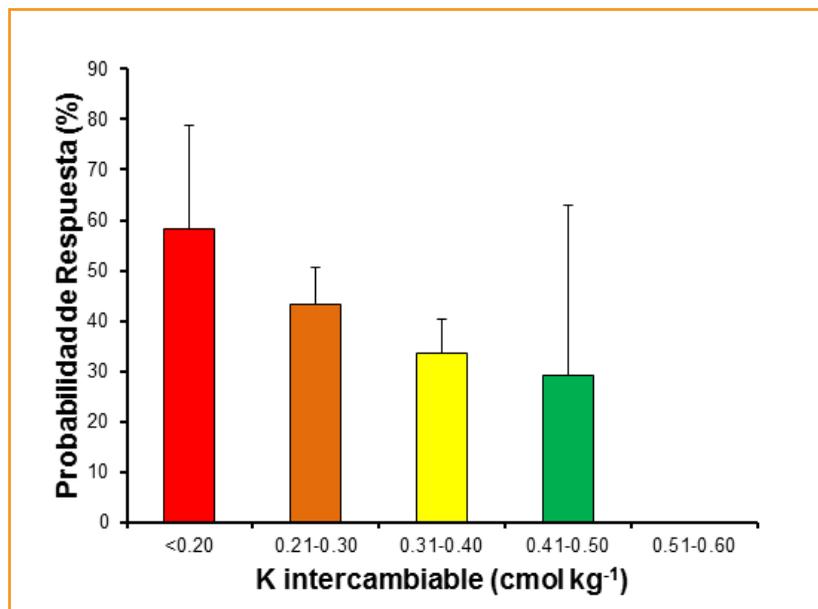


Figura 1. Probabilidad de respuesta a la fertilización potásica para diferentes rangos de K intercambiable (0-20 cm) en suelos de Uruguay.

Tabla 1. Propiedades químicas del horizonte Ap de los suelos con experimentos de respuesta a K en cebada, trigo, maíz y soja.

Cultivo	n	Valor	pH	MO	Ca	Mg	K	Na
			(1:2.5 H ₂ O)	g kg ⁻¹	----- cmol kg ⁻¹ -----			
Cebada	14	Promedio	5.99	33.6	17.72	2.09	0.49	0.35
		Mínimo	4.74	13.7	2.00	0.57	0.18	0.24
		Máximo	7.40	54.2	33.81	4.27	1.02	0.62
Trigo	26	Promedio	5.80	35.3	16.00	2.27	0.47	0.34
		Mínimo	4.60	19.0	4.46	1.13	0.19	0.11
		Máximo	7.30	45.0	34.43	5.30	1.20	0.69
Maíz	14	Promedio	5.90	40.1	19.01	2.61	0.48	0.44
		Mínimo	5.05	18.0	6.15	0.88	0.15	0.30
		Máximo	7.30	54.2	31.31	4.27	1.22	0.70
Soja	56	Promedio	5.51	41.1	13.98	2.15	0.42	0.39
		Mínimo	4.60	19.0	2.29	0.66	0.12	0.18
		Máximo	7.00	63.0	35.40	4.60	1.01	0.79
Todos	116	Promedio	5.69	39.2	15.81	2.28	0.44	0.38
		Mínimo	4.60	13.7	2.00	0.57	0.12	0.11
		Máximo	7.40	63.0	35.40	5.30	1.22	0.79

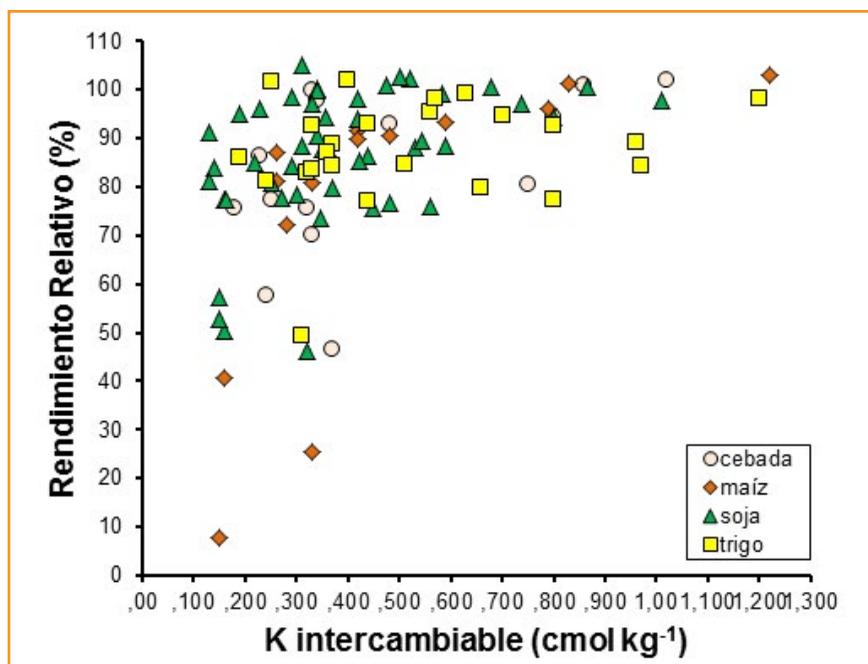


Figura 2. Relación entre el rendimiento relativo de cebada, maíz, soja y trigo, y el nivel de K intercambiable (0-20 cm) en suelos de Uruguay.

Bibliografía

- Barbazán, M.M., M. Ferrando, y J. Zamalvide. 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* en Uruguay. *Agrociencia* 11 (1): 22-34.
- Barbazán, M.M., C. Bantes, L. Beux, L. J.M. Bordoli, J.D. Cano, O. Ernst, A. García, F.O. García, y A. Quincke. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia Uruguay*. 15 (2): 93-99.
- Bordoli, J.M., y A.P. Mallarino. 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agron. J.* 90:27-33.
- Bordoli, J. M, M.M. Barbazán, y L. Rocha. 2012. Soil nutritional survey for soybean production in Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. no. especial: 76-83.
- Borges, R., y A.P. Mallarino. 2000. Grain yield, early growth, and nutrient uptake of no-till soybean as affected by phosphorus and potassium placement. *Agron. J.* 92:380-388.
- DIEA - MGAP. 2014. Anuario estadístico agropecuario 2014.
- Mallarino, A.P., y A. M. Blackmer. 1994. Profit-maximizing critical values of soil-test potassium for corn. *J. Prod. Agric.* (7): 261-268.
- Mallarino, A.P., J.R. Webb, y A.M. Blackmer. 1991a. Corn and soybean yields during 11 years of phosphorus and potassium fertilization on a high testing soil. *J. Prod. Agric.* (4): 312-317.
- Mallarino, A.P., J.R. Webb, y A.M. Blackmer. 1991b.

- Soil test values and grain yields during 14 years of potassium fertilization of corn and soybean. *J. Prod. Agric.* (4): 562-566.
- Morón, A., y W. Baethgen. 1996. Relevamiento de la fertilidad de los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Serie Técnica 73. INIA. Uruguay.
- Morón, A., y A. Quincke. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el Departamento de Soriano. Serie Actividades de Difusión 605: 5-8.
- Nelson, D.W., y L.E. Sommers. 1982. Total organic carbon and organic matter. In AL Page, RH Miller y DR Keeney, (eds.), *Method of soil analysis. Part. 2*: 539-579. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- Slaton, N.A., B.R. Golden, R.E. De Long, y M. Mozaffari. 2010. Correlation and calibration of soil potassium availability with soybean yield and trifoliolate potassium. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (74):1642-1651.
- Yin, X., y T. Vyn. 2002. Soybean response to potassium placement and tillage alternatives following no-till. *Agron. J.* 94:1367-1374. ●

Importancia de la interacción nitrógeno-densidad en la dosificación de N

Cecilia Cerliani^{1,*}, Rafael Naville¹, Guillermo Balboa², Alejo Ruiz³, Gabriel Martínez Bologna¹, Nicolás Bossio¹, y Gabriel Espósito¹

¹Universidad Nacional de Río Cuarto, ²Kansas State University, ³Chacra AAPRESID Justiniano Posse

*Contacto: ccerliani@ayv.unrc.edu.ar

Introducción

La densidad de siembra en el cultivo de maíz es una de las prácticas de manejo que más impactan sobre su rendimiento (Andrade et al., 1996). Varios autores han demostrado que la relación entre la productividad de maíz y la densidad de plantas es de tipo óptimo (Karlem y Camp, 1985; Sangoi et al., 2002; Capristo et al., 2007; Sarlengue et al., 2007), dependiendo la magnitud de esta respuesta de la oferta de recursos ambientales (Horbe et al., 2013). Esto es debido a la relación curvilínea existente entre la tasa de crecimiento individual durante el periodo crítico del maíz y el número de granos por plantas, que es el principal componente del rendimiento. Como consecuencia de esta relación, cuando la tasa de crecimiento es baja la producción de granos es baja e incluso puede ser nula si esta tasa se encuentra por debajo del umbral para la producción de granos; a medida que aumenta la tasa de crecimiento la producción de granos aumenta hasta alcanzar un valor máximo, en el cual por más que se siga incrementando el crecimiento de cada planta la producción individual de granos no aumentará debido a limitaciones morfo genéticas de la espiga de maíz. La tasa de crecimiento por planta varía en función de la disponibilidad de recursos, como por ejemplo radiación, agua y nutrientes (Andrade et al., 1999).

Dentro de los nutrientes, la variabilidad de la oferta de nitrógeno (N) está ampliamente citada en los suelos de la región pampeana (Espósito et al., 2014). Se ha estudiado exhaustivamente la importancia del N para el cultivo de maíz y que su aplicación mediante fertilización química genera mejoras en la producción debido a que frecuentemente los cultivos presentan deficiencias de este nutriente como consecuencia de los altos requerimientos por parte del cultivo y/o por la escasa oferta por parte del suelo. Además, se han desarrollado diferentes métodos de diagnóstico

que permiten determinar la dosis recomendada de fertilización nitrogenada N (Echeverría et al., 2014). Sin embargo, hasta la actualidad no hay modelos de dosificación que sean sensibles a cambios en la densidad de siembra del maíz.

Teniendo en cuenta que la densidad óptima depende de los recursos ambientales, cómo el N, se puede suponer que la dosis óptima de N (DON) interaccionaría con la densidad de plantas, por lo tanto los objetivos de este trabajo fueron: I evaluar la interacción entre la densidad de siembra de maíz y la dosis de nitrógeno empleada; II optimizar simultáneamente la densidad de siembra y la dosis de nitrógeno; III determinar la disponibilidad de N por planta correspondiente con la máxima producción de granos; y IV determinar la Eficiencia Agronómica del N (EA) con distintos métodos de diagnóstico.

Materiales y Métodos

Se llevaron a cabo una serie de ensayos en la zona Sur de Córdoba: el Experimento I se realizó durante la campaña 2005/06; el Experimento II durante la campaña 2008/09; los Experimentos III, IV, y V en la 2015/16; y los Experimentos VI y VII durante la campaña 2016/17. Todos los experimentos se sembraron sobre antecesor soja, en un sistema de labranza de siembra directa con un distanciamiento entre hileras de 0.52 m. Los ensayos se mantuvieron libre de malezas, plagas y enfermedades.

El diseño estadístico para todos los casos fue un arreglo factorial, donde el factor principal fue la dosis de N y el secundario la densidad de siembra, con 2 a 4 repeticiones según el ensayo.

En la **Tabla 1** se presentan los distintos ensayos con la ubicación, fecha de siembra, dosis de N aplicadas y densidades sembradas.

Tabla 1. Descripción de los ensayos evaluados.

Experi- mento	Sitio	Fecha de Siembra	Hibrido	Dosis de N, kg ha ⁻¹	Densidad de siembra, miles de semillas ha ⁻¹
I	Río Cuarto	2/11/2005	AX882 y DK682	80-168 y 252	80 y 95
II	Río Cuarto	3/10/2008	DK 747MGRR2, DK 190 MGRR2 y AX 882 MGHCL	0 y 160	75 y 95
III	Bell Ville	7/10/2015	DK 7210 VT3P	0, 120, 240 y 360	45, 60, 70 y 80
IV	Justiniano Posee	7/10/2015	DK 7210 VT3P	0, 67, 117 y 167	54, 91, 107 y 134
V	Justiniano Posee	10/10/2015	DK 7210 VT3P	0, 76, 126 y 178	51, 80, 104 y 135
VI	Ucacha	16/09/2016	DK 7210 VT3P	0,74,84 y 213	30, 60, 90 y 120
VII	Alejandro Roca	26/09/2016	AX 7822 TD/TG	0,100,200 y 300	40, 70, 100 y 130

Evaluación de la interacción entre densidad:dosis de nitrógeno.

La misma se realizó a través del análisis de los datos de los Experimentos mediante ANAVA, utilizando el software Infostat (Di Rienzo et al, 2016).

Optimización simultanea de la densidad de siembra y la dosis de nitrógeno

Con los datos de los Experimentos III, IV, V, VI y VII, se modelo la respuesta del maíz a la densidad y dosis de nitrógeno como un polinomio de segundo grado según la **Ec. 1**:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 D + \beta_3 N^2 + \beta_4 D^2 + \beta_5 ND + \varepsilon \quad \text{Ec.1}$$

donde Y es el rendimiento del maíz (kg ha⁻¹), $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 , son los parámetros de la ecuación de regresión, D es la densidad de siembra (semillas ha⁻¹), N es la dosis de N (kg N ha⁻¹), y ε es el término de error de la regresión.

Los parámetros de la función fueron estimados mediante el software INFOSTAT (Di Rienzo et al, 2016).

La optimización se realizó derivando la función de producción dependiente de la dosis de N y de la densidad de siembra (**Ec. 2 y Ec. 5**), las que se igualaron a 0 y posteriormente se despejó N* y D* (**Ec. 4 y Ec. 5**), finalmente se sustituyó el N en la función de la D* mediante el método de sustitución según indica la **Ec. 6** y luego para obtener N* se sustituyó D* (**Ec. 7**).

$$\Delta R \Delta N = \beta_1 + 2 \beta_3 N + \beta_5 D = 0 \quad \text{Ec.2}$$

$$\Delta R \Delta D = \beta_2 + 2 \beta_4 D + \beta_5 N = 0 \quad \text{Ec.3}$$

$$N^* = (-\beta_1 - \beta_5 D) / 2\beta_3 \quad \text{Ec.4}$$

$$D^* = (-\beta_2 - \beta_5 N) / 2\beta_4 \quad \text{Ec.5}$$

$$D^* = (-\beta_2 - \beta_5 ((-\beta_1 - \beta_5 D) / 2\beta_3)) / 2\beta_4 \quad \text{Ec.6}$$

$$N^* = (-\beta_1 - \beta_5 ((-\beta_2 - \beta_5 N) / 2\beta_4)) / 2\beta_3 \quad \text{Ec.7}$$

donde $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 , son los parámetros de la Ec. 1, D* es la densidad de siembra óptima (semillas ha⁻¹), N* es la dosis de N óptima (kg N ha⁻¹).

Determinación la disponibilidad de N por planta correspondiente con la máxima producción de granos

Utilizando los datos del Experimento V, se modeló la respuesta del rendimiento al N disponible por planta, para cada densidad de siembra.

El nitrógeno por planta se determinó mediante la suma del N disponible a la sexta hoja totalmente desplegada del cultivo (según análisis de suelo hasta los 0.6 m de profundidad) y el cociente entre el N aplicado y la densidad de plantas.

Para ello se modelo como un polinomio de segundo grado según la **Ec. 8**:

$$R = \beta_0 + \beta_1 NPP + \beta_2 NPP^2 + \varepsilon \quad \text{Ec.8}$$

donde R es el rendimiento del maíz (kg ha⁻¹), β_0, β_1 y β_2 , son los parámetros de la ecuación de regresión, NPP es el N disponible por planta (g planta⁻¹), y ε es el término de error de la regresión.

La dosis óptima agronómica se obtuvo mediante la estimación de la primera derivada de la ecuación anterior igualada a cero. De este modo el valor de N disponible por planta es el necesario para alcanzar el máximo rendimiento por hectárea en cada densidad (**Ec. 9**).

$$\Delta R \Delta NPP = \beta_1 + 2 \beta_2 NPP \quad \text{Ec.9}$$

Donde $\Delta R\Delta NPP$, derivada del rendimiento en función de N disponible por planta, β_1 y β_2 , son los parámetros de la ecuación 8, N es el N disponible por planta (g planta⁻¹).

Además, se modeló para cada densidad, la relación entre el N disponible por planta y la producción por planta, se ajustó una regresión cuadrática (**Ec. 10**) y a través de su primera derivada (**Ec. 11**) igualada a cero se obtuvo la máxima producción por planta.

$$RPP = \beta_0 + \beta_1 NPP + \beta_2 NPP^2 + \varepsilon \quad \text{Ec. 10}$$

donde RPP es el rendimiento por planta (g planta⁻¹), β_0 , β_1 y β_2 , son los parámetros de la ecuación de regresión, N es el N disponible por planta (g planta⁻¹), y ε es el término de error de la regresión.

$$\Delta R\Delta NPP = \beta_1 + 2\beta_2 NPP \quad \text{Ec. 11}$$

Donde $\Delta R\Delta NPP$, derivada del rendimiento por planta en función de N disponible por planta, β_1 y β_2 , son los parámetros de la ecuación 8, N es el N disponible por planta (g planta⁻¹).

En todas las ecuaciones los parámetros fueron obtenidos mediante el programa INFOSTAT.

Determinación de la Eficiencia Agronómica del N (EA) con distintos métodos de diagnóstico.

En el Experimento V, se determinó la Eficiencia Agronómica (EA) (de acuerdo a la **Ec. 12**), para distintos métodos de diagnóstico:

- 150 - X (Pagani et al., 2008)
- Balance (Meisinger, 1984)
- MEME (Espósito, 2013)
- Optimización Simultanea

Resultados y discusión

Interacción entre densidad:dosis de nitrógeno.

En todos los casos se observó un efecto interactivo entre la densidad de siembra y la dosis de N (**Tabla 2**).

Tabla 2. Rendimiento alcanzado en cada tratamiento de los experimentos evaluados y valor p de la interacción densidad de siembra:dosis de N.

Experi- mento	Densidad (miles semillas ha ⁻¹)	Dosis de N (kg ha ⁻¹)	Rendimien- to (kg ha ⁻¹)		
I**	80	0	16 050		
		168	18 283		
		252	19 083		
	95	0	14 450		
		168	18 967		
		252	19 517		
II+	75	0	10 875		
		160	10 933		
		95	0	9012	
	95	160	10 885		
		III**	45	0	5549
				34	7527
68	8964				
60	102		9226		
	70		0	6218	
			34	9930	
68		10 973			
IV*	80	102	10 892		
		70	0	6924	
			34	9144	
	80		68	10 498	
		V*	54	102	10 425
				91	0
34	6970				
107	68		9237		
	134		102	10 186	
			0	8903	
V*		51	67	8472	
	117		8537		
	167		8450		
	107	0	11 229		
		67	10 922		
		117	11 172		
V*	107	167	11 264		
		134	0	11 571	
			67	11 461	
	134		117	11 612	
		167	12 005		
		V*	51	0	11 305
67	12 186				
117	12 106				
134	167		12 443		
	0		9864		
	76		11 362		

Experi- mento	Densidad (miles semillas ha ⁻¹)	Dosis de N (kg ha ⁻¹)	Rendimien- to (kg ha ⁻¹)
		126	11 026
		178	11 068
	80	0	10 071
		76	11 627
		126	13 478
		178	13 053
	104	0	9728
		76	11 825
		126	13 385
		178	13 210
	135	0	9583
		76	11 564
		126	12 748
		178	13 511
VI**	40	0	7020
		74	7820
		84	7670
		213	7590
	60	0	7640
		74	9150
		84	9120
		213	9140
	75	0	7940
		74	10 000
		84	10 580
		213	10 320
	90	0	7940
		74	10 850
		84	10 676
		213	10 880
VII**	40	0	7370
		100	7430
		200	7110
		300	7620
	70	0	9340
		100	10 150
		200	10 210
		300	10 340
	100	0	8900
		100	10 110
		200	10 690
		300	10 430
	130	0	8820
		100	10 070
		200	10 660
		300	10

*, **, +, indican interacción densidad de siembra:dosis de N al 1,5 y 10 %, respectivamente.

Como se aprecia en la **Tabla 2** los experimentos evidenciaron un efecto interactivo entre la densidad de siembra y la dosis de N. En todos los casos cuando la dosis de N fue baja, los mayores rendimientos se obtuvieron con bajas densidades, por el contrario, cuando la oferta de N fue alta la mayor producción se registró con altas densidades. Esto coincide con lo encontrado por Ciampitti y Vyn (2011), quienes determinaron que el rendimiento solo respondió positivamente al aumento de la densidad cuando se aplicó N; según estos autores el mayor rendimiento en los tratamientos con altas densidades y dosis de fertilizante se asocia a una mayor producción de biomasa y en menor medida a aumentos en el índice de cosecha. Por su parte Pietrobon (2012) reportó este efecto interactivo solo para los componentes del rendimiento (número de granos y peso de 1000 granos) indicando que en el rendimiento no se observó este efecto debido a que se produjo una compensación entre ambos componentes. En Paraná (Argentina), Caviglia et al. (2007) encontraron que el rendimiento fue afectado tanto por efecto de la densidad de plantas como de la fertilización nitrogenada.

Optimización simultánea de la densidad de siembra y la dosis de nitrógeno

En la **Tabla 3** se presentan para los Experimentos III, IV, V, VI y VII las densidades de siembra y dosis de N optimizadas de manera simultánea, como así también se indican los rendimientos alcanzados con dichos valores, así como también el valor de ajuste del modelo y los parámetros que resultaron significativos en el mismo.

Como se puede observar en la **Tabla 3**, tanto la densidad de siembra óptima como la dosis de N optimizadas variaron en todos los experimentos. Esto da indicios de la alta complejidad de esta interacción lo que hace que cada Experimento, en el cual las condiciones ambientales del cultivo fueron únicas, tenga una combinación propia de densidad de siembra y dosis de N.

Por otro lado, puede resaltarse siempre la interacción densidad de siembra por dosis de N fue significativa.

Determinación la disponibilidad de N por planta correspondiente con la máxima producción de granos

La relación entre la producción del cultivo y

Tabla 3. Densidad de siembra y dosis de N optimizados, rendimientos correspondientes a las dosis optimizadas y parámetros significativos.

	Exp III	Exp IV	Exp V	Exp VI	Exp VIII
N Optimizado	99	0	178	213	165
D Optimizada	64 242	112 476	135 000	90 000	107 296
Rto Optimizado (Kg ha ⁻¹)	11 295	11 272	12 259	11 000	10 000
Parámetros significativos	N D N2 D2 ND	N D D2 ND	N D N2 D2 ND	N D N2 D2 ND	N D N2 D2 ND

*Rto: Rendimiento; N: Nitrógeno; Densidad

los gramos de N disponible, cambió al cambiar la densidad de siembra (**Figura 1a**), lo mismo se observa en la relación entre la producción individual y el N disponible por planta (**Figura 1b, Tabla 4**).

Tabla 4. Densidad de siembra y dosis de N optimizados, rendimientos correspondientes a las dosis optimizadas y parámetros significativos.

Densidad (semillas ha ⁻¹)	g N p ⁻¹	Rendimiento IND (g p ⁻¹)	Rendimiento MAX (kg ha ⁻¹)
51 000	3.66	227.97	11 627
80 000	3.15	165.88	13 270
104 000	2.40	128.10	13 322
135 000	1.86	100.63	13 528

*gN p⁻¹: gramos de N por planta.

Como se observa en la Figura 1a, al incrementarse la densidad el rendimiento del cultivo aumenta para una misma cantidad de N disponible por planta, lo cual manifiesta una mayor

eficiencia en el uso del N. Ciampiti y Vyn (2011) encontraron que, al aumentar la densidad la eficiencia en el uso del N (EUN) fue superior. Similares resultados fueron hallados por Pietrobón (2012) quien reportó que el incremento en el número de plantas por unidad de superficie permitió producir mayor cantidad de granos por cada unidad de nutriente disponible para el cultivo, coincidiendo también con lo reportado por Boomsma et al., (2009).

Esta mayor eficiencia podría explicarse por el cambio que se genera en la estructura de la raíz al aumentar la densidad, lo cual genera una mayor captura de N en profundidad por contar con raíces más verticales, disminuyéndose así las pérdidas de este nutriente por lixiviación. Pietrobón (2009) encontró que la mayor EUN en los estadios iniciales se debió a una mayor eficiencia de recuperación de N (kg de N absorbido por kg de N disponible (ER)), mientras que la mayor EUN en estadios avanzados estuvo principalmente relacionada a una mayor eficiencia fisiológica (kg de materia seca producida por

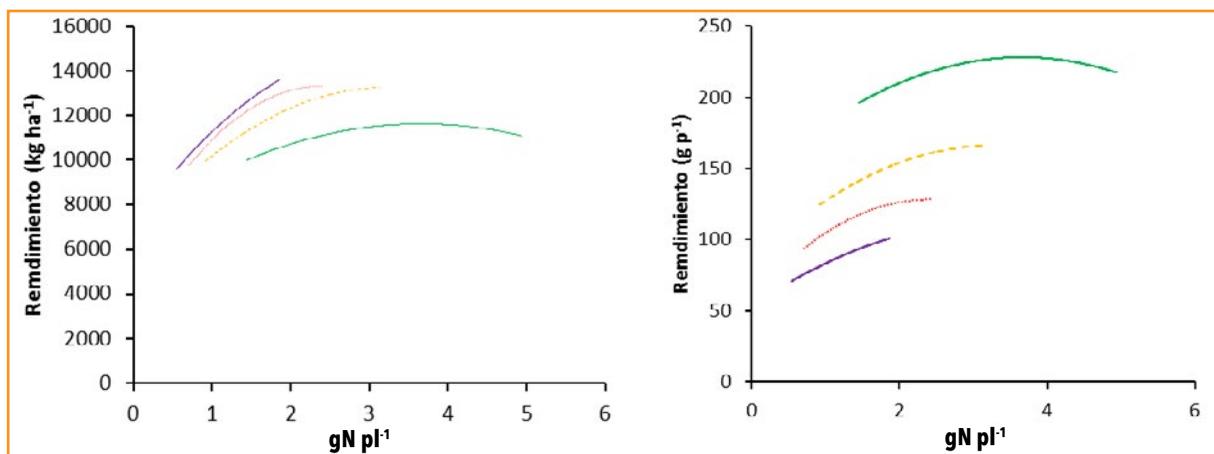


Figura 1. A: Relación entre el rendimiento (kg ha⁻¹) y gramos de N disponible por planta. B: Relación entre el rendimiento (g planta⁻¹) y gramos de N disponible por planta. Línea verde lлена: 51 000 semillas ha⁻¹; Línea amarilla punteada: 80 000 semillas ha⁻¹; Línea roja punteada: 104 000 semillas ha⁻¹; y Línea violeta lлена: 135 000 semillas ha⁻¹.

kg de N absorbido (EF)), Uribe Larrea et al. (2007) sugirieron que elevadas ER estarían fuertemente relacionadas con las raíces (tamaño y actividad) y que altas EF podrían estar altamente vinculadas a los componentes del Rendimiento (número de granos y peso).

Por otro lado, al analizar las **Figuras 1 a y 1b y la Tabla 4** anterior se puede observar que cuando la disponibilidad de N por plantas estuvo alrededor de los 3 gramos el rendimiento fue máximo.

Determinación de la Eficiencia Agronómica del N (EA) con distintos métodos de diagnóstico.

La eficiencia agronómica del fertilizante se presenta en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Eficiencia agronómica del fertilizante para distintos modelos de diagnóstico de fertilización.

Modelo	150-X	Balanced	MEME	Optimización Simultánea (N*D)
Densidad (pl ha ⁻¹)	80 000	80 000	80 000	135 000
Dosis de N (kg ha ⁻¹)	76	90	160	178
Rendimiento Testigo (kg ha ⁻¹)	10 069	10 069	10 069	9556
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	11 210	11 416	12 332	12 259
EA	14.95	14.87	14.17	15.19

La EA varió entre 14.17 y 15.19, siendo superior al utilizar la optimización simultánea. Estas diferencias en la EA podría explicarse porque ningún método evalúa correctamente las eficiencias del proceso (eficiencia de absorción y fisiológica).

Conclusiones

Tanto la densidad como la dosis de N afectaron de manera conjunta el rendimiento del maíz a través de su interacción, por lo que se debe comenzar a trabajar en modelos de diagnóstico de fertilización nitrogenada, que contemplen la misma, pudiéndose mejorar con ello la eficiencia del uso del fertilizante.

Bibliografía

- Andrade F., A.G. Cirilo, S. Uhart, y M. Otegui. 1996. Ecofisiología del Cultivo de Maíz. Editorial La Barrosa- EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires. 227 pp.
- Andrade, F. H., C. Vega, S. Uhart, A. Cirilo, M. Cantarero, y O. Valentinuz. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science*, 39(2), 453-459.
- Boomsma, C.R., J.B. Santini, M. Tollenaar, y T.J. Vyn. 2009. Maize morphophysiological responses to intense crowding and low nitrogen availability: an analysis and review. *Agron. J.* 101: 1426-1452.
- Capristo, P.R., R.H. Rizzalli, y F.H. Andrade. 2007. Eco-physiological Yield Components of Maize Hybrids with Contrasting Maturity. *Agron. J.* 99, 1111.
- Ciampitti, I. A., y T.J. Vyn. 2011. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Research*. 121(1), 2-18.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Echeverría, H.E., F.O. García. 2014. Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos. Editores: Echeverría H.E. y F. García. 2da ed. Ediciones INTA. Buenos Aires. 904 pp.
- Esposito, G. 2013. Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME). Tesis Doctor en Ciencias Agropecuarias. UNC. 108 pp.
- Esposito, G., M. Díaz-Zorita, G. Balboa, C. Cerliani, y G. Martínez Bologna. 2014. Revisión de estudios de fertilización de cereales en Argentina. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina.
- Hörbe, T. A. N., T.J.C. Amado, A.D.O. Ferreira, y P.J. Alba. 2013. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precision Agriculture*, 14(4), 450-465.
- Karlen, D.L. y C.R. Camp. 1985. Row spacing, plant population, and water management effects on corn in the atlantic Coastal Plain. *Agronomy Journal*, 77:393-398.
- Meisinger, J.J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. *Nitrogen in crop production, (nitrogenincropp)*, 391-416.
- Pagani, A., H.E. Echeverría, H. Sainz Rozas y P.A. Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el Sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 26(2): 179-188.
- Pietrobon, M. 2012. Densidad de plantas en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) y su efecto sobre la eficiencia de uso de nitrógeno. Tesis. MSc UNdMP. 92 pp.
- Sangoi, L., M.L. Almeida, P.R.F. Silva, Y G. Argenta. 2002. Bases morfofisiológicas para maior tolerância dos híbridos modernos de milho a altas densidades de plantas. *Bragantia*, v.61, p.101-110.
- Sarlangue, T., F.H. Andrade, P.A. Calviño, y L.C. Purcell. 2007. Why Do Maize Hybrids Respond differently to Variations in Plant Density? *Agron. J.* 99, 984.
- Uribe Larrea, M., S.P. Moose, y F.E. Below. 2007. Divergent selection for grain protein affects nitrogen use efficiency in maize hybrids. *Field Crops Res.* 100: 82-90. ●

Conocer la variabilidad espacial para optimizar el muestreo: Ejemplos en Pampa Arenosa y Ondulada

E. Ciarlo^{1,*}, P. Muschietti¹, N. Peralta², F. Gregorini³, M. Comparin⁴, y L. Giuffré¹

¹Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía de la U.B.A

²Monsanto, Argentina; ³Asesor Privado; ⁴Kleffmann Group

*Contacto: ciarlo@agro.uba.ar

Introducción

El suelo es considerado uno de los medios más variables independientemente de la escala analizada. La variabilidad del suelo es dependiente de la escala de análisis ya que responde a la acción de factores formadores que actúan en un continuo de escalas espaciales y temporales, resultando en estructuras de variación anidadas (Trangmar et al., 1985). Esta variabilidad en el espacio puede reflejar diferencias por ejemplo, en la dotación o abastecimiento de nutrientes u otra restricción de crecimiento de las raíces. Debido a la fuerte influencia de las propiedades de suelo, el manejo agronómico y la interacción de estos con el clima, la productividad agrícola resulta altamente variable (Bramley, 2009). Gran parte de la variabilidad ambiental asociada con los rendimientos de los cultivos es explicada por la variabilidad en propiedades de los suelos. Por ejemplo, en suelos arenosos de la Pampa arenosa el contenido de arenas explicó el 64 % de la variabilidad de los rendimientos del maíz (Uricarriet et al., 2011).

Típicamente, los sistemas agrícolas de manejo uniforme de insumos consideran la variabilidad de los suelos como ruido o variación no controlable (Cook y Bramley, 1998). En consecuencia, sólo una minoría de los productores en Argentina realiza recomendaciones de fertilización considerando la variabilidad espacial dentro del lote. Los beneficios agronómicos de la implementación del manejo-sitio específico de insumos están relacionados mayormente con los patrones espaciales de las propiedades edáficas y la concentración de nutrientes del suelo (Cahn et al., 1994) cuya información puede ser utilizada para desarrollar mapas de recomendación (Ruffo, 2006).

La variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos a escala de lote

fue reconocida en trabajos previos realizados en la Región Pampeana (Di Pietro et al., 1986; Giuffré et al., 1994; Peralta et al., 2013). Sin embargo, pocos estudios han evaluado patrones de distribución espacial de distintas propiedades del suelo (Alesso et al., 2008; Zubillaga et al., 2006; Peralta y Costa, 2013). Recientemente, en un lote con predominio de suelos Argiudoles típicos y acuícos con historia de agricultura continua en siembra directa de la Pampa Llana santafesina se encontraron bajos coeficientes de variación (menores a 15%) en las propiedades carbono orgánico, nitrógeno (N) total, composición granulométrica, densidad aparente y pH; y moderados para P extractable y nitratos (CVs entre 15 y 35%) (Alesso et al., 2012).

En la descripción y el análisis de resultados con distribución espacial es necesario utilizar métodos geoestadísticos que consideren la dimensión espacial (Isaaks y Srivastava, 1989) asociada a las mediciones edáficas, permitiendo describir y modelar los patrones espaciales, realizar predicciones en sitios no evaluados y cuantificar el grado de incertidumbre asociado a dichas predicciones (Goovaerts, 1998). El variograma es una de las metodologías más comúnmente empleada dentro de la geoestadística para describir y cuantificar la estructura espacial de observaciones georreferenciadas (Webster y Oliver, 2007). La semi-varianza es definida como la varianza de las diferencias entre pares de puntos separados por una distancia dada, y es la unidad de representación del semi-variograma. Los métodos de interpolación geoestadísticos permiten estimar valores de una variable en sitios no muestreados a partir del análisis de la continuidad espacial a través del cálculo de semi-variogramas. De tal modo, se puede representar en mapas detallados la distribución espacial de propiedades del suelo como base para delimitar áreas homogéneas de manejo diferencial (Kravchenko y Bullock, 1999).

Generalmente, la variación espacial a escala de campo de propiedades clave como el contenido de materia orgánica del suelo está fuertemente influenciada por diferencias en el uso del suelo, forma de labranza y otras prácticas agrícolas (Liu et al., 2010; Hu et al., 2014). Sin embargo, pocos estudios han evaluado el efecto del uso del suelo sobre la variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos diferentes. En dos suelos de lowa con distintas historias de rotación y fertilización, Cambardella y Karlen (1999) encontraron que las variables con mayor dependencia espacial cambiaban entre los suelos con distintos antecedentes, por lo que concluyeron que las prácticas agrícolas parecen afectar tanto a las propiedades que están fuertemente correlacionadas como al rango en el que existe tal correlación espacial.

La región Pampeana Argentina es la principal zona de producción agrícola del país, y constituye una de las principales del mundo. Esta región se subdivide en zonas de acuerdo a sus características edáficas y de relieve contrastantes (León, 1992): La Pampa Ondulada, ubicada al norte de la región, caracterizada por suelos muy productivos y relieve pronunciado; la Pampa Interior occidental ó pampa arenosa con suelos de textura gruesa, bajos niveles de carbono orgánico y tendientes a la aridez; y la Pampa Deprimida, caracterizada por zonas planas de escaso drenaje con un mosaico de suelos zonales y halomórficos de baja aptitud agrícola.

Los principios generales de la tecnología de manejo variable de nutrientes pueden ser transferidos entre regiones aunque la estructura espacial de la variabilidad de los atributos edáficos es sitio-específica (Mallarino, 1996; Peralta et al., 2016). En consecuencia, las estrategias de manejo sitio-específico de insumos agrícolas deben ser modeladas localmente de acuerdo a las condiciones de variabilidad edafo-climáticas reconocidas en el lote (Bongiovanni, 2002). Por ello, sólo mediante un profundo conocimiento sobre el patrón de dicha variabilidad es posible mejorar la calidad de la extrapolación de resultados entre suelos y condiciones similares. En este sentido resulta necesario profundizar el conocimiento sobre la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos en la Región Pampeana y sobre la influencia que el uso imprime sobre tal variabilidad. Estos conocimientos pueden ser utilizados para mejorar

el muestreo de suelos destinado al manejo de los nutrientes y precisar niveles adecuados de nutrientes en función de dicha variabilidad.

El objetivo de este trabajo es explorar y modelar la variabilidad espacial de atributos de suelo relacionados a su fertilidad en dos suelos contrastantes y bajo diferentes usos del suelo, de modo de proveer herramientas para eficientizar la operación del muestreo de suelos con fines de diagnóstico de la fertilidad.

Materiales y Métodos

Se evaluaron dos sitios con suelos representativos de las sub-zonas de la región Pampeana Argentina. El sitio 1 ubicado en la localidad de Chivilcoy en la Pampa Ondulada (35° 02' 13.1''S, 59°54'48.9''O) y el sitio 2 ubicado en Junín en la Pampa Interior llana (34° 30' 14.7''S, 60° 45'10.3''O). Las dos localidades pertenecen a la provincia de Buenos Aires, Argentina.

Caracterización edafo-climática del sitio de estudio

A pesar de representar dos ambientes edáficos muy diferentes, las localidades son relativamente cercanas, por lo que los sitios de muestreo se encuentran bajo condiciones climáticas similares. El clima es caracterizado como templado húmedo, con una temperatura media anual de 16.8 °C y precipitaciones anuales medias de 1000 mm.

Los suelos de las localidades de Chivilcoy y Junín fueron caracterizados como Argiudol típico y Hapludol típico, respectivamente (SoilSurvey Staff, 2014). En las tres localidades se ubicaron dos lotes contiguos con el mismo tipo de suelo y bajo distinto uso del suelo: uso agrícola (UA) y pastizal natural (PN). Cada par de lotes en cada localidad presentó una composición textural similar lo cual permite asegurar que las diferencias detectadas en los resultados sean adjudicadas únicamente al efecto del manejo y/o sistema productivo imperante en cada sitio de estudio. Esto fue corroborado con las cartas de suelo (escala 1:50 000) correspondientes a la zona de estudio (GeoINTA, 2014) y con determinaciones de la granulometría de los lotes (datos no mostrados).

Al momento del muestreo, los sitios bajo pastizal natural presentaron una cobertura vegetal de 85% (Chivilcoy) y 75% (Junín), dominada por especies nativas y naturalizadas como gramón

(*Cynodactylon* L. Pers), raygrass perenne (*Lolium perenne* L.), flor del pajarito (*Fumaria officinalis* L.), falsa biznaga (*Ammimajus* L.), ortiga mansa (*Lamium amplexicaule* L.), Cardo negro (*Cirsium vulgare* (Savi) Ten), nabón (*Raphanus sativus* L) y pastito de invierno (*Poa annual* L.). En todos los casos el uso agrícola contempló un mínimo de 10 años bajo agricultura continua en siembra directa, y el uso de PN supuso carecer de actividades de siembra, fertilización, abonos o enmiendas orgánicas. El cultivo previo al muestreo de suelos de todos los sitios fue soja (*Glycine max* L.) y el sistema de rotación fue trigo/soja tardía-maíz-soja temprana.

Diseño de muestreo

El diseño de muestreo consistió en una grilla regular georreferenciada, conformada de 100 sitios ubicados a una equidistancia de muestreo de 17 x 17 m. La distancia de muestreo fue seleccionada de acuerdo a estudios previos realizados en Región Pampeana que encontraron escasa correlación espacial de varios atributos físicos y químicos del suelo a distancias de muestreo de 25 m (Alesso et al., 2012).

La fecha de muestreo para las tres localidades fue entre abril-mayo de 2012, 30 días en promedio luego de la cosecha de soja en los lotes agrícolas. Se extrajeron muestras compuestas de suelo a una profundidad de 0-20 cm mediante barreno y fueron recogidas de manera sistemática en cada punto de intercepción de la grilla georreferenciada.

Los análisis físicos y químicos realizados en cada muestra de suelo fueron los siguientes: Carbono oxidable (Cox) mediante Walkley-Black modificado (Nelson y Sommers, 1996); composición granulométrica por el método hidrométrico (Bouyoucos, 1962); fósforo (P) extractable en Fluoruro de Amonio (FNH_4) (Kuo, 1996); pH en relación suelo:agua 1:2.5 (Thomas, 1996); conductividad eléctrica (CE) en pasta (Bower y Wilcox, 1965); y resistencia a la penetración con penetrómetro de golpes (modelo INTA Villegas). Esta metodología consiste brevemente en dejar caer una pesa desde una altura constante hasta 10cm de profundidad contabilizando el número de golpes necesarios para alcanzar los primeros y segundos 5 cm. El número de golpes multiplicado por la constante del penetrómetro, equivalente a 0.25 MPa por golpe para obtener la resistencia de cada capa.

Análisis estadísticos y geoestadísticos

Se realizaron estadísticas descriptivas clásicas de las variables analizadas. Para determinar la presencia de correlación espacial se utilizó el índice de Moran o coeficiente de auto-correlación espacial que requiere la definición de una matriz de ponderación espacial. El índice de Moran oscila entre -1 y 1, cuando la auto-correlación es alta el índice es cercano a -1 o a 1. Un valor cercano a 1 indica auto-correlación positiva y cercano a -1 indica auto-correlación negativa (Córdoba et al., 2013; Peralta et al., 2016).

Para la exploración del semi-variograma experimental se emplearon los 100 puntos de la grilla ubicada en cada sitio de muestreo de manera de lograr un número de observaciones que permitan estudiar la estructura de la variable analizada a la escala espacial deseada. El número mínimo de pares para representar un punto en el semi-variograma fue superior a 30 y el número de puntos en el área de estudio no debe ser inferior a 50 (Webster y Oliver, 2007). La semi-varianza fue calculada según la **Ec. 1** que representa el estimador clásico propuesto por Matheron (Webster y Oliver, 2007).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \left\{ \sum_{i=1}^{N(h)} [z(X_i+h) - z(X_i)]^2 \right\} \quad \text{Ec.1}$$

Donde $\gamma(h)$ = semi-varianza en función de la distancia h ; N = número de pares; $Z(x)$ = valor de una variable en un sitio X ; $Z(x+h)$ = valor de una variable a una distancia h de un sitio X .

El semi-variograma se obtuvo a partir del cálculo de semi-varianza en función de la distancia. En primer lugar se descartaron variaciones de primer orden mediante el análisis y remoción de la tendencia. Los semi-variogramas se realizaron sobre una distancia activa correspondiente al 70-90% de la distancia máxima de muestreo. Todos los variogramas muestrales estimados fueron isotrópicos, dado que no hay una cantidad de puntos suficiente para explorar correctamente la anisotropía. Generalmente, en presencia de estructura espacial, la semi-varianza se incrementa con la distancia hasta alcanzar un valor denominado plateau ("sill"). La distancia a la cual se alcanza la meseta o plateau se denomina amplitud, alcance o rango, y constituye la distancia hasta donde existe dependencia espacial entre las observaciones. La semi-varianza en el origen que no es explicada por el modelo o resulta

imposible de detectar a una escala de muestreo dada se denomina "efecto pepita" ó "nugget". La tendencia de los datos a correlacionarse positivamente es una característica importante de las variables del suelo (Paggi et al., 2013) ya que permite un mapeo preciso del suelo mediante técnicas de interpolación como Kriging que ofrece la posibilidad de una visualización gráfica de la relación entre las propiedades del suelo.

Se evaluaron varias funciones de semi-variograma para elegir el mejor ajuste con los datos. El procedimiento de mínimos cuadrados con el Variowin software se utilizó para ajustar varios modelos de semi-variogramas. Los modelos esférico, exponencial, gaussiano o nugget puro fueron ajustados a los semi-variogramas experimentales. La relación nugget:meseta se usa para clasificar el grado de dependencia espacial de las propiedades del suelo: si la relación es < 0.25 existe una fuerte dependencia espacial; entre 0.25 y 0.75 la dependencia espacial es moderada, mientras que > 0.75 es considerada débil (Cambardella et al., 1994).

Resultados y Discusión

Estadística descriptiva

La variabilidad del suelo fue baja para el pH ($CV < 6\%$) y moderada para Cox ($CV = 25-29\%$) independientemente del uso agrícola o del tipo de suelo. El P extractable presentó alta variabilidad ($CV > 47\%$), especialmente bajo UA. La CE presentó variabilidad moderada en la mayoría de los casos analizados, excepto en suelos de Chivilcoy bajo uso de PN que presentó alta variabilidad. La variabilidad de los suelos para la RP varió dependiendo del uso agrícola y / o del tipo de suelo. La variabilidad moderada sólo se observó para la RP 0-5 cm bajo el PN en Chivilcoy. En el suelo de Chivilcoy, la variabilidad en la RP 5-10 cm fue baja y moderada para PN y UA respectivamente (**Tabla 1**).

Tabla 1. Estadísticas descriptiva de las propiedades del suelo en Chivilcoy y Junin bajo pastizal natural (PN) y uso agricultura continuo (UA). CE= conductividad eléctrica; P = fósforo extractable; Cox = carbono oxidable; RP = resistencia a la penetración; Max = máximo; Min = mínimo; Mn = mediana; CV = coeficiente de variación.

Sitio/suelo	Uso	n	Propiedad	Media	CV (%)	Min	Max	Mn
Chivilcoy	PN	100	pH	5.93	3.66	5.42	6.70	5.94
Argiudoll		100	EC ($dS m^{-1}$)	0.24	59.09	0.11	1.24	0.21
		100	Extractable P ($mg kg^{-1}$)	20.90	48.06	3.84	46.66	19.15
		100	OC (%)	3.27	25.13	1.61	5.79	3.19
		100	PR 0-5cm (Mpa)	3.68	29.00	1.50	7.50	3.50
		100	PR 5-10cm (Mpa)	7.22	22.32	4.00	13.5	7.00
	UA	99	pH	5.89	2.72	5.20	6.24	5.89
		99	EC ($dS m^{-1}$)	0.17	27.10	0.10	0.37	0.17
		99	Extractable P ($mg kg^{-1}$)	8.82	77.28	0.28	34.66	8.82
		99	OC (%)	2.52	26.09	1.42	4.47	2.52
		99	PR 0-5cm (Mpa)	1.43	37.08	0.50	3.00	1.43
		99	PR 5-10cm (Mpa)	4.22	24.50	2.00	6.50	4.22
Junin	PN	99	pH	8.62	2.97	7.60	9.24	8.64
Hapludoll		99	EC ($dS m^{-1}$)	0.92	28.39	0.38	1.74	0.85
		99	Extractable P ($mg kg^{-1}$)	8.39	47.18	1.30	19.9	8.14
		99	OC (%)	3.61	29.81	1.14	6.24	3.64
		99	PR 0-5cm (Mpa)	2.45	43.96	0.75	5.00	2.50
		99	PR 5-10cm (Mpa)	3.50	42.26	1.00	9.00	3.00
	UA	93	pH	5.53	5.24	5.2	7.09	5.48
		93	EC ($dS m^{-1}$)	0.26	19.31	0.17	0.41	0.26
		93	Extratable P ($mg kg^{-1}$)	9.21	84.22	1.3	48.08	6.91
		93	OC (%)	3.02	28.45	1.55	5.35	2.70
		93	PR 0-5cm (Mpa)	0.88	49.36	0.25	3.00	1.00
		93	PR 5-10cm (Mpa)	2.41	50.99	0.00	8.00	2.00

El uso agrícola llevó a cambios significativos en propiedades del suelo relevantes relacionadas a su fertilidad, como puede verse en la **Tabla 1**. La variabilidad general en ambos sitios indica que el pH, propiedad bajo fuerte influencia del material parental y de las condiciones climáticas durante la formación del suelo, es una propiedad con baja variabilidad espacial en cortas distancias, mientras que la disponibilidad de P extractable presentó la mayor variabilidad en todas las situaciones. Estos resultados concuerdan con otros estudios en la Región Pampeana (Alvarez et al., 2006; Alesso et al., 2012). La elevada variabilidad del P extractable implica que para obtener un estimador confiable de la disponibilidad de P es necesario un número considerable de sub-muestras por cada muestra compuesta. En estudios previos se ha propuesto un número de 50 sub-muestras para la determinación de P extractable (Alvarez et al, 2006).

La variabilidad espacial puede ser alterada por una serie de perturbaciones naturales y antropogénicas (Fraterrigo y Rusak 2008; Xi et al 2008), incluida la actividad agrícola. En el presente trabajo la agricultura tendió a disminuir los contenidos de Cox con un efecto más marcado en el sitio de Chivilcoy, con una historia agrícola más prolongada, pero la variabilidad de estos contenidos se mantuvo similar entre los usos, e incluso entre los suelos, con valores CV= 25-30%. Estos valores de la variación en el contenido de Cox a escala de parcela se observaron en los

suelos de otras regiones del mundo (González-Pedraza et al, 2012; Xiong et al, 2016). La agricultura redujo fuertemente el contenido de P en el sitio 1 mientras que no tuvo ningún efecto en el sitio Junín, lo que refleja las diferencias en la productividad de los cultivos y de la historia de la fertilización. Sin embargo, la agricultura aumentó la variabilidad del P en todos los casos analizados, probablemente como resultado de la fertilización localizada y la baja movilidad de los fosfatos en los suelos. El uso agrícola redujo el valor medio de la CE y su variabilidad con respecto al uso de pastizal. Este resultado puede estar relacionado con una mayor absorción de iones, la exportación por los cultivos y en consecuencia, una mayor redistribución de estos iones por la descomposición del rastrojo. La variabilidad del pH del suelo no fue afectada por el uso del suelo en ambos sitios.

La CE, los porcentajes de arcilla y de Cox, RP 5-10 y P extractable fueron las variables del suelo que mostraron correlación espacial, dependiendo del sitio y uso. Las variables restantes no mostraron correlación espacial (**Tabla 2**) lo que demuestra que estas variables tienen un patrón espacial aleatorio dentro de los lotes analizados (Mzuku et al., 2005).

Sólo algunas variables en determinados sitios presentaron auto-correlación espacial a la escala de análisis utilizada (grillas de 17 x 17 m) lo que indicaría que el grado de dependencia espacial

Tabla 2. Índice de autocorrelación espacial (IM) en las variables del suelo para uso agrícola (UA) y pastizal natural (PN). CE= conductividad eléctrica; P = fósforo extractable; Cox = carbono oxidable; RP = resistencia a la penetración.

Propiedad	Sitio-Uso							
	Chivilcoy-UA		Chivilcoy-PN		Junín-UA		Junín-PN	
	IM	Valor p	IM	Valor p	MI	Valor p	IM	Valor p
pH	0.16	0.09	-0.04	0.45	0.07	0.21	0.021	0.32
CE	0.008	0.42	0.01	0.24	0.028	0.32	0.34	0.002
P	0.25	0.01	0.3	0.002	0.12	0.47	0.09	0.13
Arena	-0.07	0.27	0.01	0.42	-0.006	0.47	0.09	0.13
Limo	-0.12	0.13	-0.05	0.27	0.042	0.22	0.02	0.31
Arcilla	-0.07	0.28	0.09	0.25	0.27	0.002	0.14	0.034
Cox	0.17	0.02	-0.03	0.35	0.25	0.002	0.15	0.032
RP 0-5 cm	0.13	0.13	0.064	0.14	0.05	0.21	0.047	0.34
RP 5-10 cm	0.12	0.12	0.076	0.11	0.13	0.002	0.001	0.49

Valores en negrita indican diferencias a $p < 0.05$, valores en *italica* indican diferencias a $p < 0.10$.

de cada variable, si bien permite mapear la propiedad con cierta precisión, es sitio-específica. Es decir, que no existe un patrón relacionado al tipo de suelo y uso. Sólo el contenido de Cox con rangos distintos entre sitios resultó la variable con patrones de auto-correlación espacial detectables con mayor probabilidad. El Cox resume de una manera integradora la variabilidad de todas las propiedades del suelo que tienen influencia sobre el crecimiento de las plantas, ya que la acumulación de materia orgánica es causa y consecuencia directa de la producción vegetal. Con lo cual, es esperable que el contenido de Cox presente una estructura espacial fuerte ligada al crecimiento de los cultivos.

Los valores de la relación nugget-sill (variabilidad total) de estas variables bajo uso de pastizal (**Tabla 3**) indicaron una fuerte dependencia espacial para P y porcentaje de arcilla, y moderada para CE y contenido en Cox (Cambardella et al., 1994). Con respecto al rango, el contenido de Cox fue la variable con mayor distancia a la cual las muestras son espacialmente independientes entre sí (Tabla 3). En los suelos agrícolas el contenido de Cox presentó una dependencia espacial moderada en el sitio 1 y fuerte en el sitio 2, mientras que la RP en la capa sub-superficial del suelo en el sitio 2 mostró una dependencia espacial moderada (Tabla 3).

La tendencia de los datos a correlacionarse positivamente ofrece la posibilidad de una visualización gráfica de la relación entre las propiedades del suelo. Además, puede ofrecer mejoras en el muestreo del suelo y en las interpretaciones posteriores a los análisis de suelo. En la **Figura 1** se muestran los mapas resultantes con los patrones espaciales de variables de suelo con auto-correlación espacial detectada en el sitio

Junín bajo uso de pastizal obtenidos mediante la técnica de interpolado por Kriging.

El rango es un dato relevante que debe ser considerado de acuerdo a los objetivos del muestreo. El rango para las variables que muestran auto-correlación espacial varió entre 30 y 70 m. Por ello, se propone una distancia media de 50 m cuando el objetivo del muestreo es obtener sub-muestras independientes del suelo, como lo requiere el muestreo compuesto típico. En los estudios previos conducidos en la región Pampeana arenosa, con una distancia similar entre muestras se indicaron rangos cercanos a 50 m para P extraíble y postasio (K) intercambiable (Alesso y Pilatti, 2008) y para la concentración de nitrato residuales después de un cultivo de maíz (Kirtón, 2015). En un Molisol vértico situado cerca de la Región Pampeana, Cruzate y Rivero (2010) también encontraron valores de rango de 50 m para el contenido de P extractable. Aún cuando el diseño del muestreo y especialmente la distancia entre las muestras de suelo pueden conducir a grandes diferencias en los patrones de los variogramas (Webster, 1985, Diggle y Ribeiro, 2007), el uso de una distancia de muestreo inferior a 10 carece de sentido agronómico, incluso en programas de manejo sitio-específico de los cultivos y nutrientes. Kerry y Oliver (2004) indicaron que una guía aproximada para elegir un intervalo de muestreo futuro debería ser menor que la mitad del rango del variograma. Para nuestro estudio significaría una distancia de 16 m en el caso de P extractable en el sitio Chivilcoy bajo pastizal, muy similar a la distancia empleada en ese sitio (17 m).

Tabla 3. Parámetros de los modelos geoestadísticos de las variables de suelo bajo uso de pastizal (PN) y agrícola continuo (UA) en los sitios 1 (Chivilcoy) y 2 (Junín). CE= conductividad eléctrica; P = fósforo; Cox = carbono oxidable; RP = resistencia a la penetración.

Propiedad	Sitio	Uso	Rango (m)	Nugget (Co)	Sill (C+Co)	Relación Co/(C+Co)	Dependencia espacial
P	1	PN	32.5	20	90	22.2%	Fuerte
Cox	2	PN	62.7	0.18	0,4	45%	Moderada
CE	2	PN	39	0.016	0.046	34.8	Moderada
Arcilla	2	PN	50.5	10	44	22.7	Fuerte
Cox	1	UA	28.8	0.2	0.45	44.4%	Moderada
Cox	2	UA	69.6	0.07	0.29	24.13%	Fuerte
RP 0-5 cm	2	UA	35	0.06	0,22	27.3%	Moderada

Consideraciones Finales

La variabilidad ambiental asociada con los rendimientos de los cultivos puede ser explicada en gran medida por la variabilidad en propiedades de los suelos, pero sólo una minoría de los productores en Argentina realiza recomendaciones de fertilización considerando la variabilidad especial dentro del lote. El uso agrícola llevó a cambios significativos en propiedades del suelo relevantes relacionadas a su fertilidad en ambos sitios, como por ejemplo, en el contenido de Cox y P extractable superficial. El pH, propiedad bajo fuerte influencia del material parental y de las condiciones climáticas durante la formación del suelo, es una propiedad con baja variabilidad espacial en cortas distancias, mientras que la disponibilidad de P extractable presentó la mayor variabilidad en todas las situaciones. Esta alta variabilidad implica que para obtener un estimador confiable de la disponibilidad de P es necesario un elevado número de sub-muestras por cada muestra compuesta. Es por ello que cuando el objetivo central del muestreo es el diagnóstico de la fertilidad fosforada no pueden ahorrarse esfuerzo y recursos en el momento del muestreo, dado que un análisis de suelos por excelencia no debe enmendar un muestreo deficiente.

Como resultado de este y otros trabajos realizados en la Región Pampeana se propone una distancia mínima de 50 m entre muestras cuando el objetivo del muestreo es obtener sub-muestras independientes del suelo como lo requiere el muestreo compuesto típico para el diagnóstico de la fertilidad. Estos conocimientos pueden ser utilizados para mejorar el muestreo de suelos

destinado al manejo de los nutrientes y precisar niveles adecuados de nutrientes en función de dicha variabilidad.

Conclusiones

El pH fue la propiedad con menor variabilidad independientemente del uso, mientras que el contenido de P fue la más heterogénea, especialmente en los lotes bajo uso agrícola. Esta alta variabilidad implica que para obtener un estimador confiable de la disponibilidad de P es necesario un alto número de sub-muestras por cada muestra compuesta.

La agricultura tendió a disminuir los contenidos de Cox, pero la variabilidad de estos contenidos se mantuvo similar entre los distintos usos, e incluso entre los suelos, con valores CV que oscilaron entre el 25 y el 30%. La agricultura aumentó la variabilidad del fósforo extractable en todos los casos, probablemente como resultado de la fertilización localizada y la baja movilidad de los fosfatos en los suelos. El uso agrícola redujo el valor medio de la conductividad eléctrica y su variabilidad espacial, con respecto al uso de pastizal. Este resultado puede estar relacionado con una mayor absorción de iones, la exportación de los cultivos y la redistribución de estos iones por la descomposición del rastrojo. La variabilidad del pH del suelo no fue afectada por el uso del suelo en ambos sitios.

Sólo algunas variables en determinados sitios presentaron auto-correlación espacial a la escala de análisis utilizada (grillas de 17 x 17 m) lo que indicaría que tal correlación, si bien permite

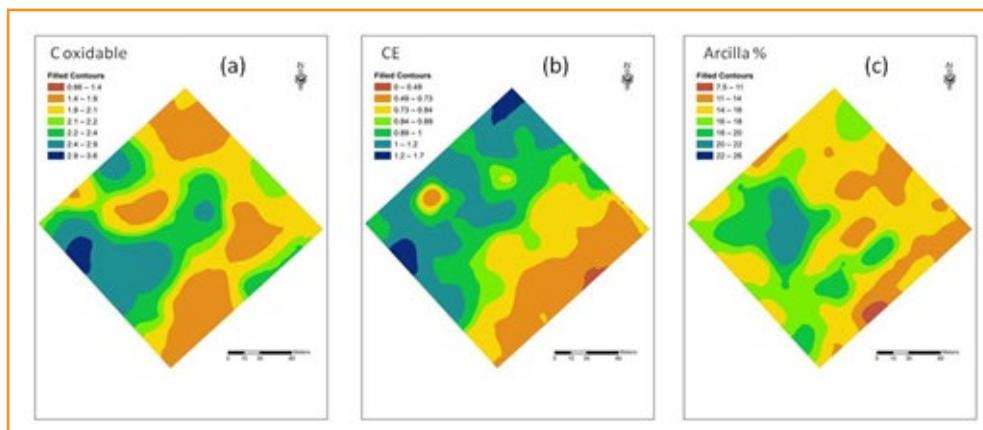


Figura 1. Mapas del sitio Junín bajo uso de pastizal de porcentaje de C oxidable (a), CE (b) y porcentaje de arcilla (c).

mapear la propiedad con cierta precisión, es sitio-específica. Es decir, que no existe un patrón relacionado al tipo de suelo y uso. Sólo el contenido de Cox con rangos distintos entre sitios presentó patrones de auto-correlación espacial detectables con mayor probabilidad.

Bibliografía

- Alesso, A., y M.A. Pilatti. 2008. Variabilidad espacial de la densidad del suelo, fósforo extractable y potasio intercambiable. En Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, Argentina.
- Alesso, C.A., M.A. Pilatti, S.C. Imhoff, y M. Grilli. 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la Pampa Llana Santafesina. *Ciencia del Suelo* 30: 85-93.
- Álvarez, R., H. Steinbach, B. Bauschen, y J.N. Ejalbert. 2006. Variabilidad espacial de propiedades de los suelos de la pampa ondulada: efecto sobre el número de submuestras a tomar para el diagnóstico de la fertilidad. En Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, Septiembre 2006.
- Bramley, R.G.V. 2009. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. *Crop y Pasture Science* 60: 197-217.
- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54:464-465.
- Bower, C.A., y L.W. Wilcox. 1965. Soluble salts. En: Black C.A. (ed.). Pp. 933- 951, *Methods of soil analysis: Agronomy. SSSA and ASA. Madison, W.I., USA.*
- Cahn, M.D., J.W. Hummel, y B.H. Brouer. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1240-1248.
- Cambardella, C. A., T.B. Moorman, T.B. Parkin, D.L. Karlen, J.M. Novak, R.F. Turco, y A.E. Konopka. 1994. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1501-1511.
- Cambardella, C.A., y D.L. Karlen. 1999. Spatial Analysis of Soil Fertility Parameters. *Precision Agriculture* 1: 5-14.
- Cook, S.E., y R.G.V. Bramley. 1998. Precision agriculture - Opportunities, benefits and pitfalls. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38, 753-763. doi:10.1071/EA97156.
- Córdoba, M., C. Bruno, J.L. Costa, y M. Balzarini. 2013. Subfield management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. *Computers and Electronics in Agriculture*. 97, 6-14.
- Cruzate, G., y E. Rivero. 2010. Variabilidad espacial y temporal de P y Zn en siembra directa y la relación con algunas propiedades de un suelo en Paraná. En Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Argentina. Junio 2010.
- Diggle, P.J., y P.J. Ribeiro Jr. 2007. *Model-based Geostatistics*. Springer. New York, USA. 241 pp.
- Di Pietro, L.B., L. Marbán y V. Ritcher. 1986. Variabilidad Espacial de parámetros físicos y químicos de un suelo de Pergamino. *Ciencia del Suelo* 2: 99-106.
- Fraterrigo, J.M., y J.A. Rusak. 2008. Disturbance-driven changes in the variability of ecological patterns and processes. *Ecological Letters* 11:756-770.
- Giuffré, L., J. Sierra, C. Fumagalli, y S. Ratto. 1994. Variabilidad espacial de fósforo en suelo y planta en un Argiudol típico bajo cultivo de maíz. *Revista Facultad de Agronomía* 14: 1-8.
- González-Pedraza, A.F., J.C. Rey, y P.J.L. Atencio. 2012. Variabilidad espacial de los suelos de la unidad experimental La Glorieta. En Actas del XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina. Abril 2012.
- Goovaerts P., 1998. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press, 483 pp.
- Hu K., S. Wang, H. Li, F. Huang, y B. Li. 2014. Spatial scaling effects on variability of soil organic matter and total nitrogen in suburban Beijing. *Geoderma* 226/227: 54-63.
- Isaaks E.H., y R.M. Srivastava. 1989. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, Nueva York.
- Kerry, R., y M.A. Oliver. 2004. Average variograms to guide soil sampling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5 (4): 307-325.
- Kirton, T. 2015. Spatial variability of maize and potential losses due to leaching associated with uniform and site-specific nitrogen fertilizations. *Agronomist Tesis para acceder al grado de Ingeniero Agrónomo, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.*
- Kravchenko, A., y D.G. Bullock. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy J.* 91: 393-400.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus, En: Sparks D.L., (Ed). "Methods of soil analysis. Part 3 Chemical methods". SSSA and ASA. Madison, W.I., USA. Pp. 869-920.
- León, R.J.C. 1992. Geographic limits of the region, Geomorphology and geology, Regional subdivisions, Floristic aspects, Description of the vegetation. En R. T. Coupland (Ed.). *Natural Grasslands: Introduction and Western Hemisphere* (pp.369-387) Elsevier, Amsterdam.
- Liu, D.W., Z.M. Wang, y B. Zhang. 2006. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 113: 73-81.
- Mallarino, A.P. 1996. Spatial Variability Patterns of phosphorus and Potassium in No-Tilled Soils for Two Sampling Scales. *Soil Science Society of America Journal* 60: 1473-1481.

- Mzuku, M., R. Khosla, R. Reich, D. Inman, F. Smith, y L. MacDonald. 2005. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. *Soil Science Society of America Journal* 69:1572-1579.
- Nelson, D. W., y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. En: Page A. L. *Methods of Soil Analysis. Parte 2. American Society of Agronomy, Agronomy 9. Madison (WI), USA.* Pp. 539-579.
- Paggi, M., N.R. Peralta, M. Calandroni, F. Cabria, J.L. Costa, y V. Aparicio. 2013. Identification of soil series with apparent electrical conductivity sensors in the Southeastern Pampas. *Ciencia del suelo*. 31(2): 175-188.
- Peralta, N.R.; J.L. Costa, M. Balzarini, y M. Angelini. 2013. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the Southeastern Pampas. *Canadian Journal of Soil Science*. 93: 205-218.
- Peralta, N.R. y J.L. Costa. 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Computers and Electronics in Agriculture*. 99: 218-226.
- Peralta, N.R., P. Barbieri, T. Gowland, V. Aparicio, y J.L. Costa. 2015. Precision agriculture: variable rate nitrogen in malting barley. *Ciencia del suelo*. 33(1): 131-137.
- Peralta N.R.; J.L. Costa, M. Balzarini, M. Castro Franco, M. Córdoba, y D. Bullock. 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*. 110: 103-113.
- Peralta, N.R, Y. Assefa, J. Du, C. Barden, e I. Ciampitti. 2016. Mid-Season High-Resolution Satellite Imagery for Forecasting Site-Specific Corn Yield". *Remote Sensing*. 8(10), 848
- Ruffo M.L., G.A. Bollero, D.S. Bullock, y G. Bullock. 2006. Site specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precision Agriculture* 7: 327-342.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Thomas, G.W. 1996. Soil pH and Soil Acidity. En: Sparks DL (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3*. Pp: 475-490. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Trangmar, B.B., R.S. Yost, y G. Uehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy* 38: 45-94.
- Uricarriet, S., M. Niborski, y C.M. Kvolek. 2011. Atributos de suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la Pampa arenosa. *Ciencia del Suelo* 29:49-59.
- Webster, R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advances in Soil Science* 3: 1-70.
- Webster, R, y Oliver MA. 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. Wiley. 2 ed. 333 pp.
- Xi, W., R.K. Peet, y D.L. Urban. 2008. Changes in forest structure, species diversity and spatial pattern following hurricane disturbance in a Piedmont North Carolina forest. USA. *Journal of Plant Ecology* 1:43-57.
- Xiong, X., S. Grunwald, R. Corstanje, C. Yuk., y N. Bliznyuk. 2016. Scale-dependent variability of soil organic carbon coupled to land use and land cover. *Soil and Tillage Research* 160: 101-109.
- Zubillaga, M.M., M. Carmona, A. Latorre, M. Falcon, y M.J. Barros. 2006. Estructura espacial de variables edáficas a nivel de lote en Vedia—Provincia de Buenos Aires. En *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Salta, Argentina. ●

Fertilización nitrogenada en agropiro alargado en función de zonas de manejo delimitadas mediante la conductividad eléctrica aparente

P.L. Cicore^{1,*}, M. Tancredi, M.², G.D. Berone^{1,2}, N.R. Peralta^{2,3}, M.A. Marino², y J.L. Costa^{1,2}

¹EEA Balcarce (INTA); ²FCA-UNMDP; ³CONICET

*Contacto: cicore.pabloleandro@inta.gob.ar

Introducción

La productividad de una pastura es la consecuencia de las múltiples interacciones que tiene con el ambiente edafoclimático que la rodea. En este sentido, en gramíneas forrajeras templadas, la baja disponibilidad de nitrógeno (N) limita el crecimiento ya que afecta principalmente la elongación foliar (Gastal y Lemaire, 1988). Por otra parte, la producción de forraje de estas especies también es afectada por la oferta de agua (Durand, et al., 1997) que, como en el caso de una deficiencia de N, reduce la expansión de las hojas. No obstante, sequías intensas también pueden provocar una disminución de la eficiencia fotosintética (Belanger et al., 1992). La humedad y el N además de limitar el crecimiento interaccionan entre ellos. Por ejemplo, la disponibilidad de agua influye en la oferta de N (Andrade et al., 2002).

Además de variar en el tiempo, la oferta de agua, puede cambiar espacialmente debido a que la misma está asociada a la topografía y a propiedades edáficas (e.g: arcilla, materia orgánica y sales), (Pachepsky et al., 2001; McCutcheon et al., 2006) las cuales presentan una elevada heterogeneidad espacial en suelos ganaderos (Cicore et al., 2015). Por lo tanto, es posible que se produzcan variaciones espaciales en la productividad y en la respuesta al agregado de N.

La identificación de zonas de manejo (ZM), las cuales son subregiones que poseen potenciales de producción diferentes, permitiría un uso más eficiente de recursos (Doerge, 1999). En cultivos de cosecha los mapas de rendimiento son una de las herramientas más usadas para delimitar ZM. Sin embargo, en los sistemas ganaderos cuantificar la variabilidad espacial de la producción de biomasa es dificultoso dado que la cosecha de forraje suele ser realizada por el animal (Schellberg et al., 2008). La medición

de la conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo sería una herramienta adecuada para determinar la variabilidad de la productividad de las pasturas (Corwin y Lesch, 2003) ya que este parámetro está influenciado por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo, [e.g: salinidad (Rhoades et al., 1976), pH (Serrano et al., 2010), textura (Sudduth et al., 2003), MO (Corwin y Lesch, 2005)] que afectan la productividad.

Entre las propiedades de suelo, que afectan la medición de la CEa, una de las más importantes es la disponibilidad de agua (Hossain et al., 2010) debido a que para un rango de salinidad dado existe una relación lineal entre estas propiedades (Hanson y Kaita, 1997). Por lo tanto, dado que la humedad edáfica es una de las principales limitantes para el crecimiento de las pasturas templadas (Durand et al., 1997) la CEa podría ser usada para determinar la variabilidad de la productividad y delimitar ZM en estos recursos forrajeros.

La delimitación de ZM permite la aplicación de dosis diferente de N dentro de un lote (Bulllock et al., 2009). En este sentido, Peralta et al. (2015) y Albarenque et al. (2016) encontraron, en trigo y maíz respectivamente, que la respuesta a la fertilización nitrogenada es diferente entre ZM. En suelos de aptitud ganadera Cicore et al. (2015) delimitaron ambientes edáficos utilizando la medición georreferenciada de la CEa ya que hallaron una elevada relación entre este parámetro y ciertas características de suelo. Además, en la literatura hay trabajos que muestran la relación entre CEa y productividad de las pasturas (Serrano et al., 2010) Sin embargo, solo Belanger et al. (2017) analizaron la relación entre ZM y N en sistemas pastoriles. No obstante, estos autores no analizaron respuesta a dosis de N ya que evaluaron respuesta a diversas fuentes de este nutriente.

El objetivo de este estudio fue evaluar la interacción entre ZM y dosis de N sobre la producción de forraje de una pastura de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum* (Podp.) Barkworth & D.R.Dewey Phil) en primavera tardía y otoño.

Materiales y Métodos

Sitio experimental, suelo y caracterización meteorológica y climática

La experiencia se realizó en la reserva 7 de la Unidad Integrada Balcarce (UIB) INTA - Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP) (37° 45' S, 58° 18' O, 130 m.s.n.m.). Se utilizó un lote de 7.5 ha que tenía implantada una pastura de agropiro alargado establecida sobre un complejo de suelos Natracuol típico, Natracualf típico y Natracualf mólico. Los datos meteorológicos y climáticos (serie 1990-2014) fueron suministrados por el Laboratorio de Agrometeorología de la UIB (Figura 1).

Muestreo de CEa y delimitación de zonas de manejo

El Veris 3100® (Veris 3100, Division of Geoprobe Systems, Salina, KS) se calibró según las instrucciones del fabricante (Veris Technologies, 2001), fue remolcado a través del lote con una pick-up (Figura 2) midiendo la CEa hasta los 30 cm de profundidad y georreferenciando los datos con un DGPS de precisión submétrica (Trimble R3, Trimble Navigation Limited, USA). El lote se recorrió en transectas paralelas separadas aproximadamente 20 m porque mayores distancias pueden provocar pérdida de información (Farahani y Flynn, 2007).

Para cuantificar la auto-correlación espacial de la CEa se confeccionó un semi-variograma experimental. A continuación, se procedió al ajuste de un modelo teórico para describir la variabilidad de la CEa. Finalmente se realizó la predicción en puntos del lote donde no se midió la CEa mediante el método de interpolación kriging ordinario. El mapa obtenido fue procesado dividiéndolo en dos ZM mediante Kriging ordinario [zona de baja CEa (ZMB) y zona de alta CEa (ZMA)]. Los valores y amplitud de las zonas fueron obtenidos mediante la clasificación de los datos en cuantiles. Para la realización de cada uno de los pasos anteriormente mencionados se utilizó el software ArcGIS 9.3.1 (ESRI, Redlands, CA).

Tratamientos y diseño experimental

Durante un rebrote de primavera avanzada (PRIM) y un rebrote otoñal (OTO) se evaluó la respuesta al agregado de N. Para ello, dentro de cada ZM, tres sectores (bloques) fueron georreferenciados. Los bloques fueron divididos en cuatro unidades experimentales (UE) que fueron fertilizadas con N bajo la forma de urea (0-46-0) utilizando las siguientes dosis: 0, 50, 100 y 150 kg de N ha⁻¹ (N0, N50, N100 y N150 respectivamente). Cada UE midió 1,5 x 2 metros y para evitar deficiencias de P fueron fertilizadas con 20 kg ha⁻¹ de este nutriente bajo la forma de superfostato triple (SFT). El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con un arreglo en parcelas divididas, donde la parcela principal estaba conformada por la ZM y la subparcela por el tratamiento de fertilización.

Variables medidas y/o estimadas

En cada uno de los bloques, previo al rebrote PRIM, se realizó un muestreo de suelo tomando tres sub-muestras dentro de cada repetición. Las muestras fueron separadas en dos estratos (0-20 y 20-40 cm) y con una fracción se determinó la humedad del suelo mediante el método gravimétrico (diferencia de peso húmedo y peso seco obtenido por secado en estufa a 105°C por 24 hs). El resto de cada muestra de suelo se secó en estufa con circulación de aire forzada a una temperatura de 30° C, se molió y tamizó hasta pasar por una malla 2 mm para realizar las determinaciones de pH (relación suelo: agua 1:2.5), materia orgánica (MO) (Walkley y Black, 1934), N mineral bajo la forma de nitratos (N-NO₃-) (Bremner, 1965) y salinidad. Para este último parámetro se elaboró pasta saturada de suelo para su posterior filtración. En el extracto se midió la salinidad en un equipo Thermo Orion modelo 150 Aplus.

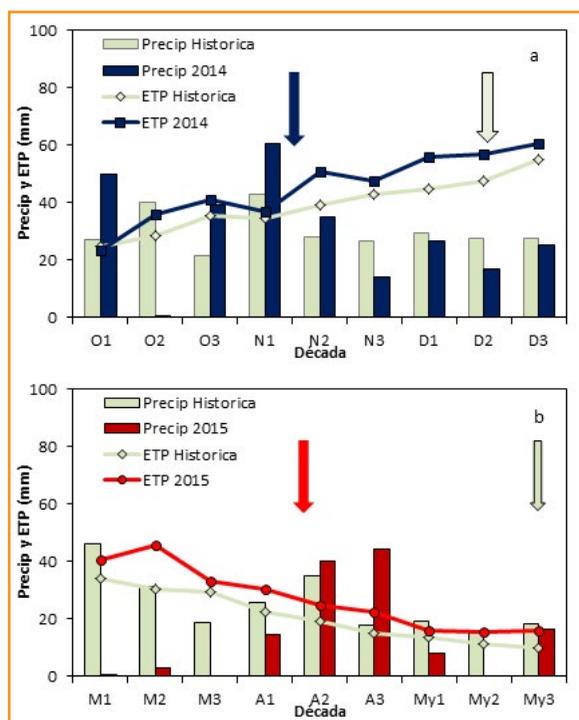


Figura 1. Precipitaciones y ETP decaídas antes y durante los rebrotes de (a) OTO y (b) PRIM y medias decaídas históricas del periodo 1990/2014. Las fechas negras y grises indican los momentos de inicio y fin de los experimentos respectivamente. O = Octubre; N = Noviembre; D = Diciembre; M = Marzo; A = Abril; My = Mayo. 1 = día 1 al 10 de cada mes, 2 = día 11 al 20 de cada mes, 3 = 21 al 30 ó 31 de cada mes.

Al inicio de cada rebrote (10/11/14 en PRIM y 10/04/15 en OTO), en cada UE, se realizó un corte de empajamiento y se aplicaron los respectivos tratamientos. Para cuantificar la BA (kg MS ha^{-1}) el 15/12/14 en PRIM y 27/05/15 en OTO, aproximadamente 500°Cd después del corte de empajamiento (temperatura base 4°C ; Borrajo y Alonso, 2014), se efectuó el corte de forraje a 3 cm de altura del suelo con una motosegadora mecánica experimental. El forraje verde (FV) cosechado se pesó en el campo y se extrajo una submuestra la cual se pesó húmeda, se secó en estufa a 65°C con circulación de aire hasta peso constante y se volvió a pesar para determinar el porcentaje de materia seca (%MS). Los datos de BA, se calcularon a partir del FV y el %MS.

Para cada tratamiento de N, en cada ZM, se calculó la EUN por la pastura de agropiro alargado ($\text{kg de BA kg de N aplicado}^{-1}$) como la diferencia entre la BA obtenida en los tratamientos con suministro de N (BAN) y el testigo (BAT) dividido la dosis de N aplicada ($(\text{BAN}-\text{BAT})/\text{Dosis N}$).



Figura 2. Veris 3100® remolcado por una pick-up en una pastura de agropiro alargado.

Análisis estadístico

Se calcularon estadísticos descriptivos por medio del procedimiento MEANS (SAS, SAS Institute Inc., 2007). Se realizaron análisis de varianza (ANVA) utilizando el procedimiento GLM (SAS, SAS Institute Inc., 2007). Cuando algún ANVA indicó diferencias significativas, la comparación de medias se realizó mediante el test de la diferencia mínima significativa (DMS).

Resultados y discusión

Caracterización climática y meteorológica de los rebrotes PRIM y OTO

En PRIM las precipitaciones, previas a la instalación del ensayo (149 mm) y durante el experimento (84 mm) fueron similares a la media histórica (Figura 1a). En cambio, en OTO, las precipitaciones registradas previas al periodo evaluado fueron inferiores a los datos promedio del periodo 1990-14 (18 mm vs. 122 mm respectivamente) y para el periodo experimental fueron similares (101 mm vs. 97 mm respectivamente) (Figura 1b). Sin embargo, en este experimento, se determinó un balance hídrico positivo (realizado en base a los datos de precipitaciones menos la ETP) (Figura 1b) que no fue observado en PRIM ya que los datos de la ETP, de este último rebrote, fueron marcadamente superiores a las precipitaciones (Figura 1a).

Variabilidad espacial de la CEa y delimitación de ZM

En el análisis descriptivo, se observó que los valores de CEa promedio, máximo, mínimo y el

desvío estándar fueron 6.9; 1.9; 25.5 y 5.6 mS m⁻¹ respectivamente. Además, el coeficiente de variación fue 81%. La elevada variabilidad de la CEa estaría relacionada a la heterogeneidad espacial de las propiedades del suelo presente en este tipo de suelos (Cicore et al., 2015). Un alto grado de variación a nivel de lote, podría ser un indicador de que el manejo uniforme, sería ineficiente (Moral et al., 2010).

En la Figura 3 se presenta el mapa de distribución espacial de las ZM. Para la delimitación de las mismas se realizó el semivariograma empírico. El modelo matemático que obtuvo el menor cuadrado medio del error fue el esférico (datos no mostrados). A partir de estos datos se confeccionó el mapa utilizando sólo dos rangos de CEa (ZMB y ZMA) debido a que la literatura señala que la división en un gran número de zonas no genera información adicional y el manejo del lote se dificulta (Peralta et al., 2013).

Caracterización edáfica

La caracterización edáfica fue realizada previa al rebrote PRIM. Los valores de MO determinados en los primeros 20 cm de suelo en las ZM fueron 3.9% y 3.4% para ZMA y ZMB respectivamente y son característicos de lotes compuestos por suelos natracuales y natracualfes. El pH mostró poca variabilidad entre ZM (10.0 y 10.3 para ZMA y ZMB respectivamente) y nuevamente los valores son característicos de suelos ganaderos habitualmente encontrados en esta región (Taboada, 2006). La disponibilidad de N-NO₃⁻ hasta los 40 cm de profundidad fue baja debido a la elevada tasa de crecimiento de la pastura, en esta época del año, que favorece la continua captura del N disponible (de Prado et al., 2001) y similar entre ZM (1.10 y 1.35 ppm). El ECext no mostró gran variabilidad entre ZM (3.0 y 3.5 dS m⁻¹ para ZMA y ZMB respectivamente) y siendo estos valores de escaso impacto para el crecimiento de agropiro (Priano y Pilatti, 1989). Por otra, parte es relevante mencionar que la humedad gravimétrica del suelo, hasta los 40 cm de profundidad fue superior en ZMA (42%) respecto de ZMB (35%). Debido a que las precipitaciones fueron homogéneas en el lote, el mayor contenido de humedad gravimétrica en la ZMA podría deberse a cuestiones de relieve y/o textura.

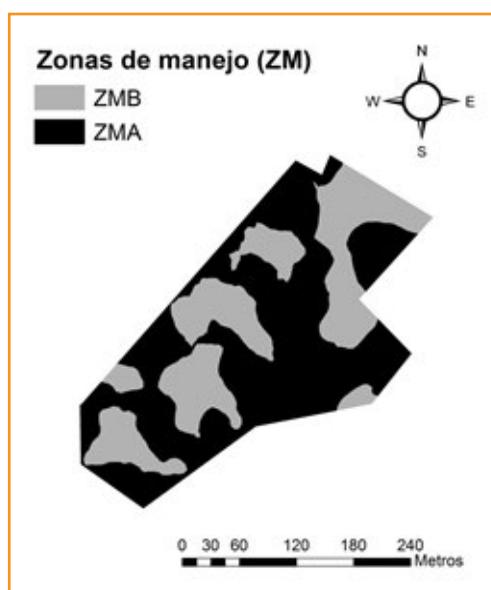


Figura 3. Mapa de distribución espacial de las zonas de manejo (ZM) delimitadas mediante la conductividad eléctrica aparente (CEa) medida hasta los 30 cm de profundidad): zona de baja CEa (ZMB, color gris) y zona de alta CEa (ZMA, color negro). () Sitios experimentales (bloques).

Acumulación de forraje en los rebrotes PRIM y OTO

En PRIM la BA acumulada varió, según el nivel de disponibilidad de N y la ZM, entre 1965 y 4960 kg ha⁻¹ (Tabla 1). En cambio, en OTO varió entre 1720 y 2800 kg ha⁻¹. La duración de los periodos experimentales, en tiempo térmico, fue similar (539 y 552°d en PRIM y OTO respectivamente).

En ninguno de los rebrotes se registró interacción entre los factores de tratamiento ZM y dosis de N (Tabla 1). En PRIM se registró efecto significativo del tratamiento de fertilización, lo que coincide con lo reportado con Marino y Agnusdei (2007) en ensayos realizados en primavera avanzada en pasturas de festuca.

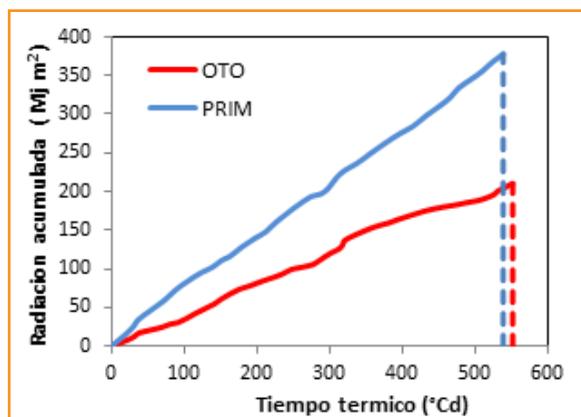


Figura 4. Relación entre el tiempo térmico (Cd°) acumulado y la radiación fotosintéticamente activa acumulada (Mj m²) en los rebrotes PRIM y OTO. Las líneas punteadas indican los momentos de corte del forraje.

Tabla 1. Biomasa aérea acumulada (BA) de una pastura de Agropiro alargado durante un rebrote primaveral (PRIM) y un rebrote otoñal (OTO); para dos zonas de manejo (ZM)[zona de baja CEa (ZMB) y zona de alta CEa (ZMA)] y cuatro tratamientos de fertilización nitrogenada (N0, N50, N100 y N150).

		BA (kg MS ha ⁻¹)	
		PRIM	OTO
ZMA	N 0	2713	1710
	N 50	4183	2325
	N 100	4960	2457
	N150	4850	2727
ZMB	N 0	1965	1837
	N 50	2855	2607
	N 100	3240	2807
	N 150	3140	3050
Promedios	N 0	2339 a	1773 a
	N 50	3519 b	2466 ab
	N 100	4100 b	2632 b
	N 150	3995 b	2888 b
	ZMA	4176 B	2305 A
	ZMB	2800 A	2575 A
Fuente de variación		ANVA	
ZM		**	ns
N		*	*
ZM * N		Ns	ns

***, *, &. Significativo al 1, 5 y 10% de probabilidad, respectivamente. ns. No significativo.

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de fertilización (minúsculas) y zonas de manejo (mayúsculas) cuando no hubo interacción entre los factores de tratamiento.

Por otra parte, en PRIM se registró sobre la BA efecto significativo de la ZM (**Tabla 1**) siendo la respuesta absoluta al N (BA fertilizado - BA no fertilizado) mayor en la ZMA respecto de la ZMB, independientemente de la dosis evaluada (1470 y 890 kg ha⁻¹ en N50, 2246 y 1275 kg ha⁻¹ en N100 y 2136 y 1176 kg ha⁻¹ en N150). Estas diferencias en la respuesta a la fertilización nitrogenada entre sitios dentro de un mismo lote, delimitados mediante la CEa, ha sido reportada en suelos agrícolas por Peralta et al. (2015) y Albarenque et al. (2016) en cultivos de trigo y maíz respectivamente.

Las diferencias en BA entre ZM en esta estación podrían explicarse por diferencias en la cantidad de agua disponible para las plantas. Como se mencionó previamente, la humedad gravimétrica al inicio del ensayo fue superior en la ZMA que en la ZMB. Así, en esta estación (PRIM) el balance hídrico (precipitaciones - ETP) previamente mencionado habría sido más acentuado en la ZMB.

En OTO se registró, sobre la BA, efecto significativo de la aplicación de N (**Tabla 1**). Respuestas positivas a la aplicación otoñal de N sobre la producción de forraje en pasturas de agropiro han sido registradas previamente en la región por Barbieri et al. (2006). Sin embargo, no se detectó efecto de la ZM. Esto podría deberse al balance hídrico positivo determinado en esta estación de crecimiento, que habría minimizado las diferencias de agua disponible entre ZM, y/o a las limitaciones impuestas al crecimiento debido a la menor radiación fotosintéticamente activa incidente acumulada en OTO respecto de PRIM (**Figura 4**).

En la bibliografía se encuentran muy pocas evidencias de la delimitación de ambientes en pasturas. Belanger et al. (2017) realizaron un experimento en Canadá donde separaron dos ambientes, mediante la CEa, y compararon diferentes fuentes de fertilizante nitrogenado a similar dosis. Sin embargo, estos autores no hallaron diferencias significativas entre ZM en la producción de forraje independientemente de la fuente de fertilizante utilizada.

EUN en los rebrotes PRIM y OTO

La EUN disminuyó con el aumento de la dosis de N coincidiendo con lo reportado por Lemaire y Gastal (2009). Este comportamiento se debe a

que a medida que aumenta el nivel de fertilización el N deja de ser un factor limitante (de Wit, 1992). En ninguno de los rebrotes evaluados se determinó interacción entre ZM y dosis de N (**Tabla 2**). En el rebrote PRIM se registró efecto significativo de la dosis de N y de la ZM ya que la EUN fue entre 64 y 81% mayor en ZMA respecto a ZMB. En OTO no se registró efecto significativo de la dosis de N ($p=0.15$) ni efecto de la ZM ($p=0.25$). Nuevamente este comportamiento estaría asociado a la menor RFAi de OTO (**Figura 4**), la expresión del crecimiento reproductivo en primavera y/o menores diferencias en disponibilidad de agua entre ZM.

Tabla 2. Eficiencia de uso de nitrógeno (EUN) de una pastura de Agropiro alargado durante un rebrote primaveral (PRIM) y un rebrote otoñal (OTO); para dos zonas de manejo (ZM) [zona de baja CEa (ZMB) y zona de alta CEa (ZMA)] y cuatro tratamientos de fertilización nitrogenada (N0, N50, N100 y N150).

	EUN (kg de BA kg de N aplicado ⁻¹)		
		PRIM	OTO
ZMA	N 50	29.4	12.3
	N 100	22.5	7.5
	N 150	14.2	6,8
ZMB	N 50	17.8	15.4
	N 100	12.7	9.7
	N 150	7,8	8.1
Promedios	N 50	23.6 a	13.9 a
	N 100	17.6 b	8.6 a
	N 150	11.0 c	7.5 a
	ZMA	22.0 A	8.9 A
	ZMB	12.8 B	11.0 A
Fuente de variación		ANVA	
ZM		*	ns
N		&	ns
ZM * N		ns	ns

***, *, &. Significativo al 1, 5 y 10% de probabilidad, respectivamente. ns: No significativo.

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de fertilización (minúsculas) y zonas de manejo (mayúsculas) cuando no hubo interacción entre los factores de tratamiento.

Conclusiones

El presente trabajo muestra que el crecimiento de agropiro alargado, en respuesta a la aplicación de N, presentó variación espacial en primavera tardía. En cambio, en otoño, no se hallaron diferencias entre ZM. Estos resultados evidencian la utilidad de la delimitación de ambientes en ciertas épocas del año. Sin embargo, estas conclusiones son preliminares ya que son producto de un sitio experimental, un solo año de estudio y dos momentos del año de aplicación de fertilizantes. Por lo tanto, estudios posteriores permitirán avanzar en el conocimiento de las interrelaciones entre agua, N y época del año (condiciones ambientales), las cuales afectan la implementación de esquemas de manejo por ambientes en sistemas pastoriles.

Bibliografía

- Albarenque, S., B. Basso, O. Caviglia, y R. Melchiori. 2016. Spatio-temporal nitrogen fertilizer response in maize: Field study and modeling approach. *Agron. J.* 108:1-13.
- Andrade, F.H., y V.O. Sadras. 2002. Cap. 3: crecimiento y rendimientos comparados. En: Andrade, F.H., y V.O. Sadras (Eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja: 61-91.
- Barbieri, P.A., H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas, y L.I. Picone. 2006. Nitrogen use efficiency from urea applied to a tall wheatgrass (*Elytrigia elongata*) prairie in a sodic soil. *Aust J Exp Agric.* 46: 535-543.
- Belanger, G., N. Athyna, A. Cambouris, G. Parent, D. Mongrain, N. Ziadi, y I. Perron. 2017. Biomass yield from an old grass field as affected by sources of nitrogen fertilization and management zones in northern areas. *Can. J. Plant Sci.* 97: 1-12.
- Belanger, G., F. Gastal, y G. Lemaire. 1992. Growth analysis of tall fescue sward fertilised with different rates of nitrogen. *Crop Sci.* 32: 1371-1376.
- Borrajo, C.I., y S.I. Alonso. 2014. Tasa de elongación foliar en materiales de agropiro alargado: efecto de la fenología y el agregado de nitrógeno. 37° Congreso Argentino de Producción Animal, Actas. CABA, oct 20-22.
- Bremner, J.M. 1965. Inorganic forms of nitrogen. En: Black, C.A. (ed). *Methods of soil analysis. Part 2.* Agronomy Monogr. no. 9. ASA, Madison, WI. pp 1179-1237.
- Bullock, D.S., M.L. Ruffo, D.G. Bullock, y G.A. Bolle-ro. 2009. The value of variable rate technology: an information-theoretical approach. *Am. J. Agric. Econ.* 21: 209-223.
- Chapman, H.D. 1965. Cation-exchange capacity. In: C. A. Black (ed.) *Methods of soil analysis - Chemical and microbiological properties.* Agronomy. 9: 891-901.

- Cicore, P.L., H.R. Sánchez, N.R. Peralta, M. Castro Franco, V. Aparicio, y J.L. Costa. 2015. Determinación de ambientes edáficos en suelos de la pampa deprimida mediante la conductividad eléctrica aparente y la elevación. *Ci. Suelo*: 33: 229-237.
- Corwin, D.L. y S.M. Lesch. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Agron. J.* 95: 455-471.
- Corwin, D.L., y S.M. Lesch. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comp. Electron. Agric.* 46:11-43.
- De Prado, M.R. H.E. Echeverría, F.A. Lattanzi, y N.F. San Martín. 2001. Evolución otoño invernal del nitrógeno mineral en un natracuol típico bajo festucas con diferente hábito de crecimiento. *Ci suelo*. 19:39-46.
- De Wit, C.T. 1992. Resource use efficiency in agriculture. *Agric. Sys.* 40:125-151.
- Doerge, T. A. 1999. Management zone concepts. SSMG-2. En: Information Agriculture Conference, Stewart Center, Purdue, IN, USA, Ago 9-11.
- Durand, J.L., F. Gastal, S. Etchebest, A.C. Bonnet, y M. Ghesquière. 1997. Interspecific variability of plant water status and leaf morphogenesis in temperate forage grasses under water deficit. *Eur. J. Agron.* 7:135-143.
- ESRI (Environmental System Research Institute). 2008. ArcGis 9.0 - Arc Map vers.9.3. Disponible en: <http://www.esri.com/> Fecha ultimo acceso: 18/11/12.
- Farahani, H.J., y R.L. Flynn. 2007. Map Quality and Zone Delineation as affected by Width of Parallel Swaths of Mobile Agricultural Sensors. *Prec. Agric* 96: 151-159.
- Gastal, F., y G. Lemaire. 1988. Study of tall fescue sward growth under nitrogen deficiency conditions. En: 12th General Meeting of the European Grassland Federation, Dublin, Ireland. Pp. 323-327.
- Hanson, B., y K. Kaita. 1997. Response of electromagnetic conductivity meter to soil salinity and soil-water content. *J. Irrig. Drain Eng.* 123: 141-143.
- Hossain, M.B., D.W. Lamb, P.V. Lockwood, y P. Frazier. 2010. EM38 for volumetric soil water content estimation in the root-zone of deep Vertisol soils. *Comp. Electron. Agric.* 74:100-109.
- Lemaire, G., y F.F. Gastal. 2009. Cap 8: Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. En: *Crop Physiology*. Sadras V., y D. Calderini (Eds). Pp 171-211.
- Marino, M.A. y M. G. Agnusdei. 2007. Manejo estacional del suministro de nitrógeno en pasturas de Festuca arundinacea Scrheb. (sudeste bonaerense, Argentina): Crecimiento y eficiencia en el uso de recursos. 20° Reunión de la Asociación Latinoamericana de Producción Animal (ALPA) - 30° Reunión Asociación Peruana de Producción Animal (APPA), Actas. Cusco, Perú, oct 21-25.
- McCutcheon, M.C., H.J. Farahani, J.D. Stednick, G.W. Buchleiter, y T.R. Green. 2006. Effect of soil water on apparent soil electrical conductivity and texture relationships in a dryland field. *Biosyst. Eng.* 94: 19-32.
- Moral, F.J., J.M. Terrón, y J.R. Marques da Silva. 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil & Tillage Res.* 106:335-343.
- Pachepsky, Y.A., D.J. Timlin, y W.J. Rawls. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1787-1795.
- Peralta, N.R., J.L. Costa, M. Balzarini, M. Castro Franco, M. Córdoba, y D. Bullock. 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. *Comp. Electron. Agric.* 110: 103-113.
- Priano, L. J. y M. A. Pilatti, 1989. Tolerancia a la salinidad de forrajeras cultivadas. *Ci.Suelo*. 7: 113-116.
- Rhoades, J.D., P.A. Raats, y R.J. Prather. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, eater content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:651-655.
- SAS Institute INC. 2007. SAS/STAT-JMP Users Guide. Release 7. Cary, NC,USA. 506 p.
- Schellberg, J., M.J. Hill, R. Gerhards, M. Rothmund, y M. Braune. 2008. Precision agriculture on grassland: applications, perspectives and constraints. *Eur. J. Agron.* 29, 59-71.
- Serrano, J., J. Peca, J. Marques da Silva, y S. Shaidian. 2010. Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. *Comp. Electron. Agric.* 73: 7-16.
- Sudduth, K.A., N.R. Kitchen, G.A. Bollero, D.G. Bullock, y W.J. Wiebold. 2003. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agron. J.* 95:472-482.
- Taboada, M.A. 2006. Soil structural behaviour in flooded and agricultural soils of the Argentine Pampas. Tesis doctoral. Institut National Polytechnique de Toulouse, Francia. 345 p.
- Trimble Navigation Limited. 2008. Disponible en: <http://www.trimble.com>. Fecha ultimo acceso: 10/06/13.
- Walkley, A., y I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.
- Veris Technologies. 2001. [en línea] Frequently asked questions about soil electrical conductivity. <http://www.veristech.com>. Fecha ultimo acceso: 10/08/15. ●

Tendencias en los niveles de fósforo extractable, carbono orgánico y pH de los suelos de San Luis

Juan Cruz Colazo*, Juan de Dios Herrero, Sergio Sayavedra y Santiago Lorenzo
INTA EEA San Luis

*Contacto: colazo.juan@inta.gob.ar

Introducción

En los últimos años en la provincia de San Luis ha existido un reemplazo de ganadería por agricultura, la cual ha incrementado su superficie desde <1% en 1960 a cerca del 10%, principalmente en el este. En especial este cambio estuvo asociado a la mayor implantación del cultivo de soja, el cual ha crecido exponencialmente desde principios del 2000 (SIIA, 2015). En este contexto, no existe información sobre los cambios producidos en parámetros edáficos relacionados con la fertilidad química.

En otras regiones con mayor historia agrícola se han encontrado disminuciones de los valores de fósforo extractable (Pe), carbono orgánico (CO) y reacción del suelo (pH) asociado a mayores niveles de intensificación (Pazos, 2002; Kruger et al., 2006; Sainz Rozas et al., 2012). La comparación de suelos cultivados y sin cultivar reportó una disminución media del contenido de CO (de Dios Herrero et al., 2014). Un relevamiento realizado en el S de la provincia indicó niveles adecuados de P, pero sin establecer una tendencia temporal (Bongiovanni et al., 2010).

En función de los niveles de producción y las tasas de reposición de fertilizantes en la provincia, Veneciano y Frigerio (2003) sugieren una irremediable declinación de la fertilidad de los suelos. Conocer la variación de las propiedades del suelo en función del manejo es fundamental para el desarrollo de sistemas sustentables y la formulación de políticas de conservación. Los

trabajos que evalúan esta dinámica en la provincia son escasos y parciales. Es por ello que el objetivo del siguiente trabajo fue evaluar la variación temporal de los contenidos de Pe, CO y pH en los suelos de la provincia de San Luis.

Materiales y métodos

Base de datos

Para realizar el estudio se confeccionó una base de datos con los registros del laboratorio de suelos de la EEA San Luis del INTA. El mismo estuvo comprendido entre los años 1997 - 2013. Para seleccionar las muestras se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: a) ubicación dentro de los límites provinciales, b) pertenecientes a suelos bajo agricultura o ganadería extensiva y c) una profundidad de 0 - 20 cm. Los parámetros químicos evaluados fueron: a) P extractable (Bray-Kurtz 1), C orgánico (Walkley y Black) y pH (relación 1:1). Durante el periodo evaluado no existieron cambios metodológicos. Las principales características de la base de datos se resumen en la **Tabla 1**.

Análisis estadístico

Para el análisis temporal se separaron los datos en tres periodos de tiempo: a) 1997-2000, b) 2001-2005, c) 2006-2009 y d) 2010-2013. Los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva y análisis de frecuencia.

Tabla 1. Valores medios, mínimos (Min), máximos (Max), percentiles 25 (P25), 50 (P50), 75 (P75) y número de muestras (n) para la determinación de fósforo extractable (Pe), carbono orgánico (CO) y reacción del suelo (pH).

	Media	Min	Max	P25	P50	P75	n
Pe (mg kg ⁻¹)	22.4	1	78	13	20	30	900
CO (%)	0.79	0.1	3.6	0.45	0.68	0.95	828
pH	7.11	4.9	10	6.7	7.15	7.6	707

Resultados y discusión

Fósforo extractable (Pe)

La mediana de Pe durante los periodos 1997-2000, 2001-2004, 2005-2009 y 2010-2013 fue 27, 21, 21 y 14.5 mg kg⁻¹, respetivamente (**Figura 1a**). Estos valores son mayores a los reportados para otras regiones del país (Sainz Rozas et al., 2012). Los mismos estarían relacionados a un material parental rico en este elemento (Bongiovanni et al., 2010). Si bien estos valores son altos se observa una disminución temporal en los valores medianos. Además, el análisis de frecuencia muestra una disminución de valores mayores a 20 mg kg⁻¹ y un aumento, fundamentalmente, de las clases menores a 10 mg kg⁻¹ (**Figura 1b**). Esto implicaría que la probabilidad de encontrar en la provincia situaciones con bajos valores de Pe (<10 mg kg⁻¹) aumentó del 10 al 26% cuando se compara el periodo 1997-2000 con 2010-2013. Esto significa que antes del año 2000, la respuesta a la fertilización con P se presentaba en solo 1 de cada 10 muestras, mientras en que luego del año 2010 dicha relación aumentó a 1 de cada 4 muestras.

Carbono orgánico (CO)

La mediana de CO durante los periodos 1997-2000, 2001-2004, 2005-2009 y 2010 - 2013 fue 0.6, 0.58, 0.78, 0.64 % respetivamente (**Figura 1c**). Estos valores se encuentran dentro del rango de valores encontrados por de Dios Herrero et al. (2014) para suelos de la provincia. Los niveles son menores para reportados en otras regiones (Sainz Rozas et al., 2011). El análisis de frecuencia muestra un aumento en los valores los suelos con niveles por encima del 0.3 %. Esto podría deberse a una mayor proporción de muestras provenientes de suelos Haplustoles, utilizados preferentemente para agricultura, así como también a un incremento en los niveles de CO. Álvarez et al. (2013) en suelos de la región pampeana reporta incrementos temporales de los niveles de CO, en suelos con bajos niveles de CO.

Reacción del suelo

La mediana de pH durante los periodos 1997-2000, 2001-2004, 2005-2009, 2010-2013 fue 6.8, 6.8, 7.3 y 7.5 respetivamente (**Figura 1e**). Esto indica que el pH se encuentra dentro del rango

de la neutralidad y los niveles son tolerables para la mayoría de los cultivos. Estos valores son más altos que los reportados por Sainz Rozas et al. (2011) para otras regiones del país, aun teniendo en cuenta que en este caso la dilución utilizada es menor. El análisis de frecuencia muestra una tendencia a la disminución de valores con pH ácido (<6.5) y un aumento de valores con pH básico (>7.5). Esto podría deberse a una mayor participación de suelos con carbonato de calcio, principalmente Haplustoles en la región (Peña Zubiato et al., 1998). Esto significaría que a pesar del proceso de agriculturización en la provincia, no existe un fenómeno de acidificación, como si ocurre en regiones con mayor historia agrícola (Colazo et al., 2016).

Conclusiones

El análisis temporal de muestras de suelo en la provincia de San Luis indica que los niveles de Pe han disminuido y algunos valores de CO y pH han aumentado. Con relación a la fertilidad fosforada de los suelos, estos resultados coinciden con los reportados para otras regiones del país. La probabilidad de respuesta a la fertilización fosforada aumentó del 10 al 26% entre los años 1997 y 2013. Mayores estudios son necesarios debido a las limitaciones y sesgos del enfoque utilizado.

Bibliografía

- Álvarez, R., J. De Paeppe, y H. Steinbach. 2013. Cambios en los niveles de C y N en los suelos pampeanos por el uso. En: Barbosa, O.A. y J.C. Colazo (Eds.), Primeras Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos y Segundas Jornadas Provinciales de Agricultura Sustentable. p: 70 - 85. CACS. CABA.
- Bongiovanni, M.D., R. Marzari, y M.M. Ron. 2010. Fósforo disponible en suelos agrícolas del sur de Córdoba y sudeste de San Luis. En: Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario. (En CD).
- Colazo, J.C., J.M. de Dios Herrero, M.L. Guzmán, C.A. Saenz, M. Correa Luna, y R. Sager. 2016. Sistemas integrados en el S de Santa Fe. I. Carbono orgánico, fósforo disponible y pH. En: Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Río Cuarto.
- de Dios Herrero, J.M., J.C. Colazo y D.E. Buschiazzi. 2014. Balance de carbono, efecto del manejo en suelos de San Luis. En: Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del suelo & II Reunión Nacional de Materia Orgánica y Sustancias Húmicas, Bahía Blanca. (En CD).
- Kruger, H., M. Vergara, S. Venanzi y M. Marini. 2006. Variación espacial y temporal de propiedades químicas

micas en suelos del suroeste bonaerense. En: Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta - Jujuy. (En CD).

Pazos, M. y S. Mestelán. 2002. Relevamiento del nivel de P disponible, pH y materia orgánica en el centro de la provincia de Buenos Aires. Información Agronómicas 14: 8-10.

Peña Zubiato, C.A., D.L. Anderson, M.A. Demmi, J.L. Saenz y A.D. Hiriart. 1998. Carta de Suelos y Vegetación de la provincia de San Luis. 115 p.

Sainz Rozas, H., H. Echeverría y H. Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de

las regiones pampeana y extra pampeana argentina. Ci. Suelo, (Argentina) 29(1): 29-37.

Sainz Rozas, H., H. Echeverría, y H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. RIA, 38(1): 33-39. SIIA (Sistema Integrado de Información Agropecuaria). 2015. Series temporales. En: www.siiia.gov.ar/series. Consultado: 23 de diciembre de 2015.

Veneciano, J.H., y K.L. Frigerio. 2003. Exportación de macronutrientes en sistemas extensivos en San Luis. Informaciones agronómicas, 17: 17-22.

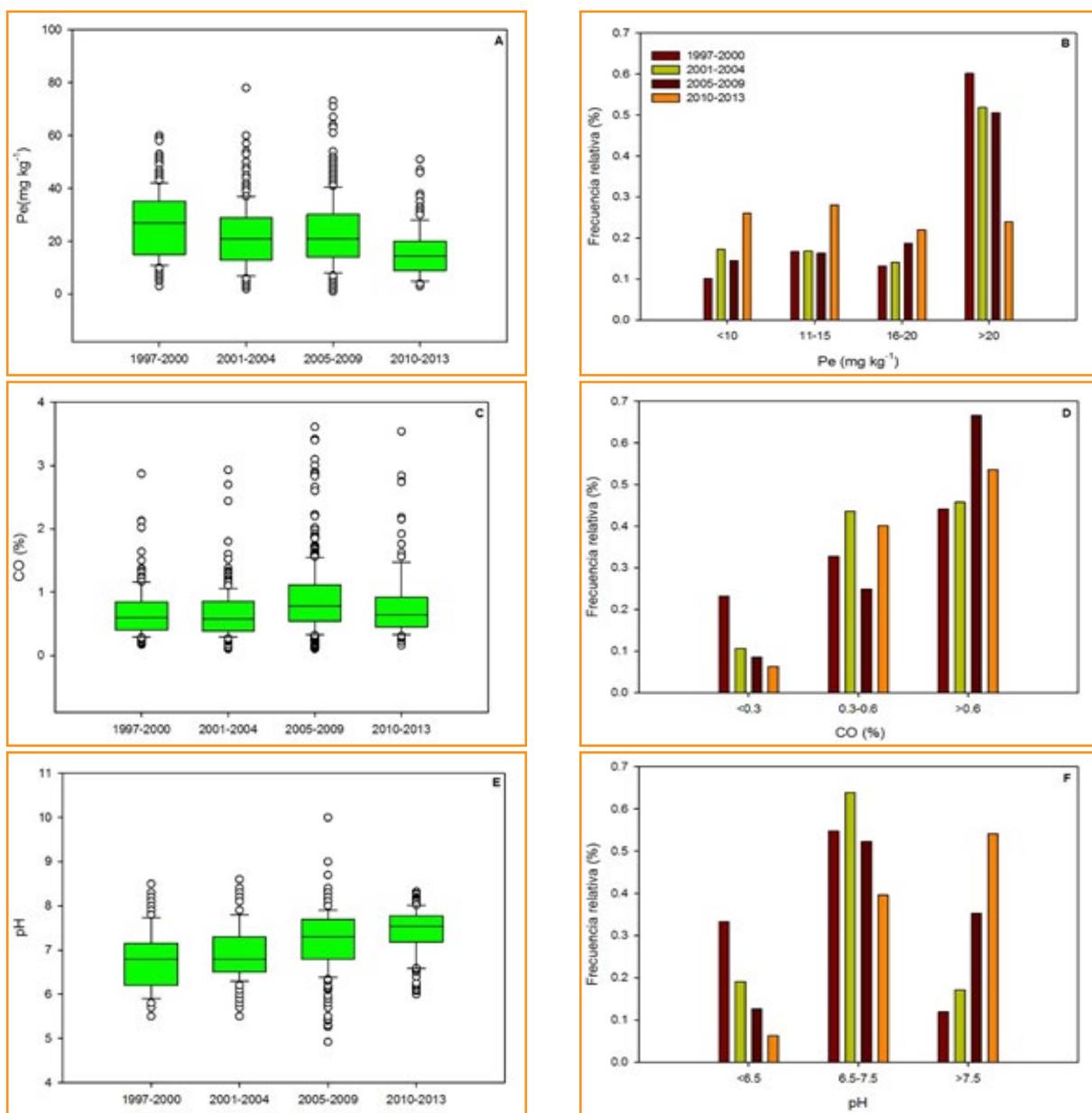


Figura 1. Box-plot y frecuencia relativa para valores de: A y B: fósforo extractable (Pe, Bray-1); C y D: carbono orgánico (CO); E y F: pH. Muestras tomadas entre los periodos 1997-2000, 2001-2004, 2005-2009 y 2010-2013.

Sistema de soporte para la recomendación de fertilización fosfatada en pasturas

R. Cuadro¹, J.H. Molfino², y A. Quincke¹

¹Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria; ²Ing. Agr. Consultor Independiente

*Contacto: rcuadro@tb.inia.org.ar

Introducción

La competitividad de la producción de carne y leche de Uruguay se basa en gran medida en la rentabilidad del sistema pastoril. A su vez, es ampliamente conocido que se necesita contar con especies leguminosas forrajeras para aumentar la producción de forraje, tanto en cantidad como en calidad, y así lograr intensificar la producción pecuaria (Millot et al., 1987). Sin embargo, los suelos del Uruguay son naturalmente deficientes en su capacidad de suministro de fósforo (P) (Morón, 2008, Barbazán et al., 2007). Por lo tanto, el fertilizante fosfatado es un insumo central en pasturas a base de leguminosas.

Varios autores nacionales han revisado y resumido la trayectoria de experimentación e investigación sobre el tema (Morón, 2007; Bordoli, 2007). En general, se reconoce que las pautas y recomendaciones vigentes presentan limitantes para implementar un adecuado manejo de la fertilización fosfatada en forma generalizada a nivel de país.

El objetivo general es desarrollar un sistema de soporte para la recomendación de fertilización de pasturas, que tendrá los siguientes atributos generales:

- Fácil acceso. El acceso al sistema debe ser fácil, amigable y gratuito a través de internet ("sistema on-line").
- Suelo-específico. Las respuestas del sistema deben contemplar particularidades agronómicas relevantes (principalmente el tipo de suelo, la fertilidad actual, tipo de pastura).
- Bases científicas. Las respuestas del sistema deben estar basadas en el conocimiento vigente, producto de la investigación y experimentación científica.
- Actualización continua. Dicha base de información puede y debe ser actualizable y mejorable, conforme se producen nuevos resultados relevantes y pertinentes.
- Retroalimentando investigación. El sistema permitirá informar a la comunidad de investigación agronómica para priorizar futuros trabajos.

Metodología

Base experimental

Entre los años 2008 y 2012 se llevó a cabo una red de experimentos de fertilización fosfatada de pasturas, ubicados sobre diversos suelos de las principales zonas pecuarias del país (**Figura 1**) y que fueron instalados y manejados con un protocolo común de evaluaciones.

El objetivo general fue estudiar la respuesta a P en leguminosas forrajeras para un amplio rango de suelos del país. El experimento fue diseñado para evaluar el efecto de dos tipos de fertilizantes (fuente soluble o roca fosfórica) sobre dos especies (*Trifolium repens* y *Lotus corniculatus*). Se utilizaron dos profundidades de muestreo (0-7,5 y 7,5-15 cm) y tres métodos de extracción de P (Bray-1, resinas catiónicas y ácido cítrico) como indicadores de disponibilidad de P en suelo. Los principales resultados son: la eficiencia de la roca fosfórica como fuente de P según suelos, la calibración de métodos de análisis de P extractable según tipo de suelo y fuente de P (es decir niveles críticos ajustados), y determinar el Equivalente Fertilizante para distintos suelos y según fuentes de fertilizantes.

Las principales características edáficas de los sitios de la mencionada red se presentan en el **Tabla 1**.

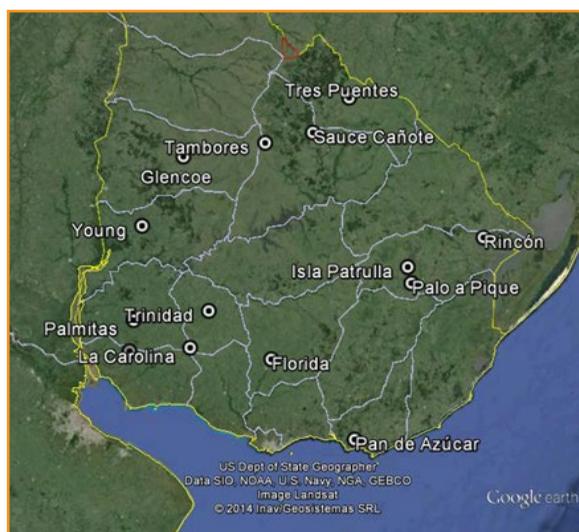


Figura 1. Mapa de ubicación de los 14 sitios experimentales de la red de fertilización de pasturas (2008-2012).

Tabla 1. Identificación y características edáficas de los 14 sitios experimentales de la red de fertilización de pasturas.

Nombre sitio	Zona agroecológica	Tipo de Suelos	Unidad de suelos*	Material generador	Grupo CONEAT*
La Carolina	Sedimentos / Cristalino	Brunosol Éútrico Vértico	La Carolina	Sedimentos cuaternarios sobre Cristalino	10.12
Trinidad	Sedimentos gravillosos /Cristalino	Brunosol Subéútrico	Isla Mala	Sedimentos con gravillas sobre Cristalino	10.3; 5.4
Florida	Cristalino	Brunosol Dístrico Háptico	San Gabriel-Guaycurú	Cristalino	5.02b
Pan de Azúcar	Sierras rocosas del Este	Inceptisol	Sierra de Aiguá, Sierra de Ánimas	Cristalino	2.11a
Palo a Pique	Lomas del Este	Brunosol Subéútrico Lúvico	Alfárez	Sedimentos poco espesos y gravillosos sobre Cristalino	10.7
Isla Patrulla	Sierras no rocosas del Este	Luvisol	Cerro Chato, Bañado del Oro	Sedimentos con gravillas sobre Cristalino alterado	2.13; 2.20
Tres Puentes	Noreste	Brunosol Subéútrico	Tres Puentes	Sedimentos Pelíticos Grises	6.13
Rincón	Bajos del Este	Planosol Subéútrico	Río Branco	Sedimentos limo arcillosos	3.52
Sauce Cañote	Bajos del Noreste	Planosol Dístrico	Río Tacuarembó	Sedimentos	G03.21
Tambores	Basalto profundo	Brunosol Éútrico Vértico	Itapebí - Tres Árboles	Sedimentos limo arcillosos sobre Basalto	12.11; 12.21
Glencoe	Basalto profundo	Vertisol Háptico	Itapebí - Tres Árboles	Sedimentos limo arcillosos sobre Basalto	12.11; 12.21
Ombúes	Litoral Oeste / Libertad	Vertisol Típico	Risso, Libertad	Sedimentos cuaternarios	10.1; 10.8b; parte de 10.5
Young	Litoral Oeste /Fray Bentos	Brunosol Éútrico Vértico	Young, Bequeló	Sedimentos cuaternarios sobre Fray Bentos	11.5; 11.6; parte de 11.4
Palmitas	Litoral Oeste / Cretáceo	Brunosol Subéútrico	Cuchilla del Corralito	Sedimentos arenosos sobre Cretáceo	9.5

* Unidad de Suelos según la Carta de Reconocimiento de Suelos 1:1 millón (MAP/DSF, 1976).
Grupo CONEAT según MGAP/DGRNR/CONEAT (1994).

Estudio de dominios de inferencia

La investigación agronómica en el área de fertilización de pasturas está basada en estudios "multi-sitio", ensayos en redes, o repeticiones de ensayos en distintos sitios, a los efectos de abarcar y comprender la variabilidad debido a las particularidades edáficas (o de distintos "tipos de suelo").

Se realizó un estudio de dominios de inferencia para poder clasificar y extrapolar los resultados experimentales y, en definitiva, poder realizar inferencias a nivel nacional. Para ello se usó la clasificación desarrollada por un equipo de expertos edafólogos para la Comisión Nacional de Estudios Agroeconómicos de la Tierra (CONEAT) y su cartografía (MGAP/DGRNR/CONEAT, 1994). El mapa CONEAT está basado en 188 unidades de mapeo (llamados grupos CONEAT), a una escala 1:20 000 y es el único en el país generalizable a nivel predial, y es ampliamente conocido y utilizado por técnicos y productores. Se realizó una re-interpretación de la información disponible para fusionar grupos CONEAT, utilizando las siguientes características de los suelos:

- material generador, porque incide en el porcentaje y el tipo de arcilla, en el porcentaje y calidad de materia orgánica y en el ciclo de nutrientes, además de influir en el relieve de los grupos CONEAT;
- textura, fácilmente reconocible en las observaciones de campo aún antes del análisis granulométrico;
- propiedades químicas: materia orgánica, suma de bases, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de saturación, pH, porcentajes de Al, Na y Fe_2O_3 y presencia de CO_3Ca .

Como resultado de este análisis se obtuvieron 34 dominios de inferencia. Los resultados obtenidos en la red de fertilización de pasturas proveen información para nueve de ellos. En la **Figura 2** se presentan las zonas del país sobre las cuales, con los resultados de la mencionada red, sería posible efectuar recomendaciones de fertilización fosfatada en pasturas. El sistema prevé poder integrar resultados generados anteriormente y/o en otros experimentos, y así aumentar la base de información que da sustento al mismo.

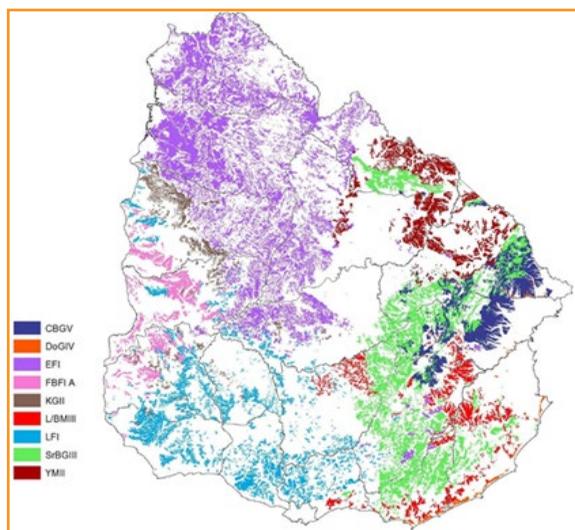


Figura 2. Distribución geográfica de los nueve dominios de inferencia en los que se dispone información a partir de los resultados generados en la red de fertilización.

Bases del sistema para orientar recomendaciones de fertilización fosfatada de pasturas

El funcionamiento general del sistema está resumido gráficamente en la **Figura 3**. Básicamente, el usuario deberá ingresar información del grupo CONEAT, nivel actual de P en el suelo (especificando el método de análisis y profundidad de muestreo) y la pastura a fertilizar. También se requerirá (o será deseable) indicar tipo de fertilizante fosfatado empleado en la historia reciente (Fuentes solubles o roca fosfórica), pues esto condiciona la interpretación de los análisis de suelos.

La información de salida consistirá en una sugerencia de dosis (P_2O_5 ha^{-1}), una medida de la eficiencia de la fosforita natural (respecto a la fuente soluble), una medida la eficiencia de respuesta (expresada como los kg de materia seca producidos por cada kg de P_2O_5 aplicado), y una advertencia de posibles excesos de P en el suelo, en caso que corresponda.

La matriz de ecuaciones generadas está apoyada en una base de datos que tiene la particularidad de que es "dinámica"; esto significa que a medida que se vayan generando nuevos datos relacionados a respuesta a la fertilización, los mismos pueden ser incorporados para de esta manera ir mejorando el ajuste o incorporando suelos donde la red no ha generado información. La incorporación de información nueva va estar sujeta a un estudio previo por parte de una comisión especializada que valorará la pertinencia de dicha información.

Consideraciones finales

Se espera que un sistema de soporte para recomendaciones de fertilización de pasturas permitirá acceder y utilizar la información experimental existente, con el resultado de que se logrará una mayor eficiencia en el uso de los fertilizantes fosfatados a nivel de sistema de producción. Esto estará basado especialmente por un mejor ajuste de los parámetros que son necesarios para efectuar la recomendación de la dosis de P. El ajuste de la fertilización fosfatada en base a indicadores objetivos debería además contribuir a mitigar los problemas de concentración excesiva de P en el suelo, contribuyendo a disminuir los riesgos de contaminación de aguas debido a dicho nutriente. La determinación de los niveles críticos ajustados por tipo de suelo, permitirá manejar las pasturas en base a leguminosas en una condición de fertilidad más ajustada al potencial de producción de acuerdo al ambiente donde se encuentren implantadas.

Bibliografía

Barbazán, M., M. Ferrando, y J. Zamalvide. 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay.

Agrociencia, 11(1): 22-34.

Bordoli, J.M. 2007. Fertilización de pasturas de leguminosas y mezclas de gramíneas y leguminosas. En: Manejo de la fertilidad en sistemas extensivos (Cultivos y Pasturas). Unidad de Educación Permanente y Postgrado. Montevideo: Facultad de Agronomía. 71-79.

Millot, J., D. Risso, y R. Methol. 1987. Relevamiento de pasturas naturales y mejoramientos extensivos en áreas ganaderas del Uruguay: Informe técnico para la Comisión Honoraria del Plan Agropecuario. Montevideo: MGAP. 199 p.

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca - DGRNR - CONEAT. 1994. Índice de productividad. Grupos CONEAT.

Ministerio de Agricultura y Pesca - Dirección de suelos y fertilizantes. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1/1.000.000 y clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo, Uruguay. Tomo 3. 452 p.

Morón, A. 2007. Avances hacia a una nueva guía de fertilización de pasturas. En: Seminario Internacional de Nutrición Vegetal (Paysandú, Uruguay, 2007). Criterios para la Fertilización de cultivos y pasturas. Paysandú: UDELAR. EEMAC, Facultad de Agronomía.

Morón, A. 2008. Relevamiento del estado nutricional y la fertilidad del suelo en cultivos de trébol blanco en la zona Este de Uruguay. En: Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este, INIA Treinta y Tres. Montevideo: INIA. Serie Técnica; 172:17-29. ●

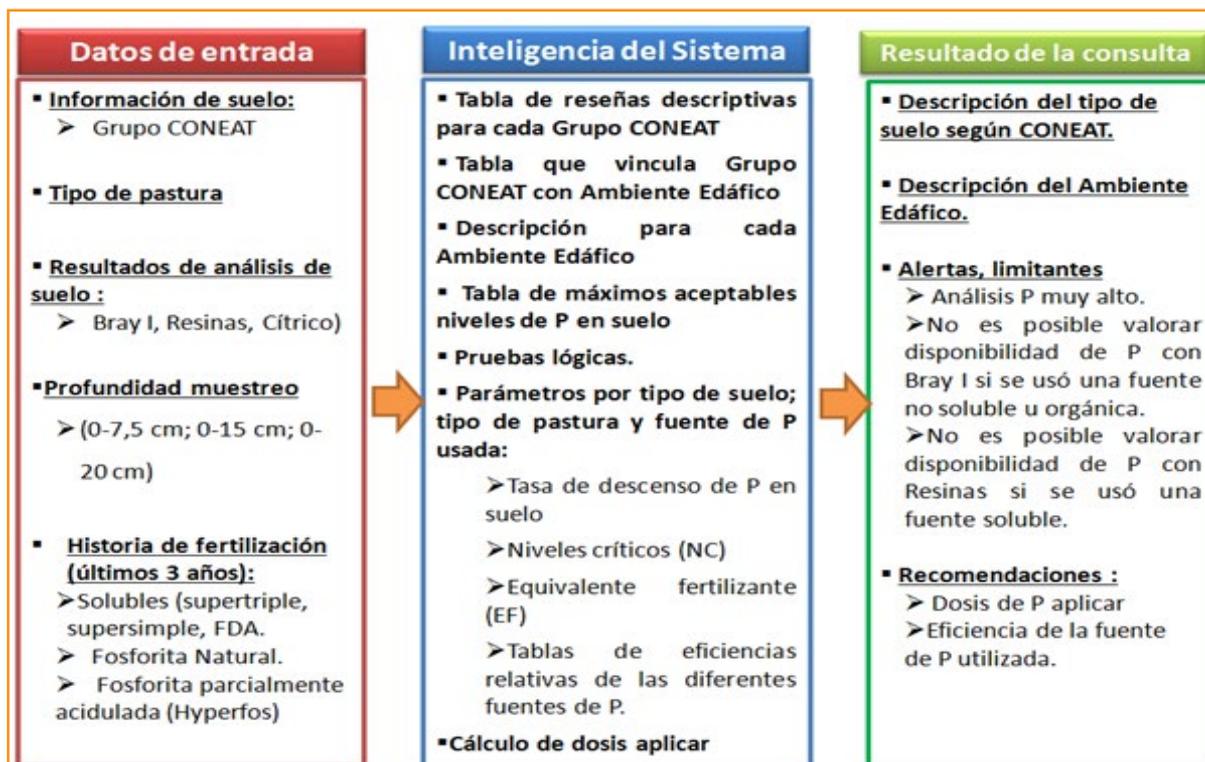


Figura 3. Diagrama del funcionamiento general del sistema de soporte para la recomendación de fertilización fosfatada en pasturas.

¿Podemos mejorar el manejo de nitrógeno en girasol?

Natalia Diovisalvi¹, Nahuel Reussi Calvo^{1,2,3}, Santiago Vacca², Guillermo Divito², Natalia Izquierdo^{2,3}, Hernán Echeverría² y Fernando García⁴

¹Laboratorio de suelos FERTILAB, ²Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce, ³CONICET, ⁴IPNI

*Contacto: ndiovisalvi@laboratoriofertilab.com.ar

Introducción

El nitrógeno (N) es el principal nutriente que afecta el rendimiento y la calidad del grano de girasol (*Helianthus annuus* L.). El porcentaje de aceite determina la calidad comercial de los granos, mientras que la proteína es clave para los subproductos. Incrementos de 1% en la proteína en grano pueden generar aumentos de hasta 5% en los subproductos. La deficiencia de N disminuye el área foliar y la tasa fotosintética y, por ende, la eficiencia de intercepción y de uso de la radiación, respectivamente (Massignam et al., 2009). En general, una adecuada disponibilidad de N es necesaria para lograr granos con elevada concentración de aceite y proteína, no obstante, niveles excesivos pueden disminuir el porcentaje de aceite. Por lo tanto, surge la necesidad de contar con métodos de diagnóstico de N precisos para el cultivo.

La metodología más difundida para el diagnóstico de N en girasol se basa en la determinación del contenido de N-nitrato (N-NO_3^-) en suelo (0-60 cm) en pre-siembra. Para su empleo, se han propuesto distintos umbrales de disponibilidad de N (suelo más fertilizante) que permiten maximizar el rendimiento y definir la dosis óptima de producción (DOP). En general, la determinación de N en pre-siembra presenta baja capacidad predictiva del rendimiento en regiones con excesos hídricos previos y post muestreo debido en parte a las pérdidas por lavado de N-NO_3^- . Además, este método no considera el aporte de N por mineralización durante el ciclo del cultivo. Frente a esta situación, para maíz se ha propuesto la determinación de N-NO_3^- en suelo (0-30 cm) en el estadio de seis hojas (Magdoff et al., 1984). No obstante, estos métodos no contemplan la relación de precios insumo-producto, la cual permitiría definir la dosis óptima económica (DOE).

El diagnóstico de N en suelo podría ser complementado mediante el empleo de sensores de transmitancia como el SPAD y de reflectancia como el Green Seeker que permiten caracterizar

el estatus de N en planta en los estadios de 6 y 12 hojas (V_6 y V_{12} , Schneyter y Miller, 1981). Si bien ambos sensores han sido evaluados con éxito en diferentes cultivos (trigo, maíz, papa, entre otros), no hay información disponible para girasol. El SPAD determina el índice de verdor de la hoja (IV) mientras que el Green Seeker un índice de vegetación normalizado (NDVI). Ambos pueden ser afectados por diferentes factores por lo que, para reducir dichas fuentes de variación, se recomienda relativizar las mediciones con áreas de referencia sin limitaciones de N, definiendo el índice de suficiencia de N (ISN) y el NDVI relativo (NDVlr), para SPAD y Green Seeker, respectivamente.

En base a lo mencionado, se establecieron los siguientes objetivos: 1) evaluar el efecto del N sobre la concentración de proteína y aceite del grano; 2) evaluar la capacidad predictiva del rendimiento de los métodos de diagnóstico de N basados en la determinación de N-NO_3^- en suelo, 3) determinar la DOP y la DOE y 4) evaluar la capacidad predictiva del rendimiento de los métodos de diagnóstico de N basados en la determinación del ISN y NDVlr.

Materiales y métodos

En el sudeste de la provincia de Buenos Aires-Argentina durante la campaña 2014-2015, se realizaron 10 experimentos de fertilización nitrogenada (dosis de 0 hasta 150 kg N ha⁻¹), abarcando ambientes con diferentes características edafoclimáticas (**Figura 1**). Los suelos predominantes son Argiudoles petrocálcicos y Argiudoles típicos con texturas del horizonte superficial desde Franco Arenosa a Franco Arcillo Arenosa. Los valores promedio de fósforo Bray, materia orgánica y pH en los primeros 20 cm del perfil fueron de 12.4 ± 4.0 mg kg⁻¹, 5.1 ± 1.2 % y 5.9 ± 0.3, respectivamente. En cuanto a los materiales genéticos de girasol, se utilizaron genotipos alto oleico (AO) (n = 7) y convencionales (C) (n = 3), según sitio.

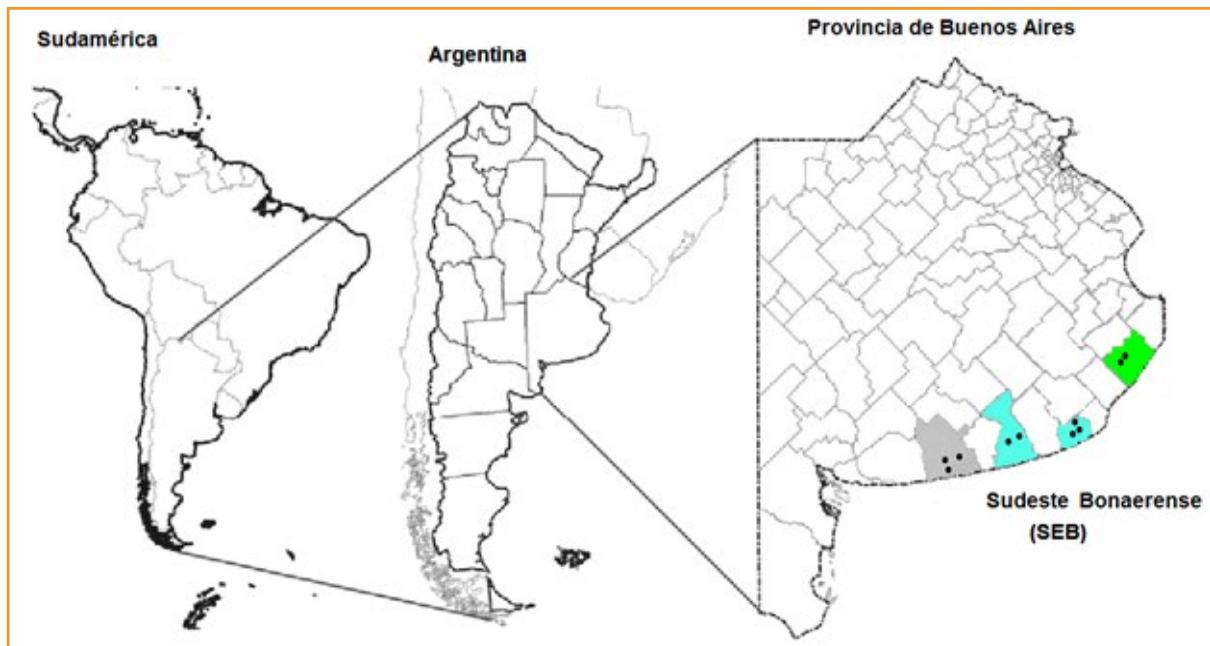


Figura 1. Ubicación de los diferentes sitios experimentales agrupados según características edafoclimáticas. Zona verde: Gral. Madariaga. Zona celeste: Miramar-Mechongué-Necochea. Zona gris: Tres Arroyos.



Fotografía 1. Izquierda: parcela sin aplicación de N (0 N). Derecha: parcela con aplicación de 120 kg ha⁻¹ N (120 N).

Resultados y discusión

Rendimiento y Calidad

El rendimiento promedio fue de 3540 ± 484 kg ha⁻¹ y la respuesta a N de 590 ± 208 kg ha⁻¹. En la **Fotografía 1** puede observarse en uno de los sitios con respuesta, el mayor desarrollo del área foliar producto de la fertilización nitrogenada, lo cual se tradujo en un incremento del porcentaje de intercepción por el cultivo.

Por otra parte, los híbridos AO presentaron en promedio menor porcentaje de aceite y mayor de

proteína respecto a los C (54.2 vs 55.7% y 15.1% vs 12.0%, respectivamente). La aplicación de N no tuvo efecto significativo sobre el porcentaje de aceite en grano (AO: 0N = 54.4% vs 120 kg N ha⁻¹ = 54.0%; C: 0N = 55.2% vs 120 kg N ha⁻¹ = 55.7%). No obstante, la concentración de proteína en grano se incrementó en promedio hasta 1.9% y 2.5% con las mayores dosis de N, para AO y C, respectivamente. Por lo tanto, la relación proteína/aceite aumentó de forma lineal por efecto del agregado de dicho nutriente. En síntesis, la aplicación de N no afectó la concentración de aceite de los granos, pero aumentó el porcentaje de proteína de los granos y por ende de los subproductos.

Diagnóstico de N en suelo

La disponibilidad de N en pre-siembra permitió explicar el 46% de la variación del rendimiento relativo (RR) (**Figura 2**). Según este modelo, la DOP fue de 150 kg ha⁻¹ de N disponible para un rendimiento de 4000 kg ha⁻¹, siendo el requerimiento medio para producir 1 Mg de grano de 37.5 kg de N. Por otra parte, no se determinó relación entre el RR y el contenido de N-NO₃⁻ en V6 debido en parte por la ocurrencia de excesos hídricos previos al muestreo (120 mm).

Considerando una relación de precios de 4.5:1 la DOE fue en promedio de 110 kg N ha⁻¹ para ambos genotipos, es decir, 40 kg N ha⁻¹ menor a la DOP. Por lo tanto, si bien el empleo de dosis superiores a la DOE no sería rentable, las mismas permitirían incrementar la concentración de proteína en grano. Si bien desde el punto de vista comercial sólo se bonifica por concentración de aceite, el incremento de la proteína permitiría mejorar la calidad comercial de los subproductos. Esta situación generaría posibles bonificaciones de las harinas proteicas y pellets en el mercado internacional.

En este trabajo se determinó que la aplicación de 48 y 90 kg N ha⁻¹ por encima a la DOE (dDOE) en genotipos C y AO permitirían maximizar la concentración de proteína en grano, alcanzando valores de 13.6 y 16.5%, respectivamente. En la **Figura 3** se presenta a modo de ejemplo para genotipos C un esquema que relaciona el método de diagnóstico basado en la disponibilidad de N en pre-siembra con el RR; y la dDOE para maximizar el porcentaje de proteína. En

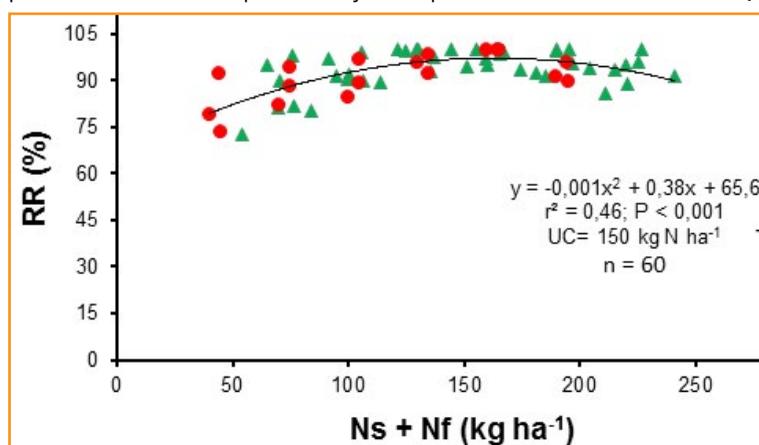


Figura 2. Rendimiento relativo (RR) en función de la disponibilidad de nitrógeno del suelo en pre-siembra del cultivo (Ns) más fertilizante (Nf). UC = umbral crítico de disponibilidad de nitrógeno (N) para RR igual al 95%. AO: alto oleico. C: convencional. n = número de casos.

la misma se puede observar que la aplicación de aproximadamente 48 kg N ha⁻¹ por encima de la DOE (dDOE = 0) permitió maximizar la proteína en grano, aumentando aproximadamente 1% su valor y, por ende, incrementando hasta un 5% la proteína de los subproductos. En síntesis, la determinación de la disponibilidad de N en pre-siembra permitió estimar la DOP y DOE. Estos resultados representan una primera aproximación en la definición de la DOE, lo cual permitiría realizar planteos de fertilización más eficientes y rentables que los actuales.

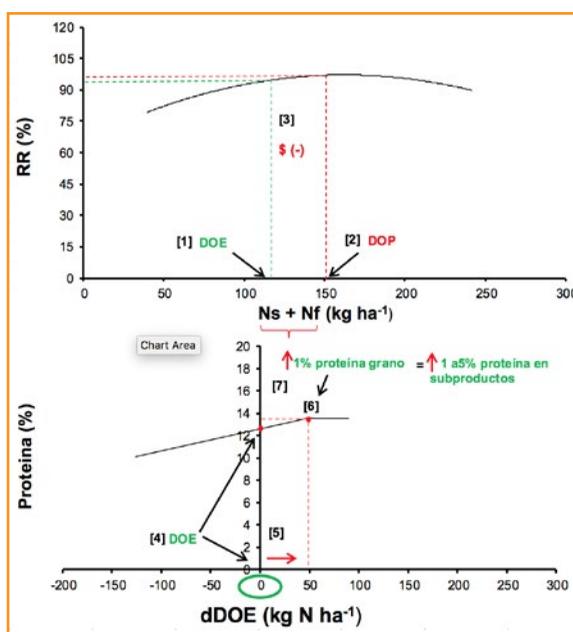


Figura 3. Esquema representativo de la relación entre la dosis óptima de producción (DOP), la dosis óptima económica (DOE), el rendimiento relativo (RR) y la concentración de proteína en grano. [1] determinación de la DOE. [2] determinación de la DOP. [3] margen neto negativo de la inversión en fertilización. [4] nivel de proteína para la dDOE de "cero" (máximo retorno económico). [5] dosis de N necesaria por encima de la DOE para maximizar la concentración de proteína en grano [6] máximo valor de proteína en grano. [7] incremento de hasta 5% del nivel de proteína en los subproductos por cada incremento de 1% de proteína en grano.

Diagnóstico de N en planta

Se observó efecto de la aplicación de N sobre el ISN, tanto en V_6 como en V_{12} . Sin embargo, sólo se observó efecto significativo de la fertilización sobre el NDVIr en V_{12} . Por otra parte, se obtuvo relación significativa entre el ISN y la disponibilidad de N en pre-siembra, tanto en las mediciones realizadas en V_6 como en V_{12} , siendo el r^2 de 0.39 y 0.42, respectivamente. Si bien para el NDVIr la asociación también fue significativa, la misma fue de menor magnitud ($r^2 = 0.13$ y 0.17, para V_6 y V_{12} , respectivamente). Esto indica que el NDVIr no se relacionó adecuadamente con la disponibilidad de N. Por otra parte, utilizando la metodología de los cuadrantes (C) de Cate y Nelson (1965), se determinó para el ISN un 74% y 70% de puntos correctamente diagnosticados (C2 + C3) para V_6 y V_{12} , respectivamente (umbral crítico: 0.95 y 0.92, respectivamente) (**Figura 4**). Sin embargo, para el NDVIr dicho porcentaje fue menor (64% y 57% para V_6 y V_{12} y umbral crítico de 0.98 y 0.97, respectivamente). En síntesis, si bien ambos sensores permitieron diagnosticar deficiencias de N en girasol, el SPAD mostró un mejor comportamiento respecto al Green Seeker. No obstante, el mismo presentó mayor variabilidad en sus lecturas con el avance del ciclo del cultivo.

Conclusiones

Se observó que la aplicación de N en girasol permitió incrementar el rendimiento y la proteína en grano sin afectar la concentración de aceite. Además, la determinación de N en pre-siembra permitió determinar la DOP y la DOE para rendimiento, y la dDOE para maximizar la concentración de proteína en grano e incrementar la calidad de harinas y pellets. En tanto que el SPAD si bien mostró ser una herramienta que podría complementar al diagnóstico de suelo, requiere de futuras investigaciones para su utilización en la práctica.

Bibliografía

- Cate, R., y L., Nelson. 1965. Soil Test. Series Tech. Bull. N° 1.
- Magdoff, F., D. Ross, y J. Amadon. 1984. Soil Sci. Soc. Am. J. 48(6): 1301-1304.
- Massignam, A.A., S.C. Chapman, G.L. Hammer, y S. Fukai. 2009. Field Crop Res. 113(3): 256-267.
- Schneiter, A.A., y J.F. Miller. 1981. Crop Sci. 21(6):901-903.

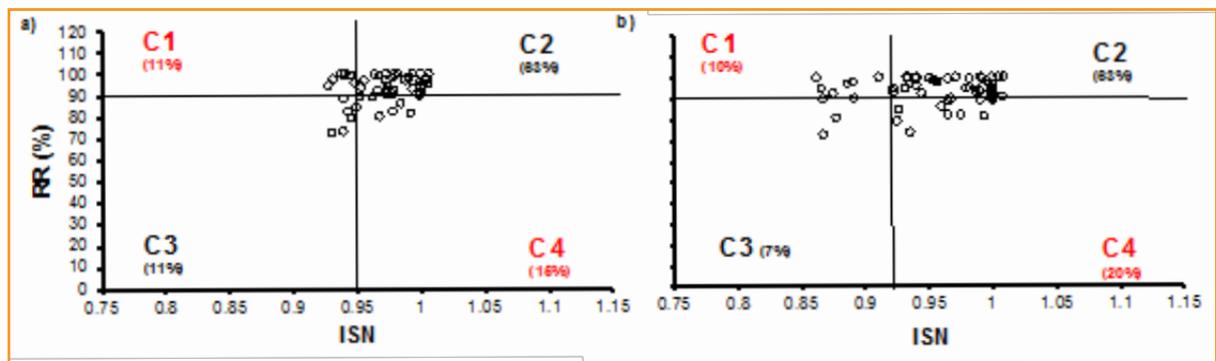


Figura 4. Rendimiento relativo (RR) en función del índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) para los estadios de a) V_6 y b) V_{12} del girasol (Schneiter y Miller, 1981). La línea vertical indica el umbral crítico del índice mientras que la línea horizontal indica el 90% del rendimiento máximo. "C1 y C4" = diagnóstico incorrecto, "C2 y C3" = diagnóstico correcto. Valores entre paréntesis representan el porcentaje de puntos en cada cuadrante sobre el total de casos.

Integrando estrategias de manejo de cultivo y fertilización para reducir las brechas de rendimiento en soja en región pampeana

Juan Martin Enrico^{1,*}, Fernando García², Mike Stewart², Guillermo Balboa³, Ignacio Ciampitti³, y Fernando Salvagiotti¹

¹INTA EEA Oliveros, ²IPNI, ³Kansas State University

*Contacto: enrico.juan@inta.gob.ar

Introducción

El aumento de la producción de los cultivos, la maximización de la eficiencia del uso de los recursos y la reducción de los impactos ambientales negativos en el agro-ecosistema son los principales objetivos de la intensificación sostenible de la agricultura. Para lograrlo es necesario desarrollar conocimientos que permitan comprender los procesos involucrados en la producción potencial de biomasa y su partición a las estructuras reproductivas, la eficiencia en el uso de los recursos (agua, luz, nutrientes) y la magnitud de la brechas entre prácticas de producción frecuentemente utilizadas en una determinada área con respecto a aquellas recomendada para un uso más intensivo de los recursos e insumos.

El rendimiento potencial (RP) de la soja está determinado genéticamente aunque es difícil que se pueda observar a campo, i.e. que se conjuguen condiciones "ideales" (medio ambiente y tipo de suelo), aun asumiendo que no hay limitaciones en el suministro de agua y nutrientes y en ausencia de factores limitantes del rendimiento (por ejemplo, insectos, enfermedades). Por lo tanto, es más correcto hablar del rendimiento máximo (RM) que se pueda obtener en determinadas condiciones de manejo. En condiciones de secano (donde el agua es el factor más limitante), el RM puede definirse como el máximo rendimiento en secano (RMS). Las prácticas de manejo de los cultivos (por ejemplo, espaciamiento entre hileras, fecha de siembra, densidad de plantas, genotipo utilizado) determinarán diferentes brechas de rendimiento entre el manejo más frecuente y el recomendado para altos rendimientos. En general es aceptado que cuando la brecha es inferior al 20% (i.e. 80% del RMS), es más difícil encontrar aumentos consistentes en el rendimiento todos los años. Por otra parte, en los lotes de producción existen deficiencias nutricionales que deben ser corregidas para poder acercarse al RMS. Estas deficiencias, que son propias de cada lote, pueden ser caracterizadas

con herramientas como los análisis de suelos y tejido. En región pampeana son conocidos los déficits generales de nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) o de micronutrientes como el zinc (Zn) (Salvagiotti et al., 2012; Salvagiotti et al., 2013; Salvagiotti et al., 2017; Barbieri et al., 2017).

En los últimos años diferentes estudios han mostrado que diversas prácticas de manejo incrementan la producción en soja, por ejemplo, la reducción del espaciamiento entre surcos (Rizzo et al., 2009; Bacigaluppo et al., 2011; Martignone et al., 2011), la correcta elección del genotipo evaluado en redes de ensayo (Bacigaluppo et al., 2013) o la siembra en fechas más tempranas (Mercau et al., 2004; Enrico et al., 2013).

En consecuencia, para poder reducir las brechas de rendimiento en un lote determinado es menester conocer los efectos relativos de las medidas del manejo del cultivo como aquellos de la corrección de las deficiencias nutricionales.

El objetivo de este estudio fue cuantificar la brecha de rendimiento de la soja y variables fisiológicas asociadas al mismo entre la estrategia de manejo de cultivo (MC) y manejo de nutrientes (MN) más utilizada y las estrategias de MC x MN con un mayor nivel de intensificación.

Materiales y métodos

Dos experimentos de evaluación de estrategias de manejo de cultivo y fertilización fueron sembrados en la campaña 2014-2015 y 2015-16 en Oliveros, Argentina (32°33'S, 60°51'O) bajo condiciones de secano. En cada año se evaluaron cuatro tratamientos que combinaron dos manejos de cultivo con dos manejos de la nutrición de los mismos: Prácticas más frecuentes (PF), Fertilización por recomendación (FR), Intensificación del Manejo (IM) e Intensificación del manejo y la fertilización (IMF). En los tratamientos PF y FR, el manejo del cultivo de soja fue el de uso más frecuente en el sur de Santa Fe, consistiendo en

el uso de un genotipo ampliamente utilizado en la zona, sembrado a mediados de noviembre a 52 cm de distanciamiento entre hileras. Por otro lado, en los tratamientos IM y IMF, se evaluó un manejo más intensivo dirigido a maximizar el rendimiento de semilla, considerando simultáneamente la reducción en el espaciamiento entresurcos, el uso de un genotipo con mayor rendimiento potencial y sembrado en una época de siembra más temprana (fines Octubre-Principios Noviembre).

Respecto a las estrategias de fertilización, en FR y IMF se inoculó y fertilizó la soja con adición de P y S (20 kg de cada nutriente por ha y año) aplicados aproximadamente 6 meses antes de la siembra y al voleo en invierno, siguiendo las recomendaciones del INTA, y utilizando micronutrientes (Boro) y N en etapas reproductivas. En cambio, IM y PF no recibieron fertilización ni inoculación. Por lo tanto, los cuatro tratamientos fueron una combinación de 2 estrategias de manejo y 2 de fertilización (**Tabla 1**). Todos los tratamientos se organizaron en un diseño de bloques completos al azar. Se aplicaron herbicidas, insecticidas y fungicidas dependiendo de la presencia de malezas, insectos y enfermedades (**Tabla 1**).

En los estadios R2, R5, y R7 se determinó la biomasa de las plantas (expresado en materia seca, MS) y se calculó la tasa de crecimiento de los cultivos (TCC, kg ha⁻¹ d⁻¹) en el período crítico para la determinación del número de semillas de

la soja (R2-R5). Además durante el crecimiento vegetativo (E-R1) y los períodos R2-R5 y R5-R7 se midió el índice de área foliar (IAF). Para analizar las variables asociadas a la definición del número de semillas se utilizó la aproximación de Rotundo et al. (2012) que tiene en cuenta la tasa de crecimiento entre R2 y R5 (g m⁻² día⁻¹), la duración del periodo R2-R5 (días) partición de biomasa a estructuras reproductivas (g frutos R5 por g biomasa R2-R5) y la eficiencia de cuajado (numero semillas por g frutos R5).

A madurez de cosecha, se realizó la cosecha en un área de 6 m² (el rendimiento fue ajustado a 13% humedad comercial) y se realizó una descripción detallada de los principales componentes numéricos en la determinación del rendimiento.

Condiciones meteorológicas durante las campañas 2014/15 y 2015/16.

En la temporada 2014-15, las precipitaciones durante el ciclo de cultivo (Emergencia - R7) fueron de 633 y 574 mm para los tratamientos de siembra temprana (IM y IMF) y tardía (PF y FR), respectivamente. Estos valores fueron 40 y 25% superiores al registro histórico. En consecuencia, se registraron balances atmosféricos positivos para ambos manejos. En la temporada 2015-16, las precipitaciones durante el ciclo de cultivo fueron de 719 y 697 mm para los tratamientos IM y IMF y tardía PF y FR. Estos valores fueron 43% mayores que los valores históricos (**Figura 1**).

Tabla 1. Descripción de los tratamientos en Oliveros durante las campañas 2014-2015 y 2015-16.

Tratamientos		PF	FR	IM	IMF
Densidad de siembra objetivo (pl ha ⁻¹)		290 000	290 000	440 000	440 000
Espaciamiento e/hileras (cm)		52	52	26	26
Cultivar		DM 4970	DM 4970	LDC 4.7	LDC 4.7
Fecha de siembra	2014-15	28 Nov	28 Nov	7 Nov	7 Nov
	2015-16	18 Nov	18 Nov	5 Nov	5 Nov
Inoculación		NO	SI	NO	SI
Fertilización		Sin fertilizante	20 kg P ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹ *	Sin fertilizante	20 kg P ha ⁻¹ + 20 kg S ha ⁻¹ *
Micronutrientes		NO	Foliar B @ R2-R3	NO	Foliar B @ R2-R3
N en inicio de llenado de semillas (R5)		NO	SI** (50 kg N ha ⁻¹)	NO	SI** (50 kg N ha ⁻¹)

* Voleado en cobertura total en el mes de Julio

** Voleado en cobertura total en inicio de llenado de las semillas (R5)

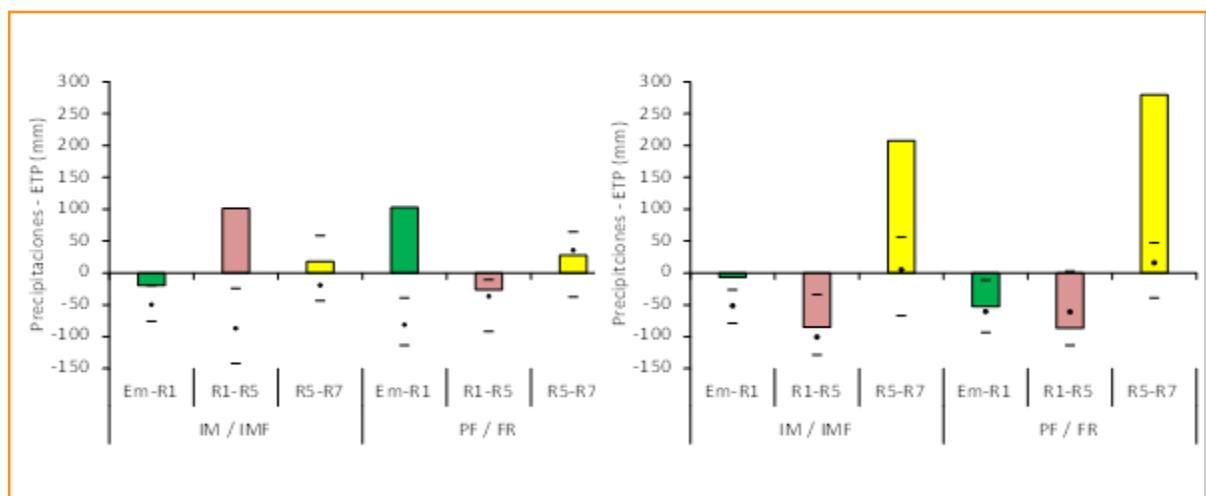


Figura 1. Balance atmosférico (Precipitación - ETP) en tres sub periodos durante el ciclo de la soja (Vegetativo: Em-R1, reproductivo temprano: R1-R5, período de llenado de la semilla: R5-R7) en 2014/15 (izquierda) y 2015/16 (derecha). Las líneas horizontales y los puntos representan el 25° y 75° cuartil y la mediana, respectivamente.

Condiciones del suelo

El suelo representa un suelo químicamente degradado típico en el área. La materia orgánica fue alrededor del 2% (**Tabla 2**).

Tabla 2. Caracterización química del suelo antes de la siembra a la profundidad 0 - 20 cm para las campañas 2014-15 y 2015-16.

Año	NO ₃ (ppm)	P Bray (ppm)	pH	MO (%)
2014-15	113	29	5.3	2.0
2015-16	102	15	5.2	2.0

Resultados y discusión

Evolución de la producción de materia seca (MS) e Índice de Área Foliar (IAF)

La evolución de la MS durante ambas campañas fue similar hasta el inicio del llenado de semillas ($p > 0.13$), mientras que en el estado de R7 existió interacción año (A) x tratamiento (T), explicada por las diferencias observadas en la campaña 2015-16 ($p=0.08$) (**Tabla 3**). Se observaron diferencias en la producción de MS en los estados fenológicos de R2 y R7 entre las diferentes estrategias de cultivo ($p < 0.01$). La MS en R5 no mostró diferencias significativas

Tabla 3. Materia seca (MS) en diferentes estados reproductivos del cultivo de soja (R2, R5 y R7) e índice de área foliar (IAF) en inicio de llenado de semillas (IAF R5) para las diferentes estrategias de producción de soja.

	MS R2 (kg ha ⁻¹)	MS R5 (kg ha ⁻¹)	MS R7 (kg ha ⁻¹)	IAF R5 (m ² m ⁻²)
PF	2005	8870	9559	5.1
FR	2259	9829	9703	5.3
IM	2837	8586	11407	5.6
IMF	3146	9065	12431	6.5
Año (A)	0.17	0.13	0.08	0.07
Tratamiento (T)	0.01	0.19	<0.01	<0.01
A x T	0.43	0.88	<0.01	<0.01
Contrastes				
FR vs PF	0.43	0.11	0.74	0.48
IM vs PF	0.02	0.61	<0.01	0.08
IMF vs PF	<0.01	0.73	<0.01	<0.01

entre las diferentes estrategias de producción, pero si existió un incremento en la producción de MS por efecto de la aplicación de fertilizantes promediando las estrategias de manejo ($p=0.08$; **Figura 2**).

La evolución del IAF fue similar para todas las estrategias durante el período vegetativo del cultivo y hasta el estado de R2 en ambas campañas ($p=0.11$, **Figura 3**). En el estado R5 existió interacción significativa $A \times T$ ($p<0.01$), explicada por la ausencia de respuesta en la campaña 2014-15 ($p=0.49$), mientras que el IAF alcanzado en la campaña 2015-16 por los tratamientos IM e IMF tuvieron un IAF mayor y se diferenciaron significativamente de los tratamientos PF y FR

($p=0.04$). También, como fuera observado para la producción de biomasa, se observó efecto del fertilizante en el manejo más intensificado ($p<0.001$; dato no mostrado; **Figura 3**).

Rendimiento y componentes del rendimiento

Promediando ambos años, la estrategia de PF produjo un rendimiento de 4626 kg ha^{-1} . Cada estrategia en forma individual [es decir, FR (solo fertilización) o IM (solo manejo)] no aumentó significativamente el rendimiento con respecto a PF. Sin embargo, cuando se implementó en forma conjunta una estrategia de fertilización (FR) y un manejo de cultivo intensificado (IM), se observó un aumento significativo de 8% en el rendimien-

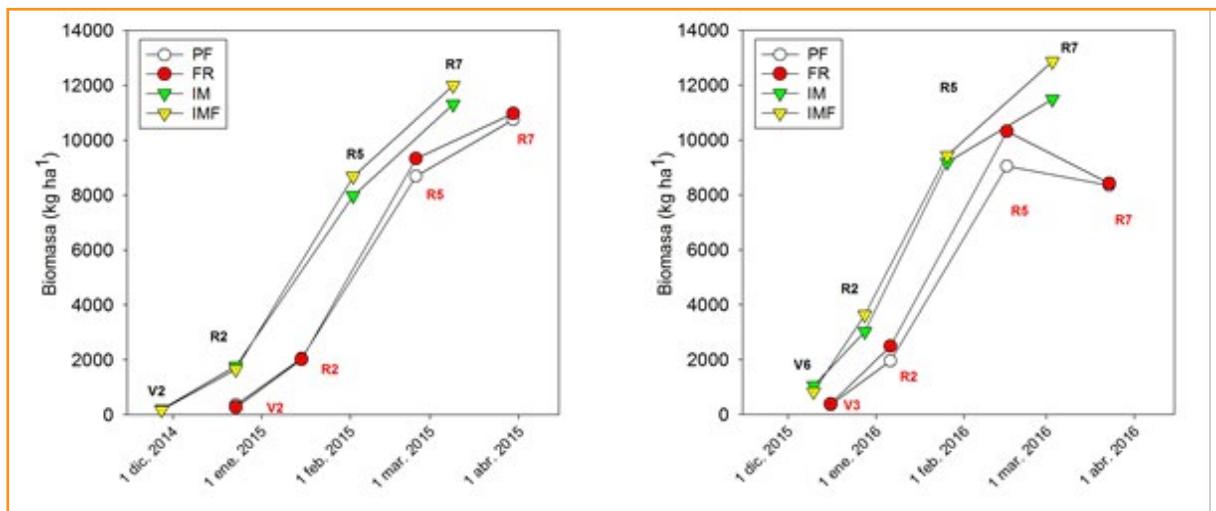


Figura 2. Evolución de la MS para las diferentes estrategias de producción del cultivo de soja en la campaña 2014-15 (Panel izquierdo) y campaña 2015-16 (Panel derecho).

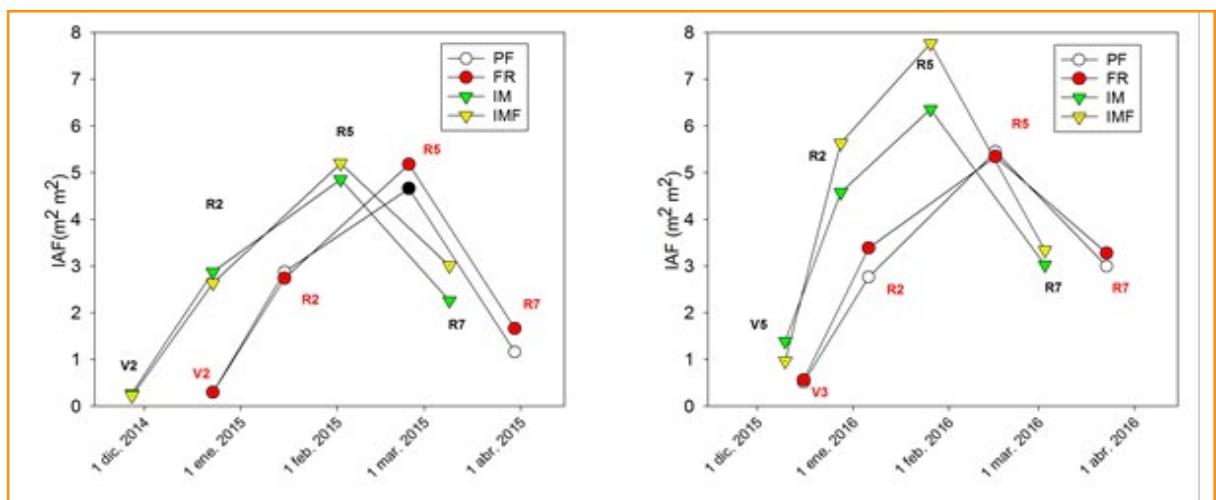


Figura 3. Evolución del IAF para las diferentes estrategias de producción del cultivo de soja en la campaña 2014-15 (Panel izquierdo) y campaña 2015-16 (Panel derecho).

to (aproximadamente 360 kg ha⁻¹; **Tabla 4**). Del mismo modo, la estrategia de fertilización (promediado de los tratamientos IM) aumentó el rendimiento en un 5%, $p < 0.06$ (datos no mostrados).

En la primera temporada, la estrategia de plantación tardía (PF y FR) mostró mayor peso de semilla individual que la estrategia de plantación temprana (IM y IMF) (185 vs. 164 mg por semilla), pero en la temporada 2015-2016, se determinó una tendencia diferente (161 y 169 para la estrategia de fecha de siembra tardía y temprana, respectivamente; **Tabla 4**).

No se observó efecto de interacción A x T en la variable TCC ($p = 0.88$) y tampoco efecto de T y A entre las diferentes estrategias de manejo ($p = 0.15$). Cuando se analizó el coeficiente de partición se encontró interacción A x T ($p = 0.02$), sin embargo, las diferencias entre tratamientos se encontraron solo en la campaña 2015-16 ($p < 0.01$), donde las estrategias PF y FR tuvieron valores mayores de CP (0.25 y 0.29, respectivamente) respecto de las estrategias IM e IMF (0.18 y 0.17, respectivamente). En cuanto a la eficiencia de cuajado de vainas (EC), no existió interacción entre A x T, y se determinaron diferencias significativas entre campañas ($p = 0.04$) y estrategias de producción ($p < 0.01$). Los tratamientos IM e IMF presentaron mayor EC respecto de las estrategias PF y FR (**Tabla 5**).

Conclusiones

Estos resultados preliminares muestran que toda práctica de intensificación del manejo del cultivo de soja debe ser acompañada de un manejo de la nutrición de cultivo para optimizar el uso de los recursos. Los procesos que ocurren en la etapa de cuajado y llenado de las semillas son los más afectados por el efecto conjunto de la intensificación del manejo y uso de los nutrientes.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto "Quebrando barreras de rendimiento de soja: Integración de prácticas de producción de cultivo y estrategias de fertilización - Una aproximación de sistemas de producción" de IPNI.

Tabla 4. Rendimiento (kg ha⁻¹), peso unitario de la semilla (PUS en mg), número de semillas (NS), nudos fértiles en tallo principal por planta (# nud fért en TP pl⁻¹), número de nudos fértiles en tallo principal (# nud fért TP m⁻²) y número de vainas por nudo reproductivo (NV nud rep⁻¹).

	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	PUS (mg)	NS (sem m ⁻²)	# nud fért en TP pl ⁻¹	# nud fért TP m ⁻²	NV nud rep ⁻¹
PF	4627	171	2702	11.8	419	2.6
FR	4839	176	2742	11.4	400	2.7
IM	4752	165	2883	12.6	523	2.2
IMF	4989	169	2964	13.3	554	2.2
Año (A)	0.01	0.04	<0.01	<0.01	0.14	0.60
Tratamiento (T)	0.19	<0.01	0.05	0.03	<0.01	<0.01
A x T	0.75	<0.01	0.08	<0.01	0.20	0.63
Contrastes						
FR vs PF	0.21	<0.01	0.67	0.53	0.63	0.56
IM vs PF	0.45	<0.01	0.07	0.17	0.02	<0.01
IMF vs PF	0.04	0.23	<0.01	0.02	<0.01	<0.01

Tabla 5. Duración y tasa de crecimiento de cultivo (TCC) durante la etapa de fijación de frutos, coeficiente de partición (CP) y eficiencia de cuajado (EC).

	Duración R2-R5 (días)	TCC R2- R5 (g m ² día ⁻¹)	CP (g g ⁻¹)	EC (semillas g ⁻¹)
PF	41	16.9	0.24	17.0
FR	41	18.7	0.25	15.7
IM	44	15.2	0.19	28.2
IMF	44	16.5	0.18	27.8
Año (A)		0.21	0.14	0.04
Tratamiento (T)		0.15	<0.01	<0.01
A x T		0.88	0.02	0.86
Contrastes				
FR vs PF		0.24	0.59	0.69
IM vs PF		0.23	<0.01	<0.01
IMF vs PF		0.77	<0.01	<0.01

Bibliografía

Bacigaluppo, S., J.M., Enrico, R.A., Martignone, y M.L., Bodrero. 2011. Respuesta al espaciamento entre hileras en soja: II Rendimiento y sus componentes. Archivo TC 29 en Versión digital del libro de Trabajo Científicos, Parte II. Tecnología de cultivo.

Bacigaluppo, S., M. Bodrero, J.M. Andriani, J. Capurro, A. Condori, M. De Emilio, M.J. Dickie, O. Gentili, G. Gerster, A. Malmantile, J.M. Méndez, R. Pagani, G. Prieto, y J. Rossi. 2013. Evaluación en red de cultivares de soja de los grupos de madurez III, IV y V en siembras de primera época en diferentes ambientes del centro - sur de Santa Fe. Campaña 2012-13. Para mejorar la producción 50. INTA Oliveros.

Barbieri, P., H.R. Sainz Rozas, N. Wyngaard, M. Eyherabide, N. Reussi Calvo, F. Salvagiotti, A. Correndo, P.A. Barbagelata, G. Espósito Goya, J.C. Colazo, y H.E. Echeverría. 2017. Can edaphic variables improve DTPA-based zinc diagnosis in corn? Soil Sci. Soc. A. J., in press.

Enrico, J.M., M.B., Conde, R.A., Martignone, y M.L., Bodrero. 2013. Soja: evaluación de la estabilidad del rendimiento según fechas de siembra. Para mejorar la producción 50, 71-78. INTA Oliveros.

Martignone, R. A., Bacigaluppo, S., J.M. Enrico, y M.L. Bodrero. 2011. Respuesta al espaciamento entre hileras en soja: I Intercepción de radiación y parámetros de crecimiento. Archivo TC 28 en Versión digital del libro de Trabajo Científicos, Parte II. Tecnología de cultivo.

Mercau, J.L., J. Dardanelli, J. Andriani, D. Collino, y J. Belligoi. 2004. Diseño de estrategias de producción de soja: Utilización de un modelo de simulación agronómico. Para mejorar la producción 27, 122-129. INTA Oliveros.

Rizzo, F., y P. De Luca, 2009. Impact of row spacing upon soybean crop yield. World Soybean Conference Research, August 10-15, 2009, Beijing China

Rotundo, J.L., L. Borrás, J. De Bruin, y P. Pedersen. 2012. Physiological strategies for seed number determination in soybean: Biomass accumulation, partitioning and seed set efficiency. Field Crops Research 135, 58-66.

Salvagiotti, F., M. Barraco, D. Dignani, H. Sanchez, A. Bono, P. Vallone, G. Gerster, C. Galarza, J. Montoya, y V.J. Gudelj. 2013. Plant stand, nodulation and seed yield in soybean as affected by phosphate fertilizer placement, source and application method. European Journal of Agronomy 51, 25-33.

Salvagiotti, F., G. Ferraris, A. Quiroga, M. Barraco, H. Vivas, P. Prystupa, H.E. Echeverría, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2012. Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content; N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. Field Crops Research 135, 107-115.

Salvagiotti, F., P. Prystupa, G. Ferraris, L. Couretot, L. Magnano, D. Dignani, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2017. N:P:S stoichiometry in grains and physiological attributes associated with grain yield in maize as affected by phosphorus and sulfur nutrition. Field Crops Research 203, 128-138. ●

Partición de la fertilización nitrogenada en trigo ¿Estrategia para lograr altos rendimientos con calidad?

Gustavo N. Ferraris¹, y Mirta Toribio²

¹INTA EEA Pergamino. Av Frondizi km 4.5 B2700WAA Pergamino, ²Profertil SA

*Contacto: ferraris.gustavo@inta.gob.ar

Introducción

El nitrógeno (N) es el principal elemento para la producción de trigo. Sus deficiencias afectan la expansión y duración del área foliar, reducen la fotosíntesis y disminuyen el número y peso de los granos. El N es además el principal determinante de la calidad del grano, ya que de su concentración depende el contenido de proteína y gluten. Al ser un elemento fuertemente limitante, su concentración en el suelo y el momento del ciclo en que está disponible determinan el balance entre rendimiento y calidad. Si la disponibilidad de N no fuese limitada, se podría al mismo tiempo maximizar los rendimientos y optimizar la calidad. Sin embargo, las cantidades aportadas podrían resultar antieconómicas, y se corre el riesgo de ocasionar un perjuicio ambiental. Cuando la cantidad de N es fija o limitada, modificar el momento de aplicación o distribuirlo en diferentes etapas del ciclo podría resultar relevante con el objetivo de maximizar la eficiencia fisiológica (kg N absorbido : kg N aplicado⁻¹) y agronómica (kg rendimiento : kg N aplicado⁻¹) de utilización del nutriente.

El objetivo de esta investigación es Evaluar el efecto de la partición de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento y calidad de trigo. Hipotetizamos que: Distribuyendo la fertilización en diferentes momentos es posible maximizar la eficiencia de utilización de N, optimizando a la vez rendimiento y concentración de proteína en grano.

Tabla 2. Datos de suelo al momento de la siembra.

Sitio	pH (0-20 cm)	MO (0-20 cm)	N total (0-20 cm)	P extractable (0-20 cm)	N-Nitrato (0-60 cm)	S-Sulfato (0-20 cm)
	agua 1:2.5	%		mg kg ⁻¹	kg ha ^{-1c}	kg ha ⁻¹
2013	5.4	2.73	0.130	8.0	58.8	8.2
2014	5.6	2.83	0.141	17.8	63.3	8.0
2015	5.7	2.26	0.113	7.8	94.5	7.9

Materiales y métodos

Durante los ciclos 2013, 2014 y 2015 se realizaron 3 experimentos de fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo. El diseño de los ensayos fue en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se adicionó una misma dosis de 100 kg N ha⁻¹, aplicada en diferentes momentos del ciclo en contraste con un tratamiento control. La descripción de los mismos se presenta en la **tabla 1**.

Tabla 1. Tratamientos de fertilización nitrogenada en trigo.

T1: Control sin N
T2: 100 kgNha ⁻¹ siembra
T3: 70 kgNha ⁻¹ siembra – 30 kgNha ⁻¹ Zadoks 31
T4: 50 kgNha ⁻¹ siembra – 50 kgNha ⁻¹ Zadoks 31
T5: 33 kgNha ⁻¹ siembra – 33 kgNha ⁻¹ Z 31 – 33 kgNha ⁻¹ Z 39
T6: 50 kgNha ⁻¹ Zadoks 31 – 50 kgNha ⁻¹ Zadoks39
T7: 100 kgNha ⁻¹ Zadoks 31.

Como fuente se utilizó urea granulada (46-0-0). Los cultivares pertenecieron al Grupo II de calidad. En la **Tabla 2** se presenta la disponibilidad de nutrientes en cada una de las campañas.

La cosecha se realizó en forma mecánica. Sobre una muestra de grano, se determinó la concentración de N por el método de Micro-Kjeldahl, calculando a partir de este resultado la concentración de proteína y la recuperación aparente de N en grano.

Resultados y discusión

El escenario climático fue variable, seco en 2013, húmedo en 2014 y muy húmedo durante 2015. El déficit de evapotranspiración alcanzó a 95 mm en 2013, y no se registraron carencias en 2014 y 2015. Los rendimientos fueron máximos en 2015, y mínimos en 2014, alcanzado un valor intermedio en 2013 (**Figura 1**).

Los rendimientos obtenidos, promedio de tres campañas, fueron de T1: 4160, T2: 5099, T3: 5119, T4: 5155, T5: 4885, T6: 4652 y T7: 4842 kg ha⁻¹, respectivamente. La concentración de proteína (%) fue de T1:11.4; T2:12.6; T3:12.7; T4:12.9; T5:13.3; T6:13.5 y T7:13.1. Claramente, las aplicaciones tardías conservaron un mayor

contenido de proteína en grano. Este comportamiento ya había sido reportado por Ferraris et al., (2008) en cebada cervecera. Pagnan et al. (2016) en Marcos Juárez observaron un incremento mínimo medio de entre 0,9% en cultivares de GIII de calidad y un máximo medio de 1,1 % en cultivares GI, por la aplicación de 20 kgNha⁻¹ en el estado 39 de Zadoks (Zadoks et al., 1974). La absorción total de N en grano alcanzó a T1:81.1; T2:110.5; T3:111.8; T4:114.1; T5:111.1; T6:107.4 y T7:108.5 kg N ha⁻¹. Dicha absorción fue máxima en los tratamientos de mayor rendimiento, demostrando mayor eficiencia biológica en la síntesis de carbohidratos en comparación con la acumulación de proteína en grano.

Considerando la eficiencia biológica de recuperación (kg N absorbido : kg N aplicado⁻¹) y la eficiencia biológica de acumulación en grano (kg N en grano:kg N aplicado⁻¹), la partición 70-30, 50-50 y 33-33-33 se ubicarían en el óptimo, respecto de una sola aplicación. Para alcanzar 11% de concentración proteica, se requirieron 25 a 35 kgN (suelo+fertilizante): ton rendimiento⁻¹ con el valor mínimo en 2015 -máxima dilución y superior eficiencia en un ciclo de altos rendimientos- y el máximo en 2014. Entre las variables de diagnóstico, el NDVI por Green seeker fue el mejor estimador de rendimiento (**Figura 2**), y el índice verde medido por Spad lo fue para concentración de proteína, cuantificados en Zadoks 65 (**Figura 3**).

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Boero et al, (2016) en cebada. Según dichos autores, la intensidad verde determinada en forma absoluta o relativa por Spad fue el único índice espectral capaz de predecir la concentración de proteína en grano, en comparación con otros indicadores como NDVI, Green Seeker NDVI, OSAVI, TCARI, REIP o el cociente MTCARI/MTVI2, que resultaron mejores estimadores de número de granos y rendimiento. Ello se debería al efecto de la biomasa acumulada y la falta de cobertura foliar sobre la mayoría de estos indicadores, así como también de la reflectancia del suelo (Eitel et al., 2008). Una moderada correspondencia entre la concentración de proteína en grano con las lecturas Spad fueron reportadas por diversos autores (Wienhold y Krupinsky, 1999; Haboudane et al., 2002; Bergh et al., 2004; Lopez-Bellido et al., 2004; Clevers y Kooistra, 2012).

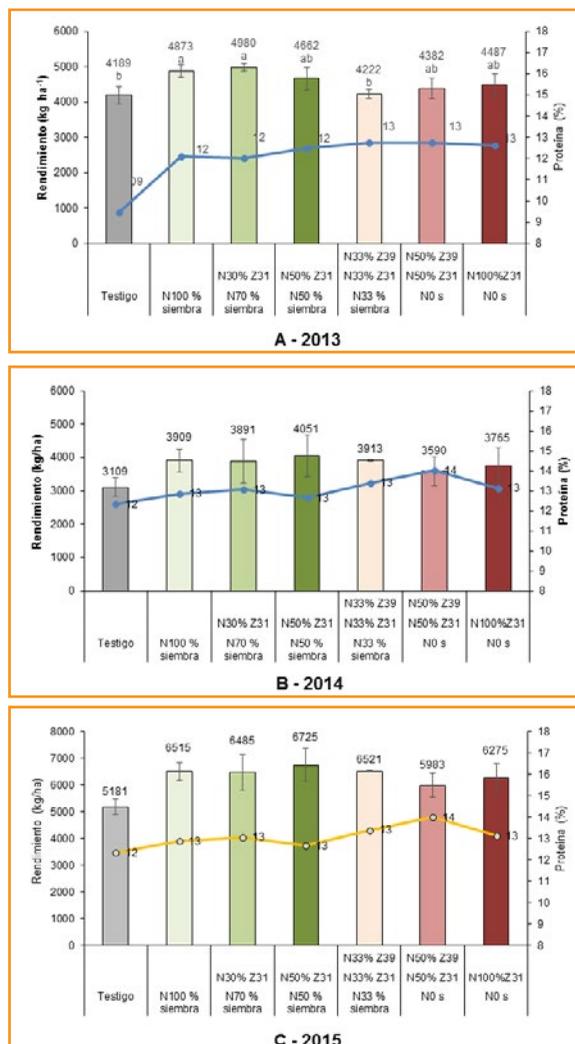


Figura 1. Rendimiento y proteína (%) según estado fenológico de aplicación de nitrógeno en trigo. Años 2013 (a), 2014 (b) y 2015 (c).

Conclusiones

El correcto manejo de N es un instrumento clave para obtener una producción eficiente y un adecuado balance entre rendimiento y calidad. Una adecuada partición permite evitar pérdidas, con el consecuente deterioro de la calidad. Conjugando un criterio agronómico y tecnológico, la partición en dos estadíos de aplicación, 70-30 o 50-50 resultaría ajustada a las condiciones productivas de sitios de alto rendimiento del Norte de Buenos Aires. Sensores como Green seeker o Spad serían las herramientas apropiadas para un seguimiento del cultivo y así determinar necesidades puntuales de N con objetivo de rendimiento o calidad.

Bibliografía

Bergh, R., T. Loewy, y H.E. Echeverria. 2004. Nitrógeno en trigo: Rendimiento y calidad panadera. II. Aplicación de las lecturas de índice de verdor. Actas del VI Congreso Nacional de Trigo y IV Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño-Invernal. Bahía Blanca, Pcia. Buenos Aires: 121-122.

Boero, J.J., P. Prystupa, F. Gómez, S. Urricarriet, G. Ferraris, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2016. Estimación de la nutrición nitrogenada en antesis mediante índices espectrales en cebada cervecera. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Río Cuarto, 27/6-01/07. ISBN: 978-987-688-170-8.

Clevers, J.G., y L. Kooistra. 2012. Using hyperspectral remote sensing data for retrieving canopy chlorophyll and nitrogen content. IEEE J Selected Topics Applied Earth Observations Remote Sensing, 5(2): 574-583.

Eitel, J.U.H., D.S. Long, P.E. Gessler, E.R. Hunt, y D.J. Brown. 2008. Sensitivity of ground-based remote sensing estimates of wheat chlorophyll content to variation in soil reflectance. Soil Sci. Soc. Am. J. 2009, 73, 1715-1723.

Ferraris, G., R. Bergh, T. Loewy, L. Ventimiglia, L. Couretot, F.H. Gutiérrez-Boem, y P. Prystupa. 2008. Fertilización de cebada cervecera cv. scarlett: III. Efecto del nitrógeno en espigazón y su interacción con el nitrógeno inicial. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis, Mayo.

Haboudane, D., J.R. Miller, N. Tremblay, P.J. Zarco-Tejada, y L. Dextrazec. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop Chlorophyll content for application to precision agriculture. Remote Sens. Environ. 81:416-426.

Lopez-Bellido R.J., C.E. Shepherd, y P.B. Barraclough. 2004. Predicting post-anthesis N requirements of bread wheat with a Minolta SPAD meter. European Journal of Agronomy, 20: 313-320.

Miller, L., y J. Houghton. 1945. The Micro-Kjeldahl: determination of the nitrogen content of amino acids and proteins. J. Biol. Chem. 1945, 159:373-383.

Pagnan, L., G. Pesaola, J. Bruno, L. Errasquin, y R. Alladio. Efecto de la aplicación foliar tardía sobre el rendimiento y la calidad comercial de cultivares de trigo. Trigo. Actualización 2016. Informe de actualización técnica en línea N° 4. INTA EEA Marcos Juárez.

Wienhold, B.J., y J.M. Krupinsky. 1999. Chlorophyll meter as nitrogen management tool in malting barley. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 30:2551-2562.

Zadoks, J.C., T.T. Chang, y C.F. Konzak. 1974. A decimal code for growth stages of cereals. Weed Res. 14: 415-421. ●

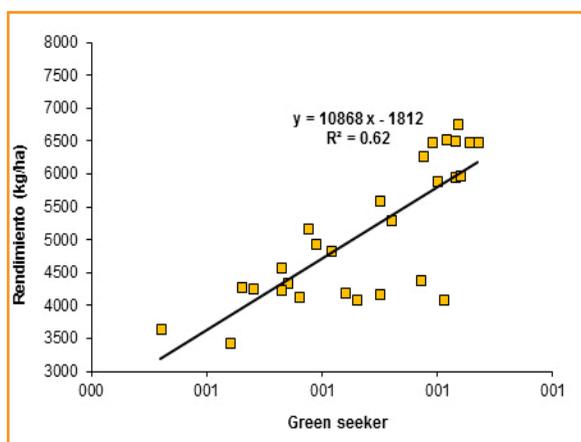


Figura 2. Relación entre rendimiento de grano (kg ha⁻¹) y Green seeker - NDVI en hoja bandera expandida (estado 39 de Zadoks), según un ajuste cuadrático-plateau. Pergamino. Campañas 2013, 2014 y 2015.

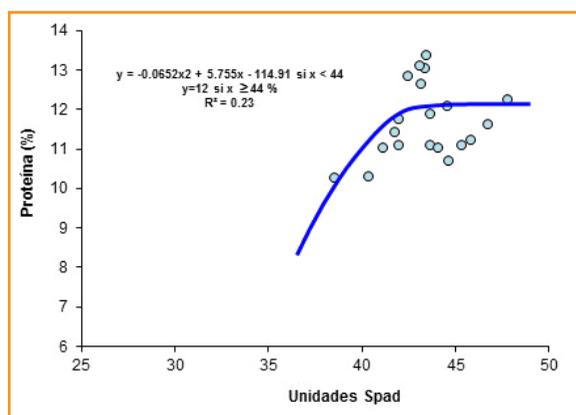


Figura 3. Relación entre concentración de proteína en grano de trigo (%) e intensidad de verde por Spad en hoja bandera expandida (estado 39 de Zadoks), según un ajuste cuadrático-plateau. Pergamino. Campañas 2013, 2014 y 2015.

Aplicación variable de nitrógeno en maíz ¿Qué estamos aprendiendo en el Noroeste Bonaerense?

Paula Girón^{1,2}, y Agustín Pagani^{1y3}

¹Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires (FAUBA), ²EEA INTA Villegas, ³Clarion, 9 de Julio, Buenos Aires.

*Contacto: giron.paula@inta.gob.ar - apagani@precisionclarion.com

Introducción

El cultivo de maíz (*Zea mays*) es la gramínea de verano más importante en los sistemas productivos de la región pampeana argentina y ocupa una importante superficie en el NO bonaerense. El maíz cumple un rol fundamental en las rotaciones agrícolas, debido a que realiza grandes aportes de residuos orgánicos al suelo, mejorando el balance de carbono (Janzen, 2006) y la proporción de macroporos a través de su sistema radical, dando así una condición favorable para el crecimiento de las raíces de los cultivos siguientes (Pedrol, 2004).

El nitrógeno (N) es el nutriente esencial más importante para los cultivos por su rol en los sistemas biológicos, la complejidad de su ciclo y su participación en los sistemas de producción (Havlin et al., 2005). La disponibilidad de N es uno de los factores edáficos que con mayor frecuencia condiciona el rendimiento del cultivo de maíz por lo que la aplicación de este nutriente se encuentra ampliamente difundida. A su vez, la fertilización nitrogenada tiene una alta importancia relativa dentro del costo de producción de maíz, lo que hace necesario contar con herramientas que permitan determinar la dosis óptima económica de N (DOEN), es decir, la cantidad de insumo (fertilizante nitrogenado) que maximiza la renta de este cultivo (Pagani et al., 2008, Jaynes et al., 2011). Por otra parte, el manejo del N tiene implicancias ambientales relacionadas a la calidad del agua y aire (Robertson et al., 2000; Basso y Ritchie, 2005).

Numerosos estudios han mostrado que la DOEN para el cultivo de maíz varía entre lotes y entre años (Mamo et al., 2003; Sambroski et al., 2009). A su vez, dentro de un mismo lote de producción, la DOEN puede no ser uniforme debido a la variabilidad espacial de las condiciones de los cultivos en crecimiento y de las propiedades del suelo (Pierce y Nowak, 1999; Puntel y Pagani, 2013).

En este sentido, la agricultura de precisión permite implementar estrategias de manejo sitio-específicas para abordar la variabilidad espacio-temporal de la producción agrícola (Pierce y Nowak, 1999). Uno de los enfoques propuestos que utilizan a la agricultura de precisión como herramienta para el manejo sitio-específico de N es el que se basa en la delimitación de zonas de manejo (ZM). Se define ZM como una subregión dentro de un lote que expresa una combinación homogénea de los factores limitantes de rendimiento para los cuales es apropiada una dosis única de un insumo específico (Doerge, 1999). El ajuste de la dosis de N por ZM tendrá el potencial de incrementar la eficiencia de uso de N (EUN), maximizar el beneficio económico y de reducir el impacto ambiental (Anselín, 2004; Peralta et al., 2013).

La delineación de cada ZM puede ser realizada mediante diversos criterios como mapas de rendimiento de años anteriores (Ferguson et al., 2003), topografía (Franzen et al., 2000), conductividad eléctrica aparente (CEa) (Lund et al., 1999), índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) (Basso, 2012), tipo de suelo (Pautasso et al., 2010), o con un abordaje más integral a través de la superposición de ellos (Derby et al., 2007).

Algunos estudios han concluido que los principios generales del manejo sitio-específico son transferibles entre regiones, pero las estrategias de fertilización con dosis variable deben ser modelados localmente porque las condiciones edáficas y climáticas son variables (Anselin, 2004). Por lo tanto, es relevante para el NO bonaerense contar con información de la variabilidad espacial a nivel intra-lote de la respuesta a N por parte del cultivo de maíz y cuáles son las herramientas más apropiadas para caracterizarla, a fin de poder desarrollar estrategias sitio-específicas para ajustar las necesidades de N. En la actualidad

no son abundantes los trabajos que evalúan la variabilidad espacial de la respuesta a N y la DOEN para el cultivo de maíz en lotes de producción, utilizando tecnologías de agricultura de precisión.

El objetivo de este trabajo en curso es i) caracterizar la variabilidad espacial de la respuesta a N y la DOEN para el cultivo de maíz en lotes de producción del NO bonaerense mediante el uso de tecnologías de agricultura de precisión, ii) comparar criterios para delinear ZM de N como variables explicativas de la variabilidad espacial del rendimiento del cultivo, la respuesta a N y la DOEN.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo durante la campaña agrícola 2015-2016 en tres lotes pertenecientes a dos establecimientos del partido de General Villegas. Los campos fueron seleccionados por presentar condiciones edáficas y topográficas típicas de la zona.

Se realizó un relevamiento edáfico-topográfico con una rastra Veris 3100 (Veris Technologies, Salina, KS, USA) y un sistema de posicionamiento global (GPS) RTK de doble frecuencia Trimble 5700 en toda la superficie de los lotes. De esta manera se obtuvieron mapas de CEa a 90 cm (CEa90cm) y elevación con precisión subcentimétrica.

De cada lote se obtuvieron imágenes multiespectrales del cultivo de maíz de años anteriores de los satélites Landsat 5 y Landsat 8 (USGS, 2017) con la finalidad de calcular el NDVI de cultivos de maíz anteriores en cada uno de los sitios experimentales. Las fechas de las imágenes se establecieron considerando las etapas críticas de determinación de rendimiento del cultivo de maíz, momento en el que se puede evidenciar con mayor precisión el potencial grado de variabilidad espacial de un lote de producción. Para cada sitio, se consideraron imágenes de NDVI de tres cultivos de maíz de años anteriores. Estos mapas fueron relativizados con respecto a la media de cada lote y fueron promediados a fin de obtener un indicador de la productividad de maíz histórica y su variabilidad espacial.

La fecha de siembra fue entre el 9 y 10 de octubre en los tres sitios. Se condujeron ensayos

en franja donde se evaluaron cinco dosis de N (0, 30, 60, 120, 240 kg N ha⁻¹). En los tres casos la fuente de N fue urea (46-0-0) incorporada, en el Sitio 1 y 2 aplicada en el estadío de cuatro hojas expandidas y en el Sitio 3 al momento de la siembra. El ancho de la franja fue igual al ancho de trabajo de la fertilizadora (10 m en el Sitio 1 y 2) o de la sembradora (9 m en el Sitio 3) y el largo de la franja fue igual al largo del lote (240, 380 y 1240 m para el Sitio 1, 2 y 3, respectivamente). El diseño fue en bloques completos aleatorizados con dos repeticiones en el Sitio 1 y 2, y tres repeticiones en el Sitio 3. En cada ensayo se intentó orientar las franjas de manera tal que cada bloque quedara lo más uniformemente representado por los patrones de variabilidad edáfica y topográfica del terreno.

Se cosecharon los surcos centrales de cada franja con cosechadoras equipadas con monitor de rendimiento y GPS excluyendo los bordes de cada una de las franjas, utilizando una metodología similar a la reportada en trabajos previos (Scharf et al., 2005; Pagani y Mallarino, 2012, 2015).

Los mapas de rendimiento generados fueron procesados mediante el programa ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2015) para corregir y eliminar los valores de rendimiento defectuosos. La información de rendimiento generada fue analizada con el mismo software a una escala espacial considerablemente menor a las de las franjas completas con el objetivo de estudiar la variabilidad espacial de la respuesta a N dentro de cada sitio. Por esta razón, las franjas con los tratamientos de N fueron divididas en transectas de 20 m de longitud (Lark, 1997) y se promediaron los puntos de rendimiento de cada transecta para cada dosis de N.

Las transectas fueron agrupadas según categorías (arbitrariamente definidas) o ZM según elevación, CEa y NDVI. Luego se promediaron los rendimientos de cada transecta para cada tratamiento y ZM delineada y se ajustaron curvas de respuesta en función de la dosis de N. El modelo seleccionado fue el cuadrático plateau, según lo sugerido por Cerrato y Blackmer (1990). Utilizando el método de la derivada primera y la relación de precios histórica N:grano de maíz de 10:1, se determinó para cada curva la DOEN de manera similar a lo reportado por Pagani et al. (2008).

Se realizó un análisis para los tres sitios estudiando la variabilidad espacial de los parámetros de la curva de respuesta de N: rendimiento sin el agregado de N, rendimiento a la DOEN, máxima respuesta de N (diferencia entre el rendimiento a la DOEN y el rendimiento sin agregado de N) y la DOEN.

Resultados preliminares

Los tres sitios experimentales presentaron escasa variabilidad topográfica y en los patrones de productividad del cultivo de maíz en campañas anteriores (NDVI promedio de tres cultivos de maíz anteriores) (Tabla 1). Sin embargo, en los tres lotes se observaron niveles moderados a intermedios de variabilidad espacial en la CEa_{90cm}, lo que se relaciona con variaciones a nivel intra-lote en la textura y materia orgánica del suelo (Sudduth et al., 1995).

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de la elevación, conductividad eléctrica aparente a 90 cm (CEa_{90cm}) e índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) promedio de tres campañas de maíz para los tres sitios experimentales.

Sitio	Variable	Elevación	CEa _{90cm}	NDVI
		m	mS m ⁻¹	
1	Media	113.6	11	66
	Mínimo	113.0	7	59
	Máximo	114.0	22	68
	CV*	0.2	31	3
2	Media	113.3	12	53
	Mínimo	112.9	7	47
	Máximo	113.7	18	56
	CV	0.2	22	5
3	Media	118.8	12	65
	Mínimo	118.6	3	87
	Máximo	119.1	22	64
	CV	0.1	26	1

*CV, coeficiente de variación porcentual.

La campaña evaluada se caracterizó por la ocurrencia de precipitaciones superiores al promedio histórico (Figura 1), sobre todo durante estadios vegetativos tempranos y durante el período de llenado de granos. Si bien la campaña fue muy favorable para la obtención de altos

rendimientos de maíz, también se generaron condiciones predisponentes para la ocurrencia de pérdidas de N del sistema a través del lavado y desnitrificación (Havlin et al., 2005), especialmente en las áreas de menor elevación relativa que recibieron agua de zonas más elevadas y estuvieron afectadas por anegamiento durante períodos de tiempo más prolongados (datos no mostrados).

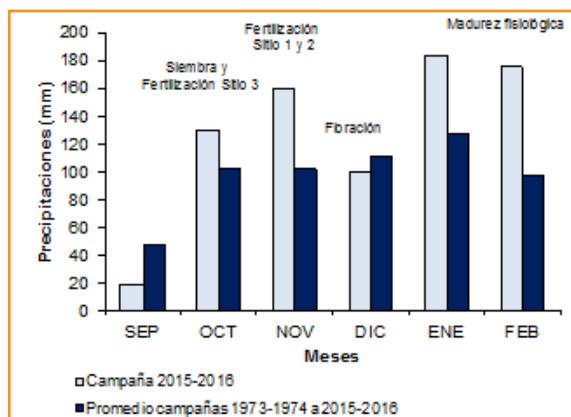


Figura 1. Precipitaciones mensuales acumuladas para la campaña 2015-2016 y para el promedio histórico en el partido de General Villegas. Las flechas verticales indican los momentos de siembra, fertilización nitrogenada, floración y madurez fisiológica del cultivo de maíz en los tres sitios experimentales.

Análisis promedio del sitio

En la Figura 2 se observa la curva de respuesta del rendimiento maíz a la fertilización nitrogenada a través de las franjas que atravesaron todo el lote para los tres sitios. El estudio a nivel de franja es equivalente al uso de información proveniente de tolvas con balanza normalmente utilizadas en agricultura de producción y es importante para demostrar cómo las respuestas promedio pueden parcialmente enmascarar el impacto real de la fertilización en lotes con variabilidad espacial.

Debido a las abundantes precipitaciones ocurridas durante todo el ciclo del cultivo, se alcanzaron altos rendimientos máximos (superiores a 12 500 Kg ha⁻¹ en los tres sitios), pero también se presentaron condiciones predisponentes para la ocurrencia de pérdidas de N del sistema. Esta situación determinó considerables respuestas a la fertilización nitrogenada (la respuesta máxima fue de 1805, 3950 y 2120 Kg ha⁻¹ representando un 17, 41, 21% en el Sitio 1, 2 y 3, respectivamen-

te). En los Sitios 1 y 3 la DOEN fue de 99 y 101 Kg N ha^{-1} , similar a lo encontrado en la zona de General Villegas por Barraco et al., 2015 (107 Kg N ha^{-1} en un promedio de 11 ensayos), mientras que en el Sitio 2 la DOEN fue de 148 kg N ha^{-1} .

Si bien este análisis aporta valiosa información acerca de la respuesta promedio de cada sitio, no tiene en cuenta la distribución espacial del rendimiento, la respuesta de N y la DOEN dentro de cada lote. Por lo tanto a continuación se estudió la respuesta a la fertilización nitrogenada dentro de cada sitio experimental, considerando diferentes criterios de caracterización ambiental.

Análisis por zonas de manejo según elevación

La topografía ha sido frecuentemente utilizada como un criterio en la delineación de ZM (Franzen et al., 2000) debido a su relación con la distribución de partículas orgánicas y minerales (Kravchenko et al., 2005) y con la disponibilidad de agua y nutrientes (Marques da Silva y Alexandre, 2005). En los Sitios 1 y 2, que fueron los de mayor variabilidad topográfica, se observó que el rendimiento del cultivo tendió a disminuir a medida que lo hizo la elevación del terreno (**Figura 3**). Este efecto fue más marcado en los tratamientos testigo, sin el agregado de N o con dosis reducidas. Consecuentemente, la respuesta a N y la DOEN aumentó (aunque en diferente grado dependiendo del sitio) a medida que disminuyó la elevación del terreno.

El NO bonaerense se caracteriza por presentar suelos Hapludoles típicos consociados con Hapludoles thapto-árgicos. Generalmente, estos últimos se encuentran en las zonas más bajas del paisaje y se caracterizan por una menor pro-

ductividad (Prece et al., 2014), ya que presentan un cambio textural abrupto entre el horizonte superficial y el subsuperficial (de textura más fina). Esta característica le confiere una limitante potencial para el crecimiento de la raíz, menor capacidad de almacenamiento de agua útil en años de precipitaciones escasas y condiciones de saturación más severas en años con precipitaciones abundantes como la campaña evaluada. Por esta razón, es probable que el menor rendimiento de los tratamientos testigos sin N en las zonas más bajas del lote (asociadas a Hapludoles thapto-árgicos) se deba a que dichas áreas hayan sufrido mayores pérdidas del N del suelo y del fertilizante por lavado y desnitrificación en un año con precipitaciones muy por encima del promedio histórico.

Análisis por zonas de manejo según conductividad eléctrica aparente

La conductividad CEa también ha sido propuesta como herramienta de caracterización ambiental, ya que está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo (principalmente la textura, MO y contenido de sales) que determinan su fertilidad e influyen sobre el rendimiento de los cultivos (Sudduth et al., 1995; Peralta et al., 2015). La CEa es la medición "in situ" de la capacidad que tiene el suelo para conducir la corriente eléctrica, a través de sondas que actúan en paralelo (Doerge, 1999). Una ventaja importante que posee este método es que los patrones de distribución espacial de la CEa no cambian en el tiempo, por lo que las áreas delimitadas son temporalmente consistentes, aún bajo distintas condiciones de humedad del suelo (Farahani et al., 2007).

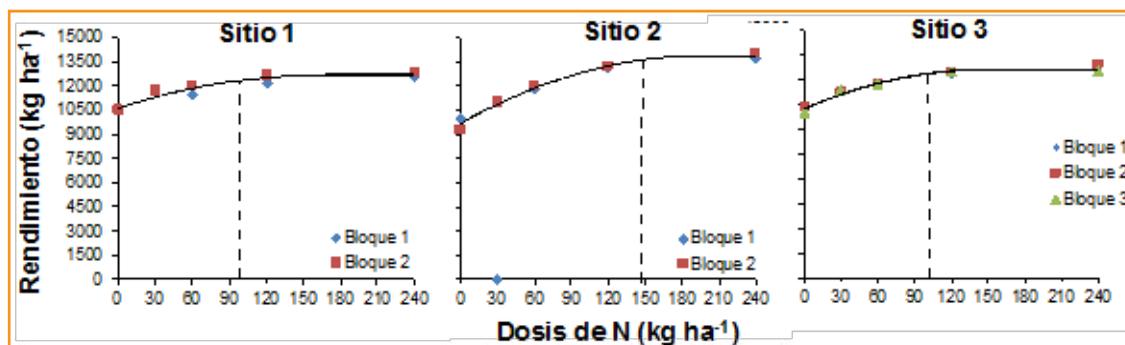


Figura 2. Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicado considerando el promedio de cada franja para los tres sitios experimentales. Las líneas verticales punteadas indican la dosis óptima económica de N.

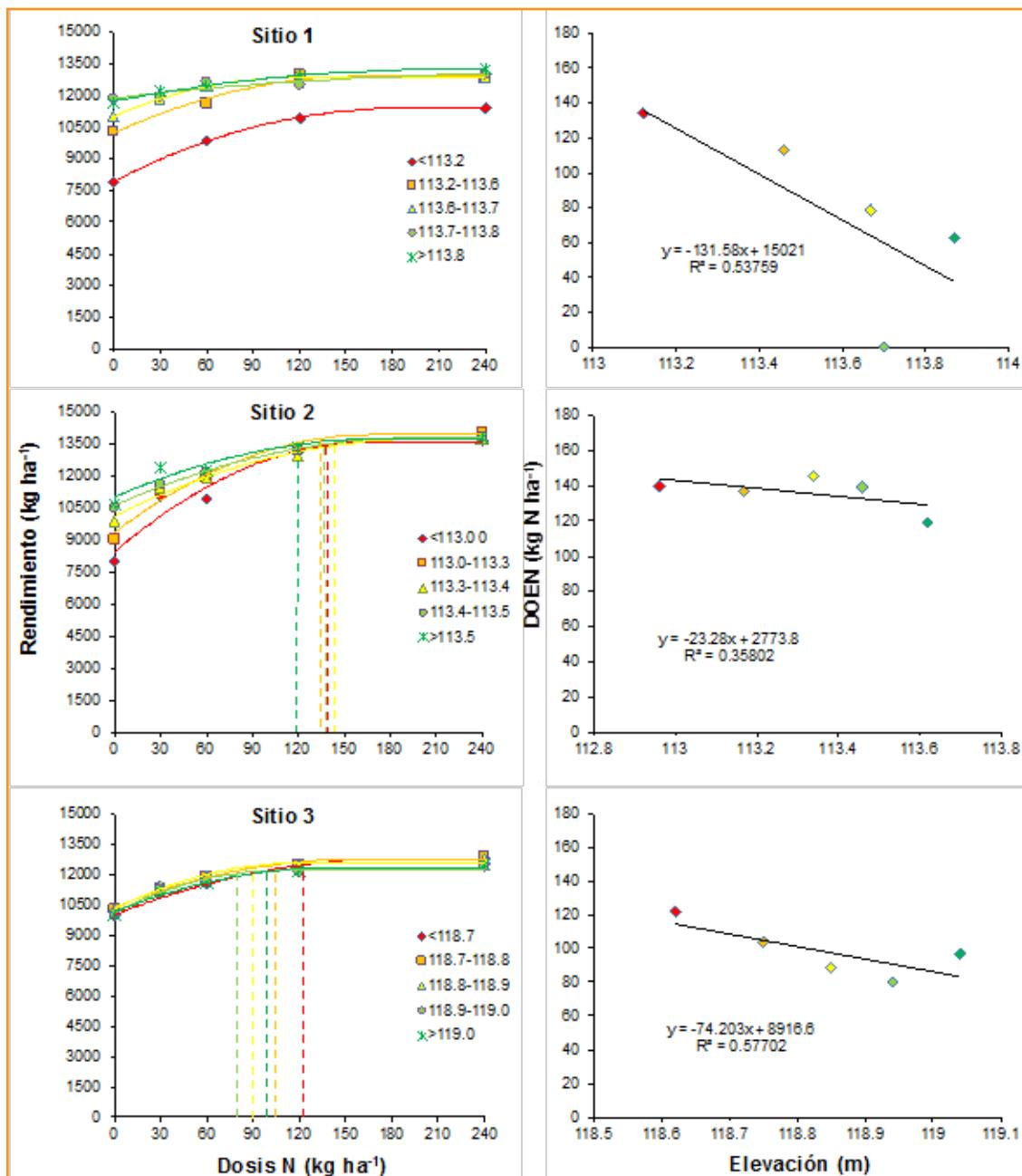


Figura 3. Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicada para cada zona de manejo delineada según la elevación del terreno y dosis óptima económica de N (DOEN) en función de la elevación del terreno para los tres sitios experimentales. Las líneas verticales punteadas indican la DOEN.

En la **Figura 4** se observa que en los Sitios 1 y 2, el rendimiento de maíz tendió a disminuir a medida que aumentó la CEa_{90cm} . Estas disminuciones fueron mayores para los tratamientos testigos y para las menores dosis de N, de manera similar a lo observado para la elevación. En los tres sitios, la respuesta a N y la DOEN aumentaron a medida que lo hizo la CEa_{90cm} (**Figura 4**).

Numerosos estudios sugieren el uso de la

CEa como una herramienta para mapear la presencia y/o profundidad de capas con alto contenido de arcilla como horizontes argílicos o thaptos (Kitchen et al. 2003; Peralta et al., 2015). Elevados valores de CEa_{90cm} se relacionan con la presencia de mayor contenido de arcilla y humedad, posiblemente asociados a Hapludoles thapto-argílicos, sujetos a mayores pérdidas de N del sistema.

Generalmente, suelos con bajos valores de CEa están asociados a mejores condiciones para el crecimiento vegetal (Kitchen et al. 2003; Peralta et al., 2015), sin embargo valores muy bajos de CEa pueden ser perjudiciales ya que están relacionados a bajos valores de MO y reducida retención hídrica (Puntel y Pagani, 2013).

Análisis por zonas de manejo según NDVI de cultivos anteriores

Una alternativa ampliamente difundida para establecer patrones de productividad dentro de un lote es el uso de imágenes multiespectrales ya sea de origen aéreo o satelital (Basso et al., 2001; Bausch y Khoosla, 2010). Las imágenes multiespectrales permiten calcular índices de vegetación que estiman el crecimiento y la pro-

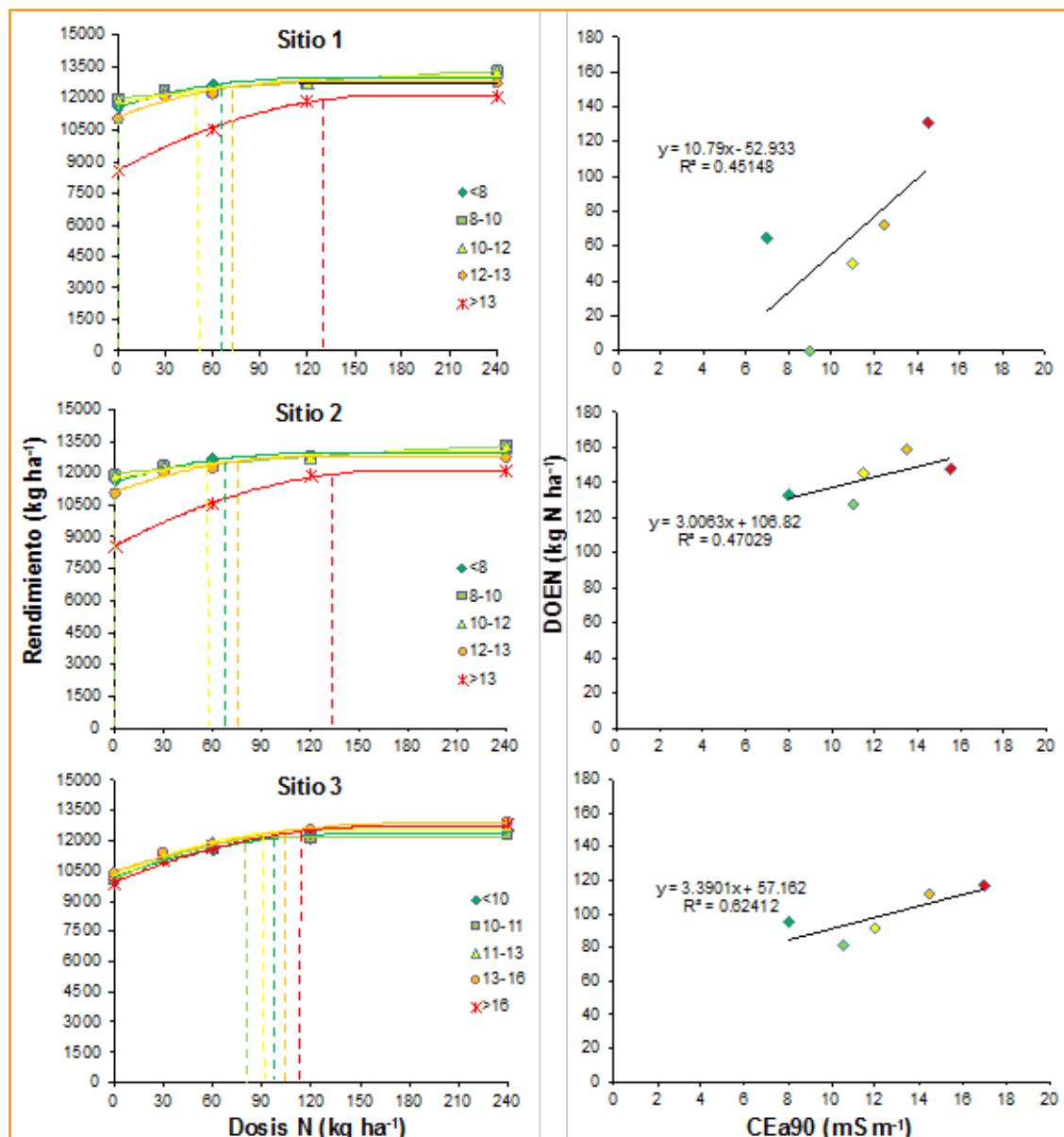


Figura 4. Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicada para cada zona de manejo delineada según conductividad eléctrica aparente a 90 cm de profundidad en mS m⁻¹ (CEa_{90cm}) y dosis óptima económica de N (DOEN) en función de la CEa_{90cm} para los tres sitios experimentales. Las líneas verticales punteadas indican la DOEN.

ductividad de cultivos (Zhang et al., 1999; Rydberg y Soderstrom, 2000). Entre ellos, el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI; Rouse et al., 1973) ha sido el más frecuentemente utilizado. La utilización de imágenes de NDVI obtenidos en etapas críticas durante el ciclo del cultivo ha sido empleado como un método de monitoreo (Quarmby et al., 1993), para la predicción del rendimiento (Lee et al., 2000; Peralta et al., 2016) y para la delimitación de zonas de manejo (Basso et al., 2001; Tremblay et al., 2011).

El rendimiento de maíz tendió a aumentar a medida que lo hizo el NDVI promedio de la ZM. Esta tendencia fue mayor para los Sitios 1 y 2 (que fueron los de mayor variabilidad) y para los tratamientos sin el agregado de N (**Figura 5**). Las zonas dentro del lote con mejores condiciones para el rendimiento de cultivos anteriores se comportaron como escenarios relativamente más favorables para el crecimiento del maíz sin N, evidenciando mejores condiciones de mineralización de N del suelo y de absorción de este

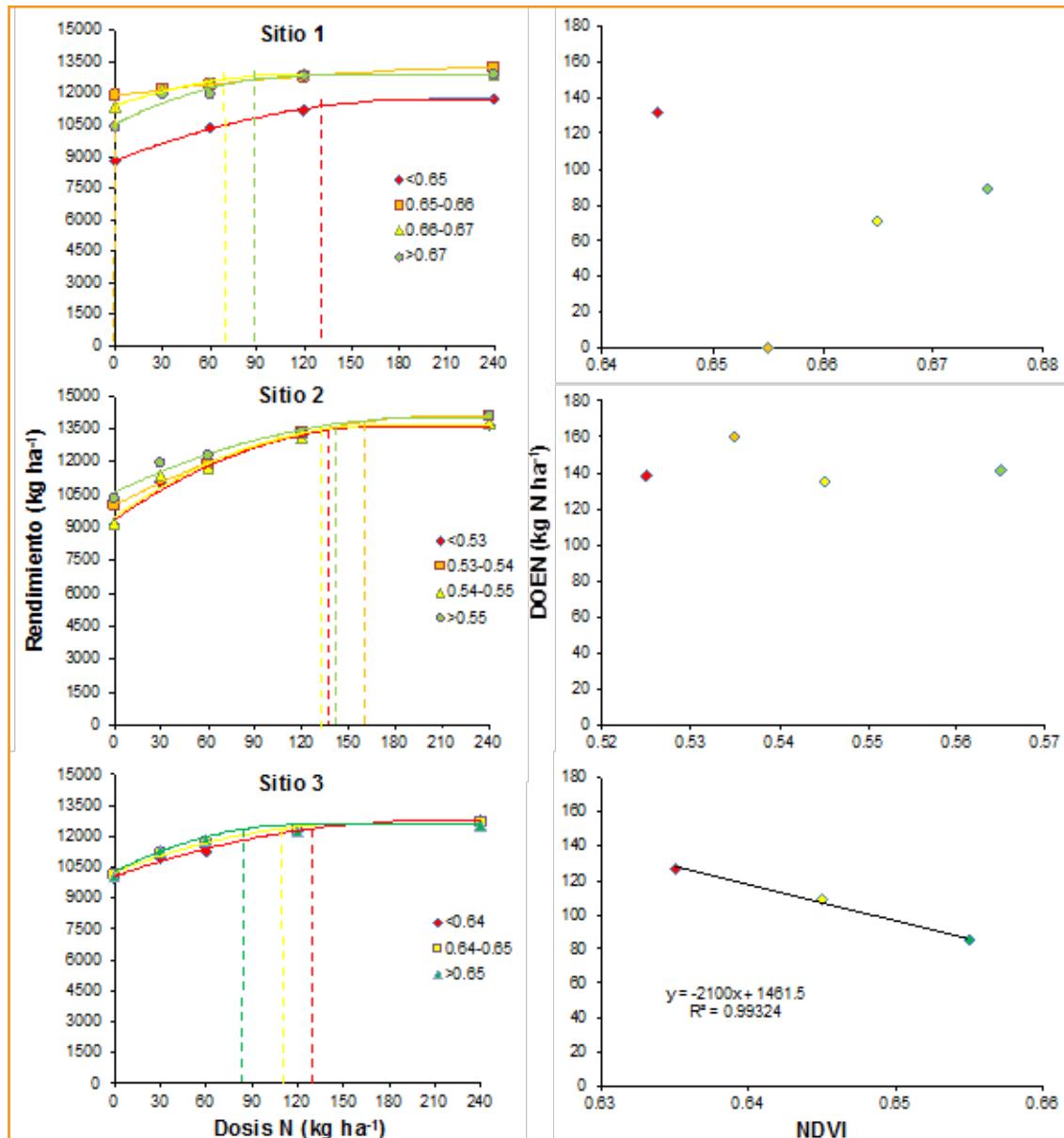


Figura 5. Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicada para cada zona de manejo delimitada según índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) promedio de cultivo de maíz de años anteriores y dosis óptima económica de N (DOEN) en función de la del NDVI para los tres sitios experimentales. Las líneas verticales punteadas indican la DOEN.

nutriente por el cultivo en las zonas de mayor productividad histórica, en concordancia con lo reportado por Jaynes et al. (2011). Sin embargo, la relación entre la DOEN y el NDVI de los cultivos de maíz de campañas anteriores fue inconsistente considerando los tres sitios experimentales (**Figura 5**). Estos resultados sugieren que el uso de imágenes de NDVI de cultivos anteriores como única fuente de información para delinear ZM de N debería ser cuidadosamente revisado en situaciones de moderada a baja variabilidad espacial, como las observadas en este trabajo.

Conclusiones preliminares

Durante la campaña evaluada, que se caracterizó por la ocurrencia de precipitaciones abundantes/excesivas durante gran parte del ciclo de cultivo, se observó que la respuesta a la fertilización nitrogenada fue significativa y de gran magnitud en los tres sitios experimentales. Sin embargo, el análisis a nivel intra-lote mostró variabilidad espacial en el rendimiento del cultivo, la respuesta a N y la DOEN. En general, la respuesta a N y la DOEN tendieron a aumentar a medida que disminuyó la elevación del terreno y aumentó la CEa_{90cm} . Estos resultados pueden interpretarse de manera preliminar, teniendo en cuenta que las zonas de menor elevación relativa y mayor CEa_{90cm} estuvieron asociadas a la presencia de Hapludoles thapto-árgicos, sujetos a mayores pérdidas de N por lavado y desnitrificación durante una campaña de abundantes precipitaciones con respecto a los Hapludoles típicos/énticos de textura más gruesa, ubicados en las zonas más altas del paisaje. El uso de NDVI de cultivos anteriores mostró resultados inconsistentes para separar áreas dentro del lote con respuesta diferencial a la fertilización nitrogenada. Estos resultados sugieren la conveniencia física y económica de la delimitación de ZM de N basadas en elevación y CEa para la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz con dosis variable en el NO bonaerense. Este proyecto continúa mediante la incorporación de nuevos sitios experimentales para poder confirmar los resultados preliminares obtenidos hasta el momento.

Bibliografía

- Anselin, L., R. Bongiovanni, y J. Lowenberg-DeBoer. 2004. A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management and corn production. *Am. J. Agr. Econ.* 86 (3): 675-687.
- Basso, B., J. Ritchie, F. Pierce, R. Braga, y J. Jones. 2001. Spatial validation of crop models for precision agriculture. *Agricultural Systems.* 68:97-112.
- Basso, B., y J.T. Ritchie. 2005. Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan. *Agr. Ecosyst. Environ.* 108: 241-329.
- Bausch, W., y R. Khosla. 2010. QuickBird satellite versus ground-based multi-spectral data for estimating nitrogen status of irrigated maize. *Precis Agric.* 11:274-290.
- Cerrato, M., y A. Blackmer. 1990. Comparison of model for describing; corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82:138-143.
- Derby, N.E., X.M. Francis, X.M.C. Casey, y D.W. Franzen. 2007. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield. *Agron. J.* 99: 405-414.
- Doerge, T.A. 1999. Management Zone Concepts. S.I: Potash & Phosphate Institute. Site-Specific Management Guidelines 2, 4 p.
- ESRI. 2015. ArcGIS Desktop: Release 10, in: ESRI (Ed.), Redlands, CA.
- Farahani, H., y R. Flynn. 2007. Map quality and zone delineation as affected by width of parallel swaths of mobile agricultural sensors. *Biosyst Eng.* 96:151-159.
- Ferguson, R.B., R.M. Lark, y G.P. Slater. 2003. Approaches to management zone definition for use of nitrification inhibitors. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 937-947.
- Franzen, D.W., A.D. Halvorson, y V. L. Hoffman. 2000. Management zones for soil N and P levels in the Northern Great Plains. EN: PC et al. (Ed.) Proc. Int. Conf. on Prec. Agric, 5th Bloomington MN. 16-19 Julio 2000. ASA, CSSA, SSSA. Madison WI.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson. 2005. Soil fertility and fertilizers. 7th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. p. 515.
- Janzen, J.J. 2006. The soil carbon dilemma. Shall we hoard it or use it? *Soil Biol. Biochem.* 38: 419-424.
- Jaynes, D.B., T.C. Kaspar, y T.S. Colvin. 2011. Economically optimal nitrogen rates of corn: management zones delineated from soil and terrain attributes. *Agron. J.* 103: 1026-1035.
- Kitchen, N.R., S.T. Drummond, E.D. Lund, K.A. Sudduth, y G.W. Buchleiter. 2003. Soil Electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agron J.* 95:483-495.
- Kravchenko, A.N., G.P. Robertson, K.D. Thelen y R.R. Harwood. 2005. Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. *Agron. J.* 97: 514-523.
- Lark, R.M., J.V. Stafford, y H.C. Bolam. 1997. Limitations on the spatial resolution of yield mapping for combi-

- nable crops. *J. Agric. Eng. Res.* 66:183-193.
- Lund, D.L., P.E. Colin, D. Christy, y P.E. Drummond. 1999. Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. EN: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E. (Ed). *Precision Agriculture*. Madison: ASA-CSSA-SSSA. pp.1089-1100.
- 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.
- Marques da Silva, J.R., y C. Alexandre. 2005. Spatial variability of irrigated corn yield in relation to field topography and soil chemical characteristics. *Precis. Agric.* 6: 453-466.
- Pagani, A., H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas, y P.A. Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo.* 26(2): 183-193.
- Pagani, A., y A.P. Mallarino. 2012. Comparison of methods to determine crop lime requirement under field conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76: 1855-1866.
- 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.
- Pautasso, J.M., S. Albarenque, G. Schulz, A. Kemerer, D. Bedendo, y R. Melchiori. 2010. Delimitación de zonas de manejo mediante variables de suelo y validación para maíz. EN: INTA, EEA Manfredi. 9° Curso internacional de Agricultura de precisión, 4° Expo de maquinarias precisas, 2° Gira tecnológica de precisión. Manfredi: Ediciones INTA. pp. 207-214.
- Pedrol, H., J. Castellarín, y F. Salvagiotti. 2004. Sustentabilidad y diversificación de riesgos productivos: importancia del maíz en la rotación de cultivos. *IDIA XXI* 4(6): 141-146.
- Peralta, N.R., J.L. Costa, M. Balzarini, y H. Angelini. 2013. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Can. J. Soil Sci.* 93:205-218.
- Peralta, N.R., J.L. Costa, M. Balzarini, M. Castro Franco, M. Córdoba, y D. Bullock. 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. *Comput Electron Agric.* 110:103-113.
- Pierce, F.J., y P. Nowak. 1999. Aspects of precision agriculture. En: Spark, D. (Ed) *Advances in Agronomy*. San Diego: Academic Press. 67: 1-85.
- Prece, N., C. Álvarez, y L. Ferreras. 2014. Productividad y fertilidad en el cultivo de maíz en suelos con diferente aptitud productiva den noroeste bonaerense. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Bahía Blanca, CD.
- Puntel, L., y A. Pagani. 2013. Site-specific analysis of maize yield response to nitrogen in Argentina. *ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings Madison, Wis:* 1 p.
- Quarmby, N., M. Milnes, T. Hindle, y N. Silleos. 1993. The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *Int J Remote Sens.* 14:199-210.
- Robertson, G.P., E.A. Paul, y R.R. Harwood. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289: 1922-1925.
- Rouse Jr, J.W., R. Haas, J. Schell, y D. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium:*309-317.
- Rydberg, A., y M. Söderström. 2000. Potential crop growth assessment from remotely sensed images compared to ordinary yield maps, *The 5th International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, Minn. USA.
- Sambroski, S.M., N. Tremblay, y E. Fallon. 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agron. J.* 101: 800-816
- 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: 452-461.
- Sudduth, K.A., N.R. Kitchen, D.F. Hughes, y S.T. Drummond. 1995. Electromagnetic induction sensing as an indicator of productivity on claypan soils, *Site-Specific Management for Agricultural Systems*, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. pp. 671-681.
- Tremblay, N., E. Fallon, y N. Ziadi. 2011. Sensing of crop nitrogen status: Opportunities, tools, limitations, and supporting information requirements. *HortTechnology.* 21:274-281.
- Zhang, M., P. Hendley, D. Drost, M. O'Neill, y S. Ustin. 1999. Corn and soybean yield indicators using remotely sensed vegetation index. *Precis Agric.* 1475-1481. ●

Respuesta a la fertilización con nitrógeno según cultivos invernales previos en una secuencia maíz tardío-trigo

E. Kehoe¹, Agosti², J.M. Enrico¹, G. Prieto¹ y F. Salvagiotti¹

¹EEA INTA Oliveros, ²GTD Chacra Pergamino-Aapresid.

Contacto: kehoe.esteban@inta.gob.ar, mbagosti@agro.uba.ar, enrico.juan@inta.gob.ar, salvagiotti.fernando@inta.gob.ar.

Introducción

La superficie implantada en Argentina con trigo (*Triticum aestivum*) y maíz (*Zea mays*) en la campaña 2015-16 representó el 73% del total de cereales, 29% de todos los cultivos sembrados en el país, y 40% del volumen total de producción nacional de granos y oleaginosas (MINAGRI). En la actual campaña 2016/17, la superficie se incrementó notablemente consecuencia de medidas políticas respecto al mercado de estos cereales, sumado a expectativas de precios y relaciones insumo:producto más favorables.

La intensificación sustentable de los sistemas de producción busca entre otros objetivos un uso sustentable del suelo, a través del mejor uso de los recursos agua y nutrientes (Caviglia y Andrade, 2010). Dentro de las alternativas para alcanzar estos objetivos, se busca incrementar la frecuencia de gramíneas en las secuencias agrícolas con el fin de mejorar los balances de carbono del sistema, mejorar la fertilidad físico-química del suelo y modificar la dinámica de las malezas entre otros efectos. En la región pampeana, una propuesta es incluir el trigo posterior a la cosecha de maíces de siembra tardía. Esta secuencia presentará un fuerte déficit de nitrógeno y el éxito productivo de la misma dependerá del manejo que se realice de la fertilización nitrogenada.

Desde el punto de vista del manejo del sistema, los cultivos incluidos previo a la implantación de la secuencia maíz-trigo van a generar un impacto diferente en la dinámica del N en la secuencia, y por ende en la respuesta a la fertilización nitrogenada en los cultivos de maíz y trigo siguientes. La inclusión de cultivos de cobertura (CC) o de cosecha en el invierno figuran entre estas alternativas, por ejemplo CC como gramíneas de invierno o leguminosas (e.g. *Vicia villosa*) o cultivos de grano como el trigo, la cebada (*Hordeum vulgare*), la arveja (*Pisum Sativum*) o la lenteja (*Lens culinari*). Cada uno de estos cultivos afectará de manera diferente la dinámica del nitrógeno (N) en el

sistema, en especial si se incluyen leguminosas, dado su aporte a través de la FBN, el bajo índice de cosecha de N comparado con leguminosas estivales y la baja relación C:N que acelera el balance inmovilización-mineralización del N de los residuos (Salvagiotti et al, 2016).

Los objetivos del presente trabajo fueron evaluar la respuesta a la fertilización nitrogenada de los cultivos de la secuencia maíz tardío y trigo posterior implantados sobre distintos cultivos invernales previos.

Materiales y Métodos

Características generales

Se realizaron dos ensayos de fertilización nitrogenada en maíz de siembra tardía y trigo posterior en un campo de producción de la localidad Uraga (33° 16' Lat S y 60° 39' Long O), departamento Rosario, sobre un suelo Argiudol típico Serie Peyrano durante las campañas 2015/16 (maíz) - 2016/17 (trigo) implantados en siembra directa. En el invierno de 2015, previo al maíz de siembra tardía se implantaron cuatro alternativas de cultivos invernales: vicia, arveja, trigo y barbecho sin cultivo. En el cultivo de maíz posterior se instaló el ensayo de fertilización nitrogenada, que incluyó cinco niveles de N: 0, 30, 60, 120, y 180 kg N ha⁻¹. Se dejó una superficie dentro de cada antecesor invernal sin fertilizar, en donde en la campaña siguiente se implantó un experimento de fertilización nitrogenada en trigo, donde también se evaluaron cinco niveles de N: 0, 60, 120, 180 y 240 kg N ha⁻¹. En todos los casos la fuente de N fue urea (46-0-0) recubierta con inhibidor para ureasa (n-BTPT). En el caso de la vicia, se detuvo el crecimiento químicamente en plena floración (1/11/15). Ambos experimentos fueron ubicados en un diseño completamente aleatorizados con tres repeticiones. El maíz y el trigo fueron fertilizados con 50 y 103 kg por ha de fosfato monoamónico (11-23-0). El manejo de los distintos cultivos de la secuencia puede observarse en la **Tabla 1**.

Análisis de la información

En cada cultivo se analizó los efectos del antecesor y la adición de N a través del programa estadístico Infostat. Cuando el efecto de la fertilización nitrogenada fue significativo, se realizaron curvas de respuesta, ajustando la relación N aplicado: rendimiento a una función esférica, la cual describe tres parámetros (**Ec. 1**): rendimiento en ausencia de fertilización (a), diferencial entre rendimiento máximo y mínimo (b) y dosis de N para lograr el máximo rendimiento (c),

$$y = a + b \left[\left(\frac{3X}{2c} \right) - \left(\frac{1}{2} \left(\frac{X}{c} \right)^3 \right) \right] \text{ si } X < c \quad \text{Ec. 1}$$

$$y = a + b \text{ si } X > c$$

Se utilizó la primer derivada de esta curva para ajustar la dosis optima económica (DOE) en donde se obtiene el máximo retorno económico neto para tres relaciones de precio fertilizante y precio de grano (u\$s N u\$s grano⁻¹): en maíz 20:1, 10:1 y 5:1, y para trigo 12:1, 8:1 y 4:1. El ingreso bruto se calculó por el producto de dosis de N, precio neto del grano y eficiencia del uso de N (kg grano kg fertilizante⁻¹) (Salviotti et al., 2011).

Resultados y discusión

Respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz según antecesores

No se encontraron diferencias significativas en rendimiento de maíces tardíos entre niveles de N para los antecesores vicia, arveja y barbecho (P>0.70). Solo el antecesor trigo mostró respuesta significativa a la adición de N (P<0.01) (**Tabla 2**). Analizando esta respuesta a través de la ecuación esférica, se pudo estimar que la máxima producción se obtendría

con la adición de 190 unidades de N (parámetro c en la ecuación) y la máxima respuesta sería de 8489 kg de grano por ha (parámetro b). Esta alta respuesta del cultivo de maíz cuando el antecesor fue trigo puede deberse entre otros factores a la alta extracción de N del cereal invernal, que deja el perfil con bajos niveles del nutriente o a la mayor inmovilización de N que hacen los residuos del trigo. Bajo estas condiciones, la DOE fue de 106, 100 y 92 kg N ha⁻¹ respectivamente para una relación 5:1, 10:1 y 20:1 de del precio fertilizante respecto al cereal.

La disponibilidad de agua en los primeros estadios fenológicos del cultivo estival habría afectado el rendimiento del maíz dado a que los máximos niveles de N aplicados al antecesor trigo no igualan el rendimiento de todas las rotaciones. Las condiciones de disponibilidad hídrica son diferentes cuando el antecesor fue vicia, arveja o con un barbecho largo permitiendo mayor tiempo recarga del perfil (i.e. momento de secado del CC, la cosecha más temprana de la arveja).

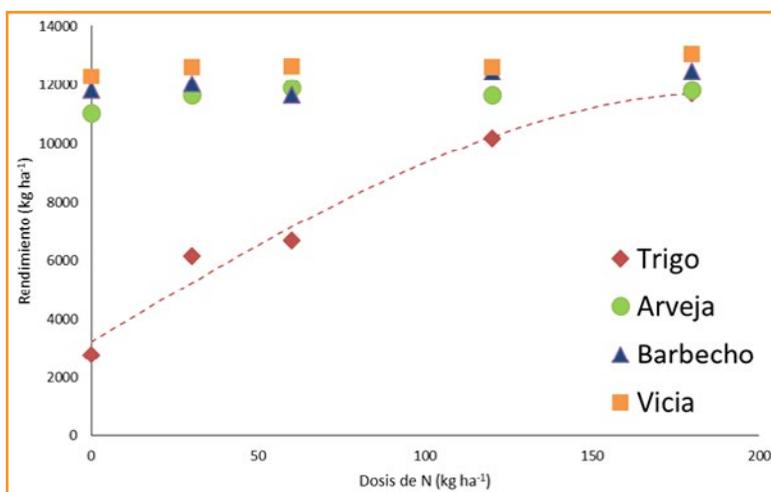


Figura 1. Rendimiento de maíz (kg ha⁻¹) en respuesta a niveles de fertilización nitrogenada sobre cuatro antecesores. La línea punteada muestra el ajuste de la ecuación esférica $y = 3232 + 8489 \left[\left(\frac{3X}{2 \cdot 189} \right) - \left(\frac{1}{2} \left(\frac{X}{189} \right)^3 \right) \right]$ si $X < 189$; $y = 11721$ si $X > 189$ $r^2 = 0.98$.

Tabla 1. Manejo agronómico de los cultivos antecesores invernales, maíz y trigo.

	Fecha siembra	Genotipo	Espaciamiento	Densidad (pl m ²)
Vicia	22/5/2015	V. villosa	0.175	50
Trigo	9/6/2015	B601	0.21	270
Arveja	14/7/2015	Facon	0.175	80
Maíz (2015-16)	15/12/2015	Dk7210	0.52	7
Trigo (2016-17)	10/08/2016	Cronox	0.20	400

Respuesta a la fertilización nitrogenada en trigo según antecesores invernales previo al maíz

A diferencia de lo ocurrido en maíz, se observó respuesta significativa a todos los antecesores invernales a la aplicación de N ($P < 0.01$) (**Tabla 2**). En los tratamientos testigo, se observan diferencias significativas entre los antecesores (parámetro a), con rendimiento mínimo en trigo 1103 kg ha⁻¹, seguido de arveja y barbecho 1393, 1539 kg ha⁻¹ y máximo en vicia 1961 kg ha⁻¹. La magnitud de la respuesta a la fertilización (parámetro b) fue: 2919, 2654, 2612 y 2165 kg ha⁻¹, para trigo, arveja, barbecho y vicia respectivamente.

Analizando el parámetro c de la función esférica se puede comparar la dosis de N para alcanzar el máximo rendimiento en cada antecesor, variando desde 208 kg N ha⁻¹ en vicia, 217 kg N ha⁻¹ en arveja, 250 kg N ha⁻¹ en barbecho y 308 kg N ha⁻¹ sobre antecesor trigo. El mayor contraste se observa comparando a este último que requiere 100 kg ha⁻¹ N más para la misma productividad que sobre antecesor vicia.

Al analizar la DOE, siguiendo esta tendencia se observa que se requieren 84, 92, 100 y 116 kg N ha⁻¹ cuando los antecesores fueron respectivamente vicia, arveja, barbecho y trigo (u\$N u\$s grano⁻¹, 8:1).

Tabla 2. Probabilidad estadísticas del efecto de la fertilización nitrogenada según cultivo invernal antecesor en una secuencia maíz-trigo.

	Cultivo Antecesor invernal			
	Vicia	Trigo	Arveja	Barbecho
Maíz	0,70	< 0,01	0,84	0,93
Trigo	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Conclusiones

En las condiciones evaluadas, en maíz de siembra tardía solo se observaron diferencias significativas en el rendimiento cuando el antecesor fue trigo, demandando dosis de N de hasta 190 kg N ha⁻¹ para igualar el rendimiento de los otros antecesores. Esto abre la posibilidad de realizar siembras tardías de maíz sobre barbecho o leguminosas invernales (arveja o vicia) con baja fertilización nitrogenada según la disponibilidad de N del suelo.

En el caso de trigo sembrado sobre este maíz, se observaron respuestas a la fertilización nitrogenada sobre todos los antecesores, con efectos residuales de la vicia, pero que no alcanzaron para alcanzar la máxima producción.

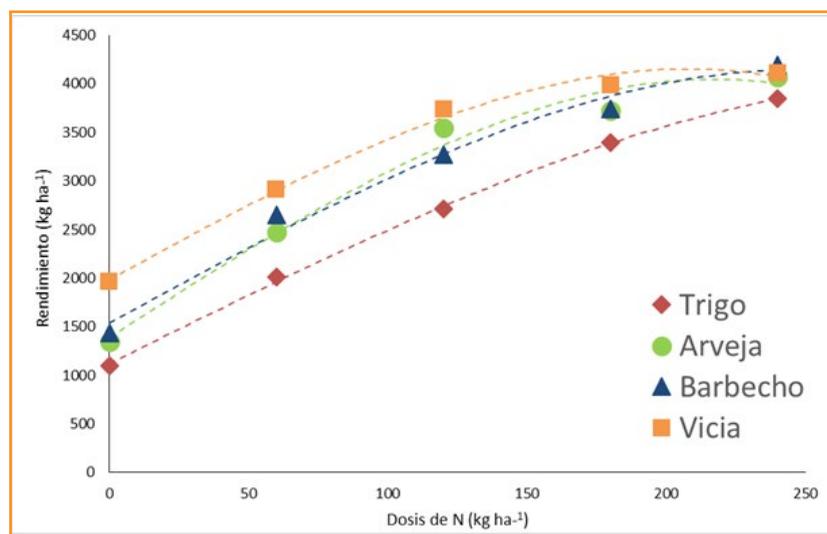


Figura 2. Rendimiento de trigo (kg ha⁻¹) en respuesta a niveles de fertilización nitrogenada sobre cuatro antecesores el año previo.

Arveja $y = 1393 + 2654 [(3 X/2 217) - (1/2 (X/217)^3)]$ si $X < 217$; $y = 4048$ si $X > 217$ $r^2 = 0,98$
 Barbecho $y = 1539 + 2612 [(3 X/2 250) - (1/2 (X/250)^3)]$ si $X < 250$; $y = 4151$ si $X > 250$ $r^2 = 0,99$
 Trigo $y = 1122 + 2919 [(3 X/2 308) - (1/2 (X/308)^3)]$ si $X < 308$; $y = 4041$ si $X > 308$ $r^2 = 0,99$
 Vicia $y = 1988 + 2165 [(3 X/2 208) - (1/2 (X/208)^3)]$ si $X < 208$; $y = 4154$ si $X > 208$ $r^2 = 0,99$

Estos resultados muestran que el manejo de N es central, en especial en secuencias que incluyen una mayor proporción de gramíneas. La inclusión de leguminosas, ya sea para cosecha o como cultivo de cobertura, pueden amenguar este fuerte déficit y ser una herramienta más en la planificación de una intensificación sustentable de sistema.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado en conjunto por el proyecto PNCYO 1127033 (INTA) y la Chacra Pergamino de AAPRESID.

Bibliografía

- Caviglia, O.P., y F. Andrade. 2010. Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and Use Efficiency of Environmental Resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3[1], 1-8.
- Salvagiotti, F., J.M. Castellarin, F.J. Ferraguti, y H.M. Pedrol. 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29[2], 199-212.
- Salvagiotti, F., J.M. Enrico, M. Barraco, G. Prieto, y M.B. Agosti. 2016. Componentes de la eficiencia de N en maíz de siembra tardía con diferentes antecesores. *Actas XXV Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. Rio Cuarto. AACs.* ●

Intensificación + Nutrición = Eficiencia de uso de recursos + Productividad

Andrés Madias^{1,*}, Tomas A. Coyos¹, Leandro Ventroni¹, María B. Agosti¹, Ignacio Alzueta¹, Alejo Ruiz¹ y Rodolfo C. Gil²

¹Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), ²Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

*Contacto: madias@AAPRESID.org.ar

Introducción

En las próximas décadas se espera un incremento en la demanda global de alimentos, fibras y energía. Esta necesidad debe ser cubierta preservando los recursos naturales, entre ellos la salud del suelo, para lo cual se requiere fundamentalmente capturar más radiación, secuestrar más carbono y hacer el uso más eficiente posible del agua y los nutrientes.

Agronómicamente este requisito se podría alcanzar a través de una mayor intensificación temporal y espacial de cultivos, rotación de gramíneas con leguminosas y un manejo nutricional adecuado en tiempo y forma.

En los últimos años, desde el Programa Sistema Chacras (convenio INTA-AAPRESID), se viene trabajando en el desarrollo de estas estrategias ajustándolas localmente en función de las condiciones ambientales.

El objetivo del trabajo es conocer el impacto que genera la intensificación agrícola y la nutrición de los sistemas en diferentes ambientes de la Pampa Húmeda sobre: i) el rendimiento y su estabilidad, ii) la eficiencia de uso del agua, iii) y el aporte de carbono.

Materiales y métodos

El Programa Sistema Chacras (SC) fue creado para responder a las demandas tecnológicas del productor a través del desarrollo y ajuste de tecnologías adaptadas a su ambiente y sistema de producción. La acción de SC se sustenta en el "protagonismo horizontal" de sus actores: productor, ciencia y empresa; articulando dentro de una estructura conformada por un Grupo de Productores, un Gerente Técnico de Desarrollo, una Mesa de Expertos (ME), y una Coordinación del Programa SC. Una Chacra no es un espacio físico sino un método de trabajo cuyos miembros fundadores comparten: las características del ambiente y sistema de producción, el problema y los objetivos comunes.

Dentro del Programa, las Chacras Pergamino, Bragado-Chivilcoy y Justiniano Posse están trabajando en el ajuste de la intensificación y rotación de cultivos para mejorar la eficiencia de uso del agua y los nutrientes, y así la productividad de los sistemas.

A la hora de diseñar la estrategia para intensificar, el primer paso consiste en conocer el comportamiento del ambiente productivo a

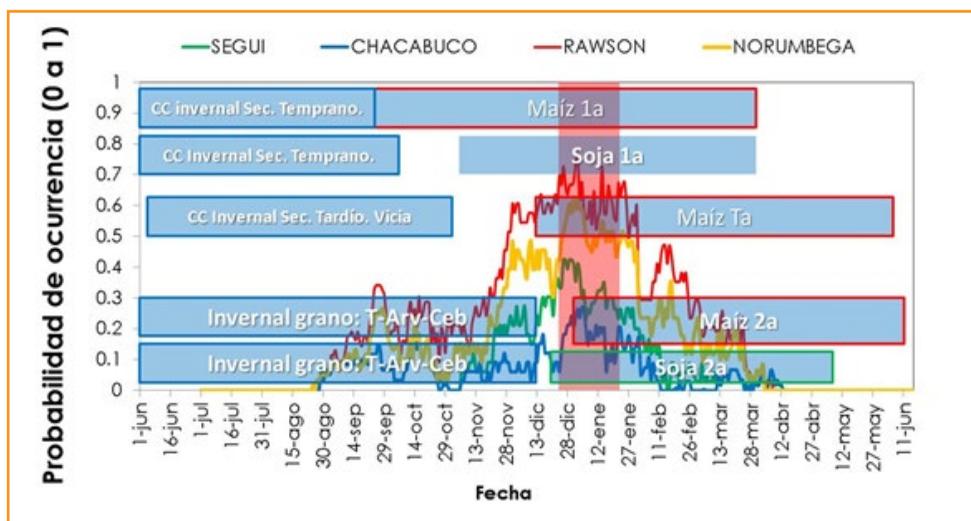


Figura 1. Probabilidad de ocurrencia de estrés hídrico para diferentes ambientes de la Chacra Bragado-Chivilcoy. Fuente: Peralta et al. (2014).

partir de la relación entre las características del clima y de los suelos, y su interacción con los cultivos. Esto permite definir ventanas óptimas y de riesgo para los cultivos, y así poder diseñar secuencias de cultivos o estrategias de manejo que se adapten de la mejor manera posible a la oferta ambiental (**Figura 1**).

La Chacra Pergamino centra su atención en la intensificación para mejorar la productividad y estabilidad del sistema y la salud del suelo. La Chacra Bragado-Chivilcoy trabaja en acortar las brechas de producción de los principales cultivos abordando las causas que las producen. Por otra parte la Chacra Justiniano Posse, ante la problemática zonal del ascenso de napas, puso su objetivo en las estrategias que permitan aumentar el consumo de agua a nivel de sistema y en incrementar la eficiencia de uso del nitrógeno.

Resultados

Chacra Pergamino

La intensificación de las rotaciones agrícolas se relacionó positivamente con un incremento la eficiencia de captura del agua, es decir que cuanto más tiempo permaneció en suelo con un cultivo vivo se consumió una mayor proporción del agua disponible a lo largo del período analizado (**Figura 2**). Cavilgia et al (2012) observaron similares resultados respecto al aumento de la eficiencia en la captura del agua al incrementar el tiempo de ocupación de una secuencia de cultivos.

El aporte de Carbono (C) de las rotaciones se relacionó positivamente con el aumento en la intensificación de las mismas (**Figura 3a**) y la vez se vio la importancia de balancear el aporte de C y N dentro de las rotaciones, ya que aquellas en donde el 100% de los cultivos fueron gramíneas no fueron las que mayores aportes de carbono a causa de los , bajos rendimientos debidos al déficit de N que mostraron los cultivos en estas rotaciones (datos no mostrados). Lograr secuencias de cultivos que mejoren los aportes de C es de suma importancia ya que este es uno de los precursores de la Materia Orgánica (MO), componente del suelo estrechamente relacionado a su fertilidad química y física.

Por otra parte los mayores aportes de carbono totales generados luego de 4 campañas se relacionaron positivamente con el rendimiento total logrado en

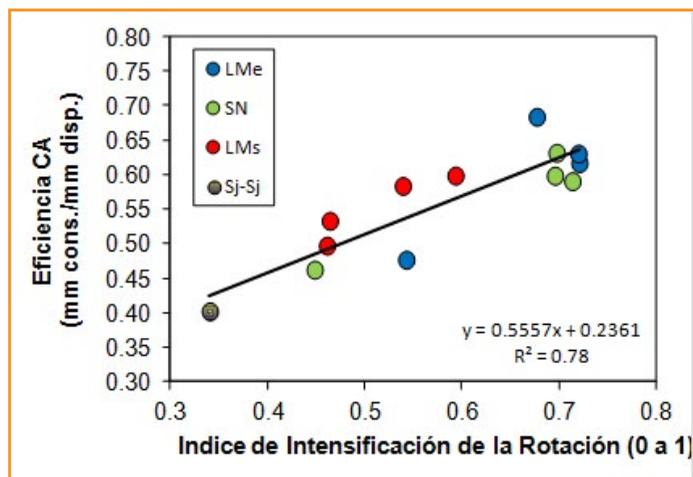


Figura 2. Relación entre Índice de Intensificación de la Rotación y la eficiencia de captura del agua en cada secuencia entre las campañas 2012/13 y 2015/16. Fuente: Madias et al. (2017).

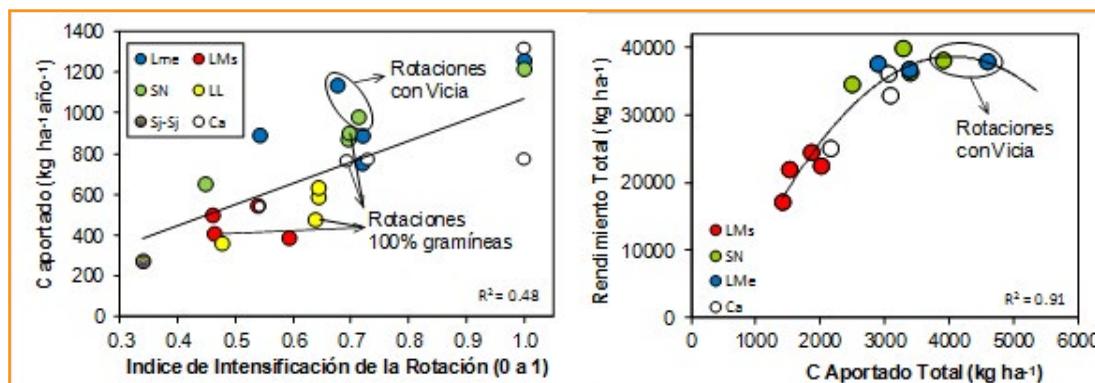


Figura 3. Izquierda: Relación entre índice de intensificación de la rotación (0 a 1) y C aportado. Los datos con Índice de Intensificación de 1 corresponden a pasturas perennes; b) Relación entre el C aportado total y el Rendimiento total luego de 4 campañas. Fuente: Agosti et al. (2016).

el mismo período y fueron las rotaciones más intensas y en las que se alternaron gramíneas y leguminosas donde se alcanzaron los mayores niveles de rendimiento totales (**Figura 3b**). Se destaca también que las dos rotaciones agrícolas con mayores aportes de carbono incluyeron Vicia villosa de cobertura y que estas lograron similares rendimientos totales que otras rotaciones intensas en donde todos los cultivos son de cosecha; aquí pudimos ver, entre otros, el beneficio del aporte de nitrógeno biológico de la Vicia al sistema y su impacto sobre el resultado global.

Al trabajar en estos sistemas intensificados han surgido nuevos interrogantes. Entre ellos sobre como ajustar la nutrición del maíz en función del antecesor invernal para potenciar la producción y ser eficientes en el uso del nitrógeno en nuestro sistema, ya que se hipotetiza que si el antecesor invernal es un cultivo de leguminosa estamos sobrefertilizando los maíces con los modelos de fertilización nitrogenada utilizados a escala de producción; y caso contrario si antecesor es una gramínea, en donde pensamos que estamos exponiendo al maíz a una situación de déficit de N.

Chacra Bragado-Chivilcoy

Dentro de una misma secuencia de cultivo se han evaluado tratamientos de Tecnología del

Productor (TP), con el manejo promedio de los productores, y Tecnología Ajustada (TA), con la mejor tecnología disponible. Las mayores diferencias entre tratamientos radicarón en que bajo TA los niveles de fertilización con N y P fueron superiores que bajo TP, y además se complementó con aplicaciones de azufre, calcio y zinc. Los cultivos de maíz, trigo y soja de segunda bajo TA superaron a los mismos cultivos bajo TP en 1020, 610 y 270 kg ha⁻¹, respectivamente (**Figura 4**). Estos resultados nos muestran que el ajuste de la nutrición del sistema es una de las herramientas que disponemos para acortar las brechas de producción y aumentar la productividad de nuestros sistemas.

El modelo de fertilización en maíz que predomina en la zona consiste en buscar alcanzar 150 kg N ha⁻¹, entre el N disponible a la siembra del cultivo en el estrato 0-60 cm y el N aplicado con el fertilizante. Los resultados del análisis de casos, para ambientes con suelos Argiudoles, nos mostraron que el más del 70% de los lotes que tuvieron rendimientos superiores al promedio de la campaña tuvieron N logrado superior a 150 kg ha⁻¹ (**Figura 5**), lo que nos da indicios que el modelo predominante de fertilización en la zona no está alcanzando a cubrir las necesidades de nutrición nitrogenada de un maíz que pretenda no estar limitado en su rendimiento por dicho nutriente.

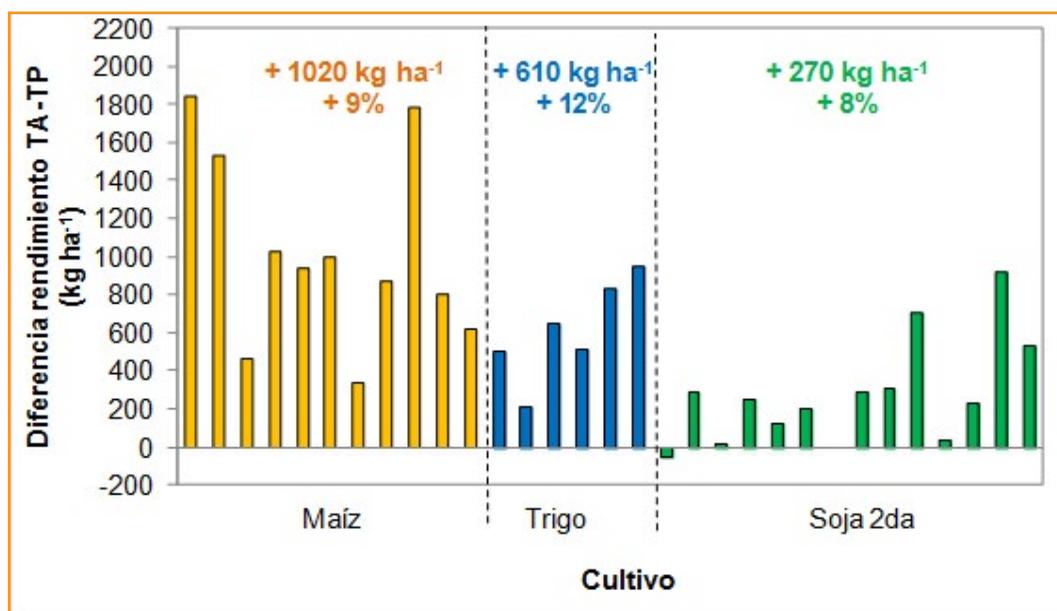


Figura 4. Diferencia de rendimiento (kg ha⁻¹) entre los tratamientos de Tecnología Ajusta (TA) y Tecnología del Productor (TP) para los cultivos de maíz, trigo y soja de segunda durante las campañas 2014/15 y 2015/16. Fuente: Alzueta et al. (2016 a).

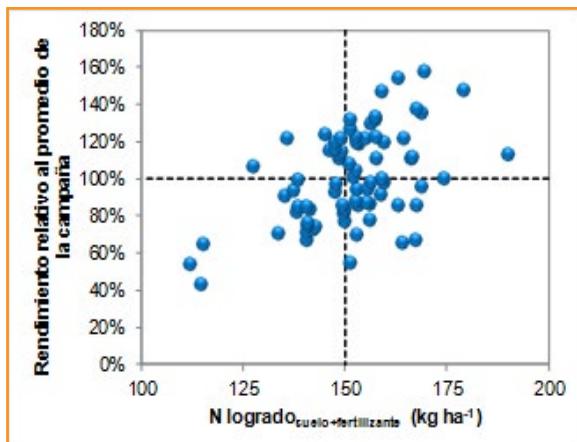


Figura 5. Relación entre N logrado (kg ha^{-1}) y rendimiento relativo al promedio de la campaña para lotes con suelos Argiudoles ($n=77$). Campañas 2011/12 a 2014/15. Fuente: Alzueta et al. (2015).

Comparando el rendimiento de maíz para dos empresas con manejos contrastantes en lo que refiere a intensificación de las rotaciones y estrategias nutricionales (**Tabla 1**), se observó que la intensificación agrícola ajustada para cada ambiente pero combinada con una nutrición balanceada son dos herramientas que contribuyen a acortar las brechas dentro del sistemas de producción a la vez de estabilizar la producción entre campañas (**Figura 6**). Mediante el manejo aplicado por la Empresa 1 durante las últimas 5 campañas se ha logrado en promedio c.a 2600 kg ha^{-1} más de rendimiento con una menor variabilidad entre campañas, 7% y 18% de variabilidad para las empresas 1 y 2, respectivamente. El efecto de la intensificación sobre la estabilidad se vio especialmente en las campañas más restrictivas hídricamente (e.g. Campaña 2011/12).

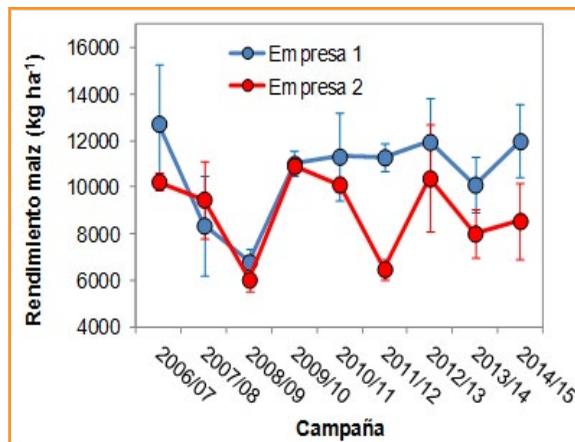


Figura 6. Rendimiento promedio (kg ha^{-1}) para las campañas 2006/07 a 2014/15 para dos empresas ubicadas en la misma zona de producción en la Chacra Bragado-Chivilcoy. Los bigotes indican el desvío estándar. Fuente: Alzueta et al. (2016 b).

Chacra Justiniano Posse

La intensificación demostró ser un camino efectivo para utilizar más y con mayor eficiencia el agua. Al analizar las eficiencias de captura de cada rotación (**Tabla 2**), las mismas variaron entre 0.89 y 0.64 $\text{mm consumidos mm disponibles}^{-1}$, estando asociados al nivel de intensificación. El menor valor fue obtenido en la rotación Tg/Sj-Mz-Sj debido a la ocurrencia de dos períodos de barbecho, en los que las precipitaciones no son consumidas por cultivos. Si se lo compara con un cultivo de soja más del 50% del agua de las lluvias no fue aprovechada, perdiéndose por evaporación o drenaje profundo hacia las napas.

Tabla 1. Estrategias de manejo de rotaciones y nutrición para dos empresas ubicada en la misma zona de producción dentro de la Chacra Bragado-Chivilcoy. Fuente: Adaptado de Alzueta et al. (2016 b).

	Empresa 1	Empresa 2
Rotación	Maíz-Trigo/Soja ^{2a}	a) Maíz-Soja1a-Trigo/Soja ^{2a} b) Soja-Maíz
N objetivo en maíz	180 - Nsuelo 0-60	150 - Nsuelo 0-60
P objetivo en maíz	Reposición (según R objetivo) + Enriquecimiento	18-20ppm
MO lotes (%)	3.95	3.6
P lotes (ppm)	19	11

Tabla 2. Eficiencia de captura y productividad del agua por rotación. Fuente: Ruiz y Coyos (2016).

Rotación	Tg/Sj-Tg/Mz	Tg/Sj-Mz	Tg/Mz-Sj	Tg/Sj-Mz-Sj	Sj-Sj
CA (mm/mm)	0.89	0.73	0.70	0.64	0.46
PA (kg/mm)	11.68	11.20	10.54	9.43	5.88
Días ocupación	334	254	248	220	151

Al comparar el aporte de carbono de las diferentes rotaciones, al igual que el rendimiento, depende del nivel de intensificación (**Figura 7**). También se encuentra asociado al porcentaje de gramíneas que tiene la rotación, ya que estas generan mayores aportes que las leguminosas como soja o arveja. Todas las rotaciones duplicaron los aportes del monocultivo de soja, llegando la rotación 1 a triplicarlo.

Conclusiones

Los resultados demuestran que es factible producir conservando el suelo y haciendo un uso más eficiente del agua y nutrientes. La intensificación agrícola ajustada a ambiente y combinada con una nutrición balanceada contribuyen a mejorar el rendimiento de los cultivos y a estabilizar la producción.

La intensificación de las rotaciones agrícolas mejoró el aprovechamiento del agua, por una mayor captura. Podemos pasar de capturar el 40% del agua en un monocultivo de soja a un 65% en sistemas intensificados, lo que en esta zona (1000 mm año⁻¹ de lluvia) equivale a 2 500 000 l ha⁻¹ de agua que se perderían anualmente por escurrimiento o drenaje hacia las napas.

Este mejor aprovechamiento del agua provocó

mayor aporte de carbono y productividad del sistema. La diversificación con gramíneas y leguminosas en rotaciones intensificadas amplificó este efecto.

La nutrición balanceada de los sistemas y los cultivos aporta a mejorar la productividad de los cultivos. Encontramos incrementos promedio de rendimientos de 12%, 9% y 12% para los cultivos de trigo, maíz y soja de segunda, respectivamente. Esto permite acortar las brechas de producción y mejorar los aportes de carbono vía residuos de cosecha, generando así un círculo virtuoso.

Bibliografía

Agosti, M.B. y A. Madias. 2016. Chacra Pergamino: Hacia una producción sustentable real. Resumen de resultados 2011-2016. Sistema Chacras.

Alzueta, I. y A. Madias. 2015. Chacra Bragado-Chivilcoy: Informe Anual de Resultados 2015. Sistema Chacras.

Alzueta, I. y A. Madias. 2016 a. Chacra Bragado-Chivilcoy: Informe Anual de Resultados 2016. Sistema Chacras.

Alzueta, I. y A. Madias. 2016 b. Sistema chacras: una visión integrada para reducir la brecha productiva en maíz. El caso Bragado-Chivilcoy. Congreso Maizar 2016.

Caviglia, O.P., R.H. Rizzalli, N.V. Van Opstal, P. Barbieri, R.J. Melchiori, A. Cerrudo, V.C. Gregorutti, J.P. Monzon, P.A. Barbagelata, J.J. Martinez, F. Garcia, y F.H. Andrade. 2012. Productividad y eficiencia en el uso del agua y nitrógeno en sistemas intensificados. XXIII Congreso Argentino del la Ciencia del Suelo.

Peralta, G., y M. Battafarano. 2014. Caracterización ambiental de Chacra Bragado-Chivilcoy. Sistema Chacras.

Ruiz, A., y T.A. Coyos. 2016. Informe de avances 2016 Chacra Justiniano Posse. Sistema Chacras.

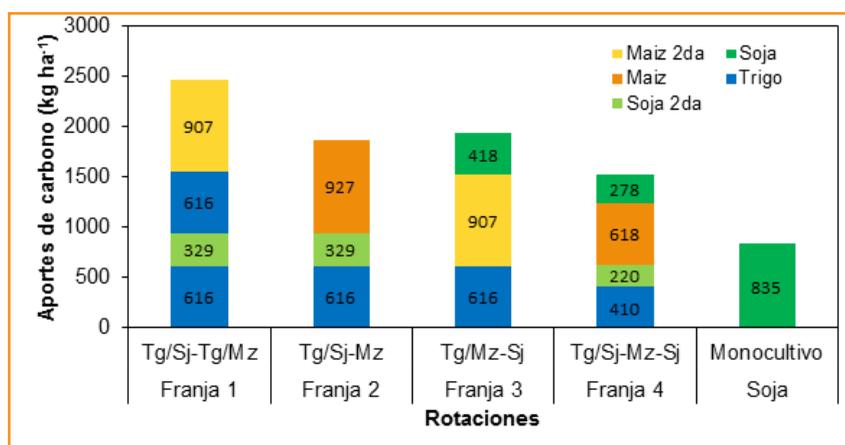


Figura 7. Carbono aportado por ciclo de rotación. Promedio de tres sitios de evaluación. Fuente: Ruiz y Coyos (2016).

Efecto de la aplicación de estiércol vacuno sobre un cultivo de cebada

G.M. Minoldo, G.C. Laurent, A.M. Migliarina, R. García, y J.P. García Diez¹

¹Dpto. Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Argentina

*Contacto: gabriela.laurent@uns.edu.ar

Introducción

La presión proveniente de una agricultura más rentable generó una disminución de la superficie destinada a ganadería. En los últimos años se evidenció una expansión de los sistemas de engorde de hacienda alimentada a granos, desde el más básico corral de engorde dentro de un campo hasta los altamente profesionalizados feedlot. Este desplazamiento de la ganadería hasta zonas menos productivas llevó a una intensificación del sector, manifestada a través de este tipo de alternativas. Se estima que existen alrededor de 2190 establecimientos dedicados al engorde, que suman 2.1 millones de cabezas de ganado, ubicados principalmente en las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba. El engorde a corral genera diariamente grandes cantidades de residuos orgánicos con importante aporte de nitrógeno (N) y fósforo (P), además de patógenos, que vehiculizados por el agua pueden producir enfermedades en las personas. Todos pueden producir peligro potencial de contaminación del suelo y de los cursos de agua superficiales y subterráneos por escorrentía y filtraciones. Si estos residuos llegan a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento, aumenta la cantidad de nutrientes para los organismos productores (algas), con lo cual aumenta su biomasa. En los momentos de oscuridad, por su actividad metabólica consumen oxígeno disuelto en agua, disminuyendo la disponibilidad del mismo para la vida acuática. Estas contaminaciones contribuyen al proceso de eutrofización de los ecosistemas acuáticos.

Una alternativa para disminuir los efectos negativos de altas cargas orgánicas sobre los acuíferos y el medio ambiente es el aprovechamiento del estiércol como enmienda con el propósito de aumentar el rendimiento de los cultivos y a su vez, brindar un destino final productivo al exceso de nutrientes proveniente de los mismos, especialmente en nitrógeno y fósforo (Gil, 2005).

La cebada (*Hordeum vulgare* L) es un cultivo que se encuentra ampliamente difundido en todo el mundo, ocupando el cuarto lugar en superficie sembrada, después del trigo, del maíz y del arroz. En Argentina ha tenido un desarrollo importante en los últimos 6-7 años, aumentando el área sembrada y su producción. Es un cereal de gran importancia alimenticia para el hombre y también constituye un alto porcentaje de la dieta animal.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto de la utilización de estiércol bovino, proveniente de un feedlot, sobre la productividad de un cultivo de cebada en la región semiárida pampeana.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo durante el año 2013 en el establecimiento rural ROOS S.A (37° 37' 21.36" S -62° 43' 52.91" O), ubicado en el distrito de Puán, provincia de Buenos Aires. En el mismo se practica el engorde a corral (feedlots) con una capacidad actual de 5000 animales. Como alternativa para la limpieza general de los corrales, el estiércol se aplica al suelo en diferentes lotes donde se cultiva cebada, que luego de la cosecha se destina a la formación de pellets para alimento del ganado.

El clima predominante es semiárido templado, de régimen térmico, que responde a un clima continental, atenuado por la influencia marítima. De acuerdo al criterio de Thorntwaite se lo define como sub-húmedo seco, mesotermal. con nulos o pequeños excesos de agua. El promedio histórico anual de precipitaciones (1894-2013) para la región es de 695 mm (**Figura 1**).

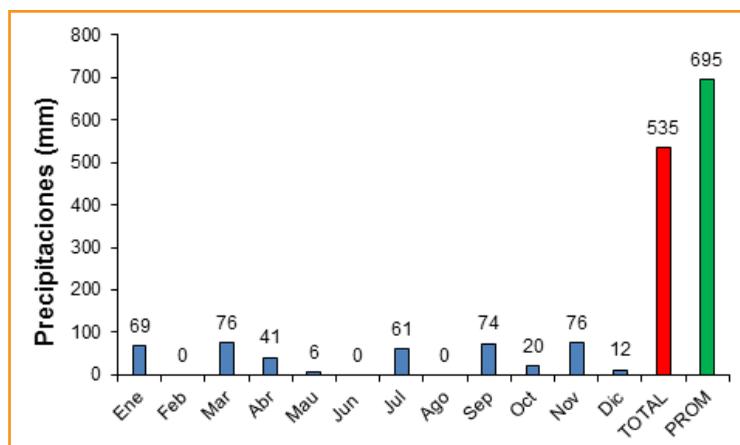


Figura 1: Precipitaciones registradas durante 2013. Fuente: Cooperativa Agrícola-Ganadera de Puán Ltda.

El suelo característico del establecimiento clasifica como Haplustol típico de textura francoarcillosa. El presente estudio se llevó a cabo en un lote en siembra directa, cuyo antecesor fue cebada cervcera (*Hordeum vulgare L.*) los 2 años previos, y nunca recibió aplicación de estiércol. Con el propósito de estudiar el efecto de la aplicación de estiércol sobre el cultivo se diseñó un ensayo en parcelas divididas en bloques completamente aleatorizados, tres en total, según la pendiente del lote. Como factor principal se consideró la dosis de estiércol (Est) y como factor secundario el manejo del mismo: incorporado (IN) y sin incorporar (S/I).

Cada parcela del factor principal se dividió en dos subparcelas de 450 m² (9 m x 50 m) a las cuales se le aplicó estiércol en superficie; a una de ellas la enmienda se incorporó con una pasada de rastra. Las dosis de estiércol vacuno aplicadas fueron: Testigo, sin estiércol (T); dosis 1 (D1): 7633 kg estiércol ha⁻¹; dosis 2 (D2): 15 266 kg estiércol ha⁻¹. Además, en las parcelas S/I, T y D1, al inicio de macollaje, se aplicó urea (46-0-0) en dosis crecientes de 0- 25 - 50 y 100 kg N ha⁻¹. Tras la limpieza de los corrales, el estiércol se estacionó en pilas durante un año aproximadamente. Luego del cual fue aplicado al suelo mediante una estercolera. La composición química del residuo se presenta en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Composición química del residuo de feedlot (Establecimiento Roos S.A.).

C	N	P	K	Mg	Ca	B	Mn	Na	Fe	S
%						ug g ⁻¹				
23,00	3,10	0,80	1,13	0,61	2,43	6,25	301	6950	6850	3415

Con el propósito de cuantificar las dosis de estiércol se distribuyeron al azar, 10 bolsas de superficie conocida sobre el suelo dentro del ancho de labor de la estercolera. Cada pasada de máquina correspondió a una dosis de estiércol. Luego se pesaron las bolsas y se calculó, en promedio, la cantidad de enmienda aplicada en kg ha⁻¹.

La cosecha se realizó el 7/12, coincidiendo con la madurez fisiológica del cultivo; la superficie recolectada fue de 0.42 m². Las muestras se secaron en estufa de aire forzado a 60°C. Las espigas fueron trilladas, separando el grano del resto de la materia seca. Posteriormente el grano fue molido con

molino ciclónico y la paja con molino Willey con tamiz de 40 mesh. Se registró la producción de materia seca total aérea (MSta) y el rendimiento en grano. Se determinaron los porcentajes de N total en grano y paja (Bremner, 1996). Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente mediante el ANAVA y el test de Diferencias Mínimas Significativas de Fisher (DMS) para la comparación de valores medios, mediante el programa INFOSTAT (Di Rienzo, 2016).

Resultados y discusión

La producción de MSta aumentó significativamente conforme al incremento de la dosis de estiércol (T<D1<D2). Los valores oscilaron entre 1850 y 5764 kg grano ha⁻¹ y 2608 y 7176 kg paja ha⁻¹, respectivamente (p<0.05) (**Figura 1**). La forma de aplicación del estiércol, no produjo efecto sobre el rendimiento de MSta (**Tabla 2 y Figura 2**). Los valores calculados de índice de cosecha coinciden con Ross et al. (2009).

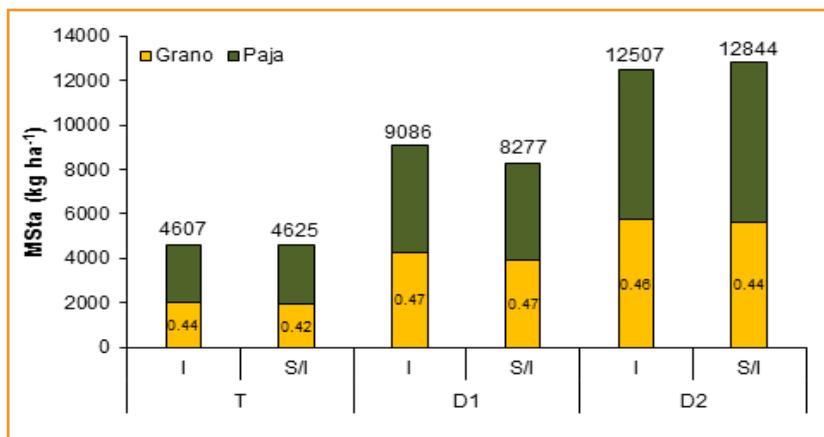


Figura 2. Efecto de la aplicación de estiércol y su manejo, incorporado (I) y sin incorporar (S/I) sobre la materia seca total aérea (MSta). Los valores arriba de cada barra corresponden al rendimiento de materia seca total aérea. Los valores entre paréntesis reflejan el índice de cosecha.

Tabla 2. Valores p de significancia de los ANAVA de la materia seca total aérea (grano + paja). Efecto de la aplicación de estiércol (Est), los distintos manejos y su interacción (Est x Manejo).

	MSta			Grano		
	Est	Manejo	Est x Trat	Est	Manejo	Est x Trat
p	<0.0001	0.5015	0.2634	<0.0001	0.3391	0.4266
DMSest	755	-	-	345	-	-
DMSmanejo	-	617	-	-	487	-
CV (%)		6.94			7.05	

MSta: materia seca total aérea; Est: estiércol; DMS: diferencia mínima significativa; CV: coeficiente variación.

En la **Figura 3** se puede apreciar la producción de MSta en función de la aplicación de enmienda y urea. El estiércol produjo un incremento significativo en la biomasa aérea del cultivo, al igual que las dosis de N correspondientes a 25-50 -100 kg N ha⁻¹ en ambos tratamientos. La producción de MSta de cebada con una dosis de estiércol presentó un valor equivalente a la aplicación de 76.98 kg N ha⁻¹ del tratamiento testigo. A su vez, la MSta en D2 presentó un rendimiento equivalente al tratamiento D1 + 125 kg N ha⁻¹.

El rendimiento en grano para las distintas fertilizaciones de N (**Figura 4**) presentó la misma tendencia que la materia seca total aérea. El efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento varió con la dosis de estiércol (efecto de N x dosis de estiércol fue significativo), solo en el Testigo, entre 50 y 100 kg N ha⁻¹ y en

D1 entre 25 y 50 kg N ha⁻¹ (**Tabla 3**). Al igual que lo observado en la MSta, una dosis de estiércol sin el agregado de N presentó valores de rendimiento en grano equivalentes al agregado de aproximadamente 90 kg N ha⁻¹ inorgánico.

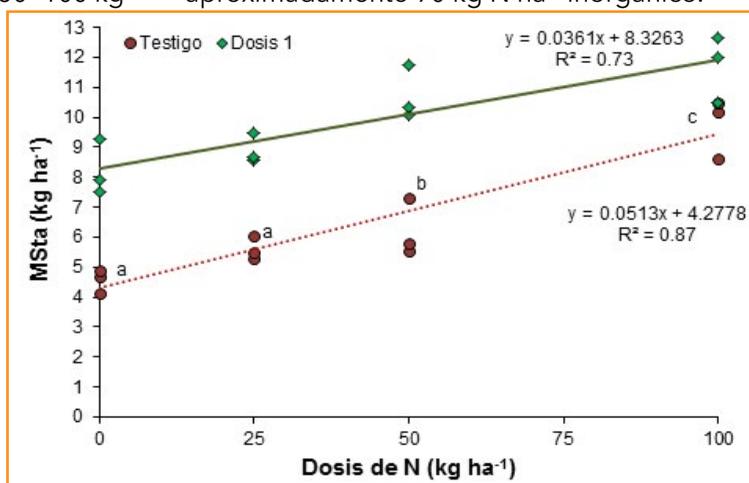


Figura 3. Producción de materia seca total aérea (MSta kg ha⁻¹) de cebada con distintas dosis de estiércol y N inorgánico. Letras distintas para cada dosis de estiércol indican diferencias significativas entre aplicaciones de N inorgánico (p<0.05).

Si bien las dosis crecientes de estiércol favorecieron mayores rendimientos, no se produjeron cambios significativos en el porcentaje de proteína de los granos y los valores se mantuvieron por debajo del estándar mínimo de calidad (9%) (SENASA, 2013) (**Tabla 4**).

El porcentaje mínimo (5.6) se determinó en los granos del tratamiento sin estiércol con pasada de rastra, y el máximo (8.8) se obtuvo con la doble dosis de estiércol, sin incorporar.

Sin embargo, para el promedio de las dosis de enmienda, el manejo mostró efectos significativos positivos en la calidad de los granos cuando esta se aplicó en superficie. La incorporación al suelo previo a la siembra en combinación con la pluviometría (**Figura 1**) probablemente haya favorecido la descomposición rápida de las fracciones orgánicas, la liberación de nitrato y otros nutrientes en etapas tempranas del cultivo, reflejada en los rendimientos y no en la calidad de los granos.

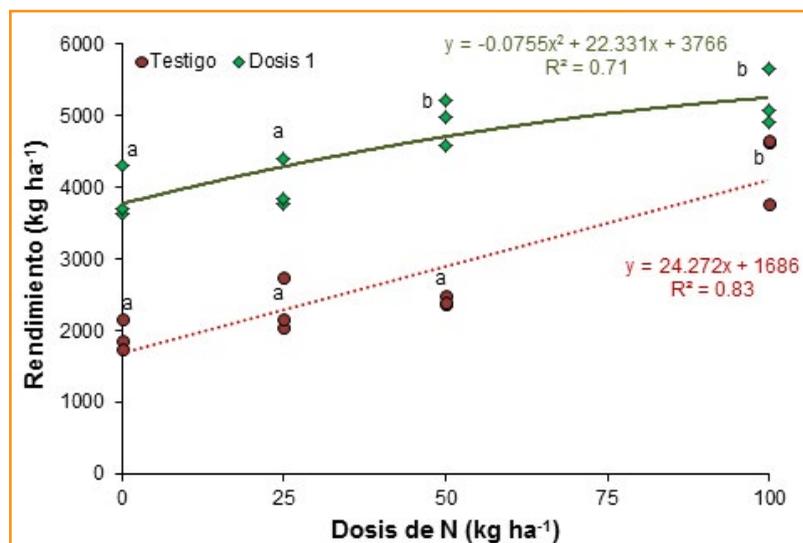


Figura 4. Rendimiento de grano de cebada a distintas dosis de estiércol y nitrógeno inorgánico. Letras distintas para cada dosis de estiércol indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Tabla 3. Valores de significancia de los ANOVA de rendimiento de grano (kg ha^{-1}). Efecto de la aplicación de estiércol (Est), los distintos manejos y su interacción (Est x Manejo).

	Grano					
	Est	Manejo	Manejo x Est.	Est	Dosis N	Est x Dosis N
p	<0.0001	0.3391	0.4266	<0.0001	<0.0001	<0.007
DMSest	344.5				299.7	
DMSmanejo		487.3			423.8*	
CV (%)		7.05			9.55	

*DMS entre dosis de N

Tabla 4. Valores de proteína (%) en grano y significancia de los ANOVA. Efecto de la aplicación de estiércol (Est), los distintos manejos y su interacción (Est x Manejo).

	Dosis Estiércol			Est.	Manejo	Est x Manejo
	T	D1	D2			
S/I	8.3	8.4	8.8			
I	5.6	7.7	7.5			
p-valor				0.2159	0.0218	0.3777
DMSest				1.53		
DMSmanejo					1.25	
CV (%)					15.82	

S/I: estiércol sin incorporar; I: estiércol incorporado; Est: estiércol; DMS; diferencia mínima significativa. CV; coeficiente de variación. ($p < 0.05$).

Conclusiones

Bajo las condiciones del presente ensayo la utilización de 7600 kg ha⁻¹ de estiércol aplicado previo a la siembra produjo un aumento de materia seca total aérea y rendimiento en grano equivalente a una dosis de 76 kg de N ha⁻¹ y 90 kg N ha⁻¹, respectivamente. Sin embargo, la aplicación de estiércol junto con dosis de N mayores a 50 kg N ha⁻¹, condujo a una disminución de la proteína del grano.

La práctica de incorporar el estiércol al suelo no produjo efectos positivos sobre el rendimiento pero sí sobre la proteína del grano.

La problemática de la disposición los residuos de feedlot puede resolverse mediante la aplicación de los mismos como enmienda al suelo ya que, con un manejo adecuado, permite economizar en fertilización química y a su vez disminuir la contaminación ambiental.

Bibliografía

- Bremner, J.M. 1996. Nitrogen total. In *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* (Ed. D.L. Sparks), Soil Sci.Soc. Am. J.-ASA, Madison, WI, USA. 1085-1123.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. González, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2016. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad.
- Gil, S.B. 2005. Feedlot, elementos que intervienen y posibles impactos en el medio ambiente. Sitio Argentino de Producción Animal Página 1 de 10. Disponible en: www.produccion-animal.com.ar.
- Ross, F., J.I. Massigoge, y M. Zamora. 2009. Efecto ambiental y respuesta a la fertilización en cebada cervicera cv. Scarlet. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 42: 5-10. Disponible en: <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/issue/IA-LACS-2009-2>
- SENASA. 2013. Normas de calidad para la comercialización de cebada cervicera. Norma V. Anexo A. Resolución 27/2013. Cámara Arbitral de Cereales. Bolsa de Comercio de Rosario. www.cac.bcr.com.ar/normas. Visitado 23/12/2016. ●

Interpretación de niveles de fósforo y de zinc extractables de suelos agrícolas según su variabilidad dentro de los lotes

Martín M. Navarro*, H. Gonzalez; M. Bermudez, y M. Díaz-Zorita

Desarrollo Tecnológico de Monsanto

Ruta 188 Km 77, (2700), Pergamino, Buenos Aires, Argentina

*Contacto: martin.navarro@monsanto.com

Introducción

En Argentina, nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) son los nutrientes que en mayor medida limitan rendimientos agrícolas y cationes como potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) lo hacen solo en situaciones particulares. Respecto a los micronutrientes, los más estudiados en la región pampeana son molibdeno (Mo), boro (Bo), zinc (Zn) y manganeso (Mn), presentando la respuesta a éstos estos resultados variables debido a que las deficiencias no son generalizadas o están asociadas a cultivos de alto rendimiento (Salviotti, 2013). Algunos relevamientos actuales de suelos sugieren que la disponibilidad de Zn en una amplia área de la región pampeana limitaría los rendimientos de los cultivos (Sainz Rozas et al., 2013). Además, esta condición es validada por frecuentes estudios de fertilización con este nutriente mostrando respuestas principalmente en cultivos de maíz al mejorar la eficiencia de uso de nutrientes como N y P.

Para diagnosticar la oportunidad de fertilización con P y con Zn es recomendable la evaluación de niveles extractables de los suelos en muestras compuestas, derivadas de una serie de sub-muestras de distintas partes de los lotes. Es así que se obtiene un único valor para el lote o zona de asumiendo una distribución homogénea de los nutrientes en el lote y que ese valor de referencia obtenido va a ser representativo de la totalidad del lote. Sin embargo, hay diversos estudios que ejemplifican la variabilidad espacial dentro de los lotes de producción, tanto en términos productivos observables en mapas de rendimientos como de distribución de los nutrientes en el suelo (Alesso et al., 2012; Lopez de Sabando et al., 2010).

El objetivo de este estudio es, a partir de la integración de muestreos en grilla de lotes agrícolas representativos de la región pampeana, analizar alternativas de interpretación de niveles extractables de P y de Zn para el diagnóstico de oportunidades de fertilización.

Materiales y métodos

En 28 lotes de producción de la región pampeana central, durante las campañas 2012 a 2014, se tomaron muestras de suelos (capa de 0 a 20 cm) según un patrón en grilla. Los lotes estudiados fueron seleccionados por representar condiciones regulares de producción agrícola, mayormente bajo prácticas continuas en siembra directa con diversas secuencias de cultivos mayormente de soja y de maíz, planteos de fertilización con P (desde poco frecuente, de suficiencia en cereales y hasta de mantenimiento y reposición según niveles extraídos con los cultivos) y con Zn (desde nula a frecuente en cultivos de maíz), tipos de suelos (Hapludoles Enticos a Argiudoles Típicos).

La superficie de los lotes varió entre 68 y 136 ha y la intensidad de muestreo de suelos en cada uno fue de dos muestras compuestas de 10 submuestras por cada hectárea (0,5 muestras ha⁻¹). En total se evaluaron 6239 muestras en las que, entre otras propiedades, se determinaron los contenidos extractables de P y de Zn según la metodología de Mehlich-3 (Mehlich, 1984). Debido a que los niveles de extracción de Zn con el método Mehlich-3 son mayores que los obtenidos con DTPA, dichos valores se transformaron a niveles Zn con extractante DTPA utilizando una relación lineal de 0,62 a 1, siguiendo según la relación entre ambas metodologías a partir de los resultados obtenidos por Hernán Sainz Rosas (comunicación personal).

En este estudio los datos de cada lote se analizaron calculando parámetros estadísticos descriptivos (promedio, mediana, coeficiente de variación, rangos según distribución de frecuencias). Además, se estimó la recomendación aparente de fertilizar con P cuando los niveles extractables del elemento fueron inferiores a 13 ppm y con Zn cuando estos fueron inferiores a 1 ppm. Se emplearon regresiones lineales y lineales-meseta entre los descriptores estadísticos de los lotes y la proporción de muestras

con recomendación aparente de fertilización (inferiores a los valores críticos de referencia) con cada elemento.

Resultados y discusión

Tanto los niveles extraídos de P como los de Zn mostraron alta variabilidad entre los lotes evaluados como dentro de estos. Los valores de P extraídos variaron entre 3.1 y 150 ppm con promedios de lotes entre 8.1 y 39.0 ppm y muy alta variabilidad dentro de estos (32 a 129 %). En el caso del Zn, los niveles variaron entre 0.041 y 6,210.1 ppm en la totalidad de las muestras estudiadas y entre 0.396 y 1.,189 ppm en los promedios de los lotes. La variabilidad dentro de los lotes mostró coeficientes similares a los descriptos para el caso de los de P variando entre 25 y 118 %.

Los valores de ambos elementos se relacionaron positivamente entre sí (**Figura 1**) y en coincidencia con lo descripto por Barbieri et al. (2015) con un bajo coeficiente de determinación. La mayor dispersión en esta relación se observó en los extremos de los rangos de los niveles de P que sugiere la ocurrencia de factores distintos de modificación en las cantidades extractables entre ambos nutrientes tales como concentración original en interacción con consumo y cambios en otras variables edáficas condicionantes de su disponibilidad (ej. pH).

En todos los casos, la mediana de los valores extractables de P y de Zn fueron iguales o inferiores a los niveles medios (**Figura 2**). Este comportamiento sugiere que en la mayoría de los sitios la distribución de las muestras individuales no se ajustaría a un modelo normal con un sesgo positivo con mayor proporción de

muestras con niveles inferiores al valor promedio. Al considerar 13 ppm de niveles extractable de P (Barbagelta, 2011) y 1 ppm de Zn (Barbieri et al. 2017) como críticos de recomendación de fertilización con estos elementos, según sus valores medios, en el 8.8% de los lotes estudiados se aplicarían correcciones con P y en el 84.24.5 % de estos con Zn . Pero considerando el 50% de los puntos evaluados (mediana), esta interpretación se modifica al 18.,7% de los lotes con recomendación de fertilización con P y 9630.7% con Zn. Si el nivel representativo del lote se intensifica considerando los valores descriptivos del 25% inferior los lotes a corregir se incrementan al 34.,4% en el caso de P y al 10057.8% con Zn. Al ajustar esta caracterización al 10% de los menores valores el 57% de los lotes requerirían la aplicación de P mientras que en el 10061.7% de estos se recomendaría la fertilización con Zn. En todos los casos, se observa que la diferencia entre la interpretación corriente proveniente del mezclado (promedio) de las muestras difiere de la interpretación por área potencialmente afectada por la caracterización del lote o sitio en análisis alterando la proporción de casos con necesidades de corrección nutricional.

La recomendación de fertilización individual de cada muestra, por ej. para el cultivo de maíz, considerando niveles críticos de referencia de 13 ppm para los valores de P y tentativos de 1 ppm para los de Zn , muestra que al incrementarse los niveles medios dentro de cada lote la proporción del área a aplicar cada nutriente disminuye linealmente en el caso de P y de manera cuadrática en el caso de Zn (**Figura 3**). Estas relaciones sugieren que además de definir el nivel crítico de

referencia es conveniente establecer la proporción del área esperable de corrección para revisar el indicador medio aparente para la corrección.

Según los casos estudiados, las relaciones entre los valores medios y los correspondientes a los niveles de los límites superiores según diferentes frecuencias o proporciones de observaciones dentro de los lotes se ajustaron a modelos lineales, principalmente en los menores rangos de concentración de evaluados (**Figura 4**). Estas relaciones mostraron ajustes significativos con todos los casos analizados aún ante la aplicación de diversas condiciones previas de manejo de la fertilización. A

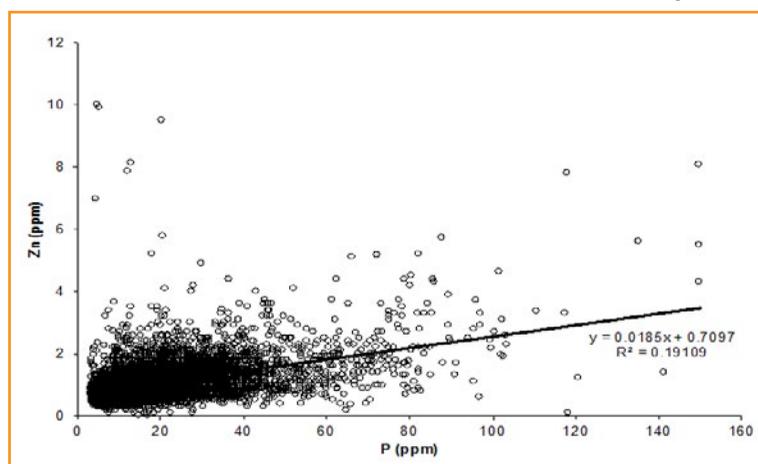


Figura 1. Relación entre los niveles extractables de P y de Zn en 6239 muestras de la capa de 0 a 20 cm de suelos agrícolas de la región pampeana

partir de estos modelos, los niveles críticos de referencia en el caso de P para corregir entre el 75 y el 90 del área de estos lotes tendrían que multiplicarse por un factor de 0,81 y de 0,65, respectivamente. Los de Zn se tendrían que afectar por factores de 0,85 y de 0,73 para alcanzar niveles de corrección en el 75 y el 90 % de los lotes.

Conclusiones

Los niveles extractables de P y de Zn en lotes agrícolas de la región pampeana bajo prácticas regulares de producción (cultivos, estrategias de fertilización, niveles de producción, etc.) muestran distribuciones asimétricas con sesgo positivo. Por lo tanto, los diagnósticos de necesidades de fertilización con P o con Zn a partir del análisis de suelos con muestras compuestas conduce a la aplicación insuficiente de estos nutrientes tomándose como lotes con adecuada oferta de P y de Zn a casos donde más del 50% del área presenta concentraciones inferiores a las críticas consideradas como referencia. Como alternativa de corrección de esta condición se establecieron relaciones lineales y cuadráticas

que permitirían modificar los niveles críticos de referencia atendiendo a proporciones variadas de muestras (área) con potenciales limitaciones.

Bibliografía

Alesso, C.A., M.A. Pilatti, S. Imhoff, y M. Grilli. 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la pampa llana santafesina. *Ciencia del Suelo*, 30: 85-93.

Barbagelata P.A., R.J.M. Melchiori y O.F. Papparotti. 2001. Fertilización fosfatada del cultivo de soja en suelos Vertisoles de la provincia de Entre Ríos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur. INPOFOS N° 11:11-12.*

Lopez de Sabando, M.J., M. Díaz-Zorita, y P. Mercuri. 2010. Variability in wheat crop production base on management zones in Humid Pampas Region, Argentina. *Proceedings of the 10th International Conference on Precision Agriculture. Colorado (EUA), en CD.*

Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15: 1409-1416

Salvagiotti, F. 2013. ¿Cómo podemos aumentar los rendimientos de soja?. La visión desde la nutrición. *Proc Simposio de Fertilidad 2013. Rosario*, pp. 45-50.

Sainz Rozas, H. R., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P.A. Barbieri, H.P. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris, y M.R. Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos?. *En Simposio Fertilidad 2013. Mayo de 2013. Rosario, Santa Fé. Argentina.*

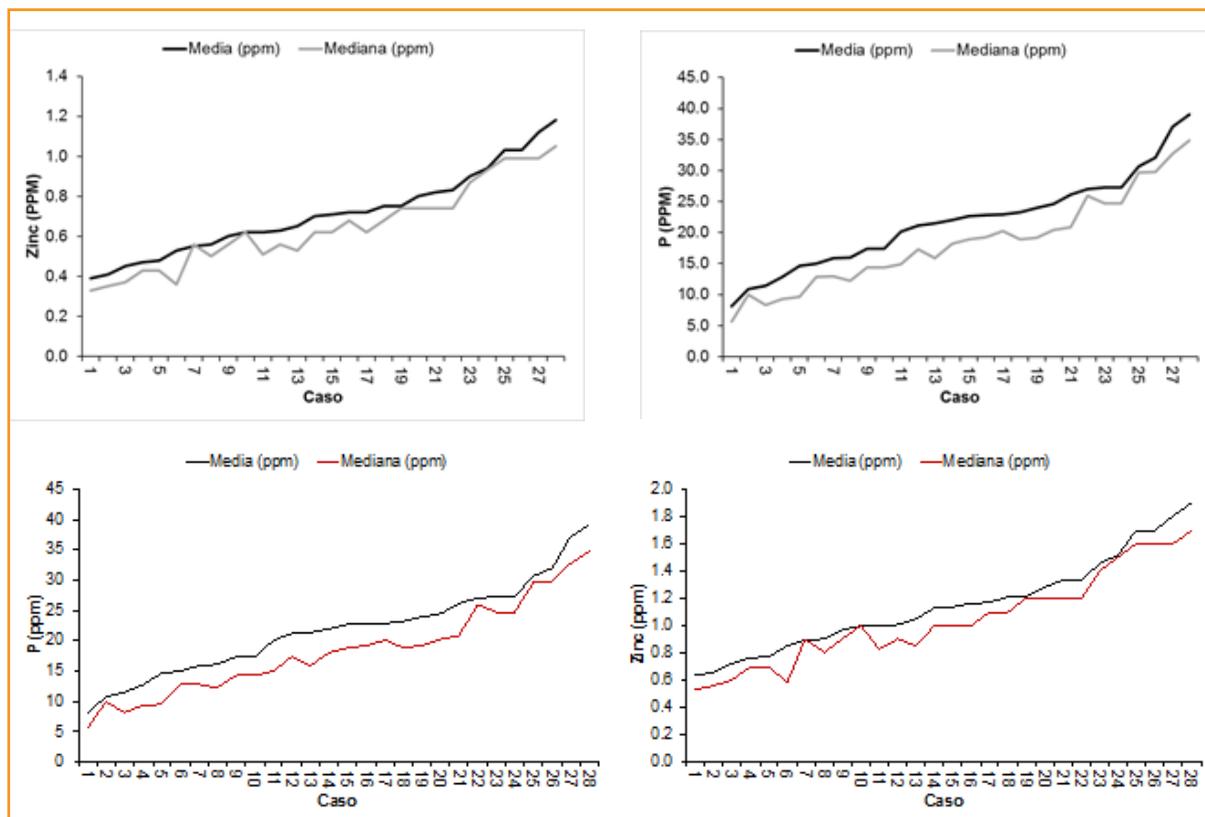


Figura 2. Media y mediana de niveles de P y de Zn extraídos en suelos agrícolas de 28 lotes de producción en la región pampeana según muestreos en grilla.

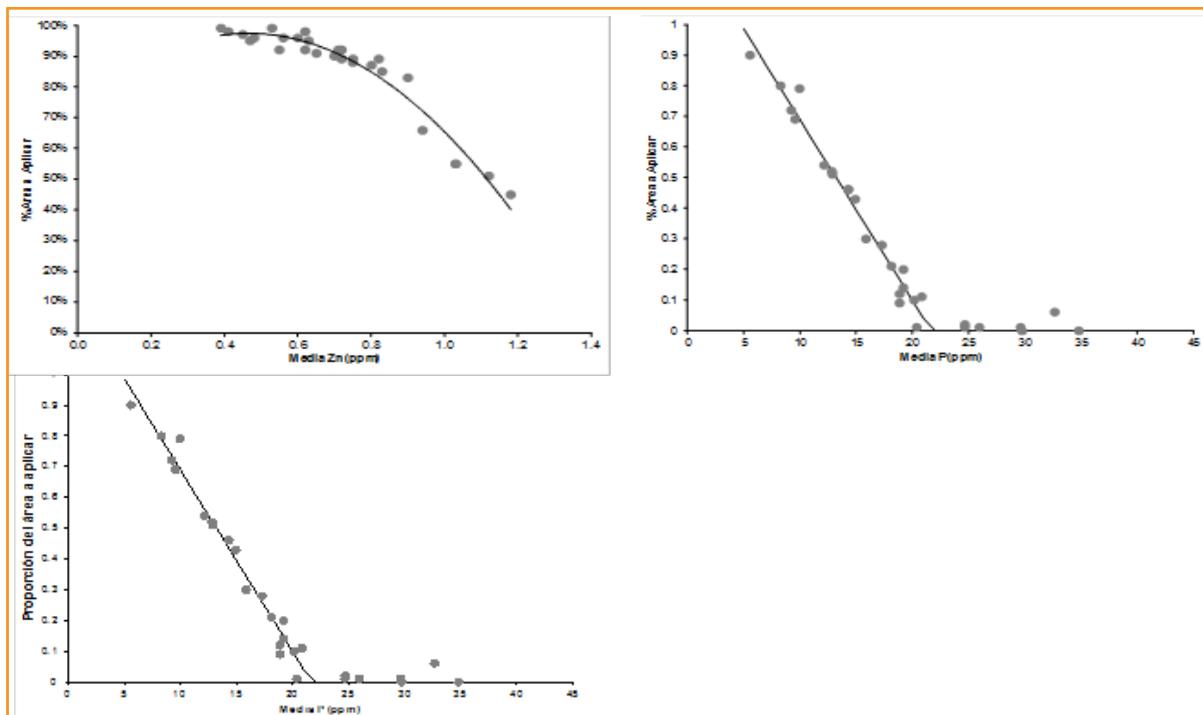


Figura 3. Proporción del área de lotes agrícolas con recomendación de fertilización con P y con Zn según niveles medios extraídos de estos nutrientes en suelos agrícolas de 28 lotes de producción en la región pampeana según muestreos en grilla.

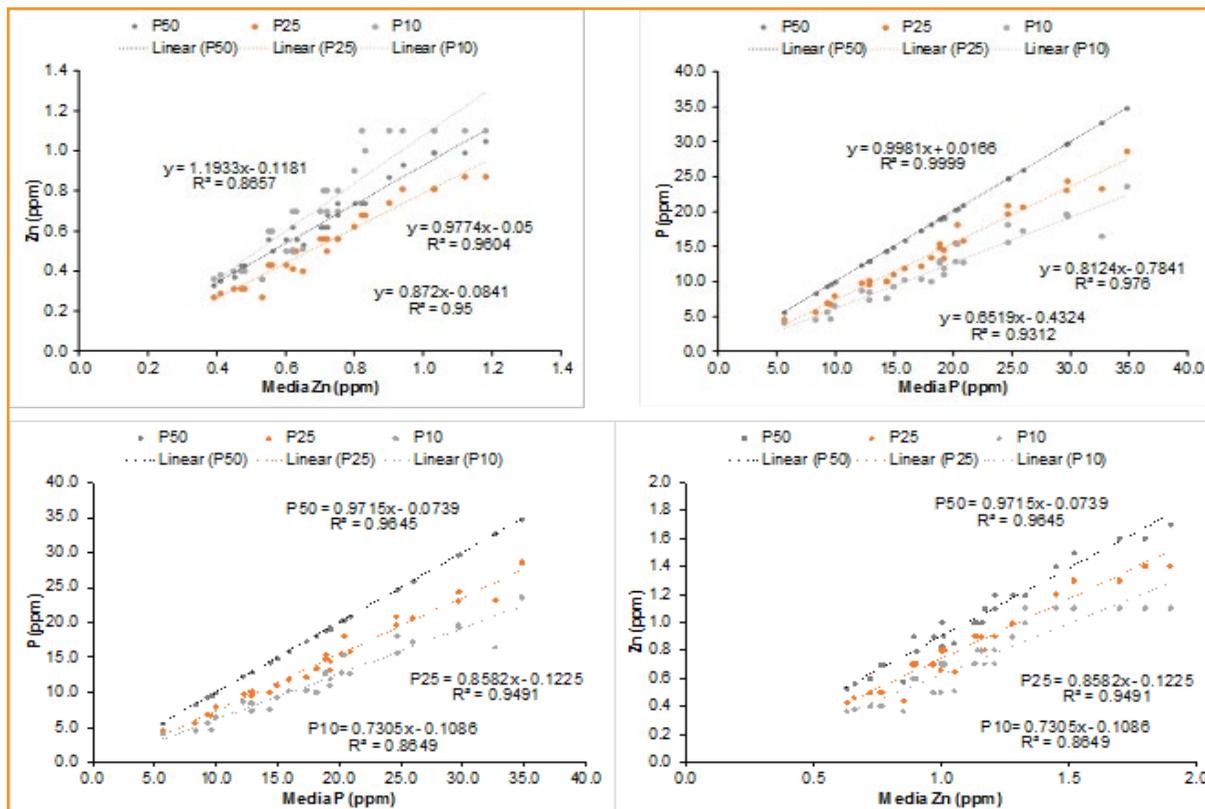


Figura 4. Relaciones entre los niveles medios P y de Zn extraídos y los descriptivos de valores inferiores al 10% (P10), 25% (P25) y 50% (P50 o mediana) de las muestras de suelos agrícolas de 28 lotes de producción en la región pampeana según muestreos en grilla.

¿Podemos diagnosticar nitrógeno durante el ciclo del trigo en el norte de la región pampeana?

Juan M. Orcellet^{1*}; Diego H. Pérez²; Nahuel R. Calvo^{3,4}; Hernán Sainz Rozas⁴; Leonel Tornotti² y Jose Calcha⁵

¹INTA Rafaela; ²CREA Gálvez; ³Laboratorio FERTILAB; ⁴INTA Balcarce; ⁵AER Galvez

*Contacto: orcellet.juan@inta.gov.ar

Introducción

El nitrógeno (N) es el nutriente que con mayor frecuencia limita el rendimiento del cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) en la región pampeana argentina (RP). Por lo tanto, para maximizar la eficiencia de uso del N (EUN), se debería cumplir con los cuatro requisitos (4R) del Manejo Responsable de Nutrientes, es decir, que se debe seleccionar la dosis, el momento, la fuente y la forma correctas (Bruulsema et al., 2008).

En la RP, la metodología más utilizada para definir la dosis de N, se basa en el contenido de N-NO_3^- en pre-siembra del cultivo y umbrales de requerimiento varían según zona, sistema de labranza y rendimiento objetivo (Fontanetto et al., 2005; Barbieri et al., 2008). Sin embargo, se ha determinado falta de ajuste de dicha metodología, dado que no contempla el aporte de N por mineralización durante el ciclo del cultivo (Reussi Calvo et al., 2013a). Por lo tanto, el uso combinado de N-NO_3^- en pre-siembra con índices de mineralización, como el Nan (N incubado en anaerobiosis), permite un mejor diagnóstico de las necesidades nitrogenadas del trigo (Reussi Calvo et al., 2013a).

En cuanto al momento de aplicación, es válido recordar que la mayor acumulación de N en el cultivo de trigo se produce entre fines de macollaje y durante la encañazón del mismo, por ende, en dicho momento se obtendría la máxima EUN (Howard et al., 2002). Para regiones con inviernos húmedos, se determinó que aplicaciones fraccionadas incrementan la EUN y la eficiencia de recuperación de N en grano (ERNg) (Barbieri et al., 2008; Velasco et al., 2012). Por lo tanto, surge la necesidad de evaluar el estado nutricional durante el ciclo del cultivo, y ajustar la dosis aplicada a la siembra. Frente a este escenario, el uso de sensores remotos, parecería una alternativa promisoriosa, para evaluar el estado nutricional del cultivo de una manera rápida, simple y sencilla. Entre ellos se encuentra el medidor de clorofila, Minolta SPAD® 502, con el que se obtiene el índice de verdor (IV) de la hoja el cual está en

estrecha relación con el contenido de clorofila (Finman et al., 1997) y, por ende con la concentración de N en hoja (Schepers et al., 1992).

Para el sudeste bonaerense, se ha reportado que el uso del medidor del clorofila en el estadio de un nudo (Z31; Zadocks et al., 1974) es un buen estimador de la respuesta en rendimiento a la re-fertilización y de la dosis óptima económica (Reussi Calvo et al., 2015). Es válido remarcar que dicha región, existe una muy baja probabilidad de déficit hídricos (menor al 5%) entre la siembra hasta la espigazón del cultivo de trigo (Reussi Calvo y Echeverría, 2006). No obstante, no existe información similar para el norte de la RP (NRP), la cual se caracteriza por presentar escasas precipitaciones durante el ciclo del cultivo, especialmente en los meses invernales (Villar, 2000). Es por esto que los objetivos del presente trabajo fueron evaluar para el NRP: 1) el índice de verdor (IV) y el índice de suficiencia de N (ISN) en el estadio de Z3.1 como método de diagnóstico de N y 2) el efecto de aplicaciones fraccionadas (siembra y Z3.1) sobre rendimiento, la EUN y ERNg.

Materiales y métodos

Se realizaron 12 experimentos de fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo bajo siembra directa en las campañas 2015 (6 experimentos) y 2016 (6 experimentos.), en diferentes departamentos del centro de Santa Fe. En cada sitio experimental el diseño utilizado fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. En el año 2015, se evaluaron dosis crecientes de N aplicadas a la siembra (desde 0 hasta 200 kg N ha⁻¹), mientras que en los sitios experimentales del 2016 se evaluaron dosis aplicadas a la siembra y fraccionadas entre siembra y Z3.1 (Zadocks et al., 1974). En la **Tabla 1** se muestran los tratamientos evaluados en los años 2015 y 2016. En todos los tratamientos la fuente de N utilizada fue urea (46-0-0) granulada aplicada al voleo en cobertura total. Para que el fósforo y el azufre no sean limitantes se aplicó a la siembra una dosis

de 30-40 y 20-25 kg ha⁻¹, respectivamente.

En pre-siembra se determinó la concentración inicial de N-NO₃⁻ hasta los 60 cm de profundidad, por colorimetría (Kenney y Nelson, 1982). Durante el ciclo del cultivo se realizaron lecturas de IV mediante SPAD® en los estadios de un nudo (Z 3.1, según Zadocks et al., 1974). Se realizaron 15 lecturas con el clorofilómetro en cada parcela, las mismas se realizaron en la última hoja expandida, a la mitad de la distancia entre el tallo y el ápice, y a la mitad de la distancia entre el borde de la hoja y la nervadura central. Posteriormente, se determinó el índice de suficiencia de N (ISN) como el cociente entre la lectura de la parcela problema y la parcela de referencia (200 kg N ha⁻¹).

A cosecha en cada parcela se evaluó el rendimiento y se expresó al 14.5 % de humedad. Para la determinación del N total en grano se utilizó Kjeldahl, con digestión con ácido sulfúrico (Nelson y Sommers, 1973). Para obtener el valor de PB se multiplico por 5,7 y fue expresada al 13.5 % tal como indica la norma de comercialización del trigo (Norma XX). Además, se calculó la EUN del fertilizante mediante el cociente entre la diferencia de rendimiento del tratamiento fertilizado y el testigo, y los kg de N aplicados. La ERNg, se determinó de forma similar, empleando el contenido de N en grano (Stewart, 2007).

Para comparar la disponibilidad de N entre sitios experimentales, y las variables de cultivo dentro de cada sitio experimental, se realizaron análisis de la varianza utilizando el procedimiento

incluido en las rutinas del programa R commander (R Core Team, 2014). Cuando las diferencias entre tratamientos fueron significativas, se empleó el test de la diferencia mínima significativa (DMS), con un nivel de probabilidad de 5 %.

Resultados y discusión

El rendimiento del cultivo de trigo en el NRP es explicado en gran medida por el contenido hídrico inicial (Ai) y las lluvias en los primeros meses del ciclo (junio, julio y agosto) (Villar, 2000). El Ai hasta el 1.5 m de profundidad, fue en promedio de 162 mm para el año 2015 y de 300 mm para el año 2016. Por otro lado, las precipitaciones promedio desde Junio hasta Agosto fueron de 147 y 58 mm, para el año 2015 y 2016, respectivamente. Frente a esta situación, se observa que en la mayoría de los sitios experimentales las condiciones hídricas fueron óptimas.

Al momento de la siembra se determinó que la disponibilidad inicial promedio de N-NO₃⁻ fue de 72 kg ha⁻¹ (mínimo de 33 kg ha⁻¹ y máximo de 103 kg ha⁻¹), con diferencias significativas entre sitios experimentales (datos no mostrados). En el estadio de un nudo (Z3.1) se determinó un incremento significativo (p< 0.05) del IV, en la medida que se incrementa la dosis de N aplicada a la siembra (datos no mostrados). En la **Figura 1** se observa que el IV y el ISN presentan una elevada asociación con el N disponible (suelo + fertilizantes), siendo los r² de 0.62 y 0.84, respectivamente.

Tabla 1. Dosis de nitrógeno (en kg N ha⁻¹) evaluada en cada tratamiento para los diferentes sitios experimentales. * indica dosis aplicada en el estadio de 1 nudo (Z31)

Sitio	Año	Tratamiento (kg N ha ⁻¹)						
		1	2	3	4	5	6	7
Sitio 1	2015	0	40	80	120	160	200	-
Sitio 2	2015	0	40	80	120	160	200	-
Sitio 3	2015	0	40	80	120	160	200	-
Sitio 4	2015	0	40	80	120	160	200	-
Sitio 5	2015	0	40	80	120	160	200	-
Sitio 6	2015	0	40	80	120	160	200	-
Sitio 7	2016	0	40	80	40-40*	120	60-60*	200
Sitio 8	2016	0	40	80	40-40*	120	60-60*	200
Sitio 9	2016	0	40	80	40-40*	120	60-60*	200
Sitio 10	2016	0	40	80	40-40*	120	60-60*	200
Sitio 11	2016	0	50	100	50-50*	150	100-50*	200
Sitio 12	2016	0	50	100	50-50*	150	100-50*	200

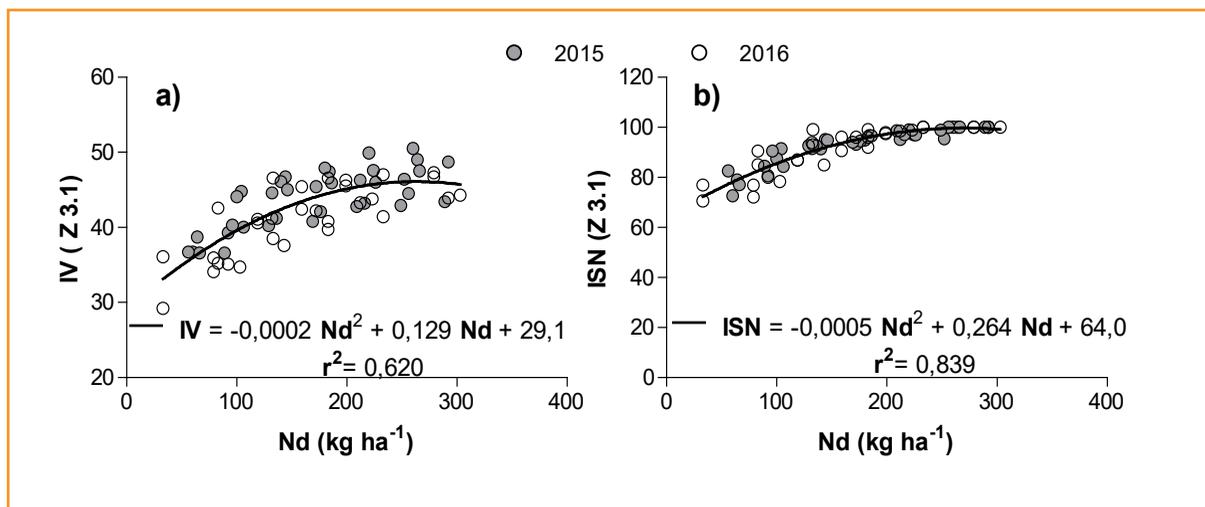


Figura 1. a) Índice de verdor (IV) y b) índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) en el estadio de un nudo (Z3.1) en función del nitrógeno disponible (suelo + fertilizante). Círculos rellenos para los sitios experimentales del 2015 y círculos vacíos para los sitios experimentales del 2016.

Al evaluar rendimiento, no se determinó diferencia significativa ($p > 0.05$) entre los años, siendo el promedio de 4312 y 5004 kg ha⁻¹, para el 2015 y 2016, respectivamente. Para todos los sitios experimentales el rendimiento promedio fue de 4668 kg ha⁻¹, con un mínimo de 1967 kg ha⁻¹ y un máximo de 7068 kg ha⁻¹. En todos los sitios experimentales se determinó respuesta significativa ($p < 0.05$) al agregado de N al momento de la siembra. Para la máxima respuesta en rendimiento (diferencia entre la dosis máxima y el testigo) el valor promedio fue de 1866 kg ha⁻¹, con valores que van desde 736 hasta 3285 kg ha⁻¹. Esta variación, indicaría la diferencia en potencial de rendimiento y de respuesta a N entre los sitios experimentales, afectado por numerosos factores (Ai, Pp, N-NO₃⁻, Nan).

En la **Figura 2**, se observa la relación entre el IV (**Figura 2a**), y el ISN (**Figura 2b**) en el estadio un nudo (Z3.1) con el rendimiento relativo. Se determinó, que el ISN presento una mayor capacidad predictiva del RR, respecto al IV, siendo esta del 82%. Esto se explicaría en parte, dado que el IV es afectado por numerosos factores entre los que se destacan cultivar, disponibilidad hídrica, enfermedades y deficiencia de otros nutrientes (Blackmer y Schepers, 1995; Gandrup et al., 2004). Es válido mencionar, que resultados similares han sido reportados para las condiciones del sudeste bonaerense (Reussi Calvo et al., 2015).

Estos resultados indicarían que para el NRP el medidor de clorofila a través del ISN en el

estadio de Z3.1 es un buen estimador del estado de nutrición nitrogenada del trigo, siendo una herramienta promisoría para el diagnóstico de N. No obstante, el estadio de Z 3.1 en dicha región se produce en promedio a fines del mes de agosto, época en la cual las precipitaciones son muy escasas, siendo esta una posible limitante del uso del ISN como método de diagnóstico.

En los sitios evaluados no se determinó respuesta en rendimiento por efecto del fraccionamiento de N (**Tabla 2**). No obstante, es válido remarcar que en ciertas dosis y sitios el fraccionamiento de la dosis de N, produjo una caída en el rendimiento del cultivo respecto a la misma dosis aplicada a la siembra. Esto queda en evidencia en la caída de la EUN por efecto del fraccionamiento en la mayoría de las situaciones evaluadas (**Tabla 2**). Para las dosis más bajas (80 y 100 kg N ha⁻¹), la EUN promedio fue de 22 y 17 kg trigo kg N⁻¹ para la aplicación a la siembra y fraccionada, respectivamente. Por otro lado, para las dosis más altas (120 y 150 kg N ha⁻¹) se determinó que la EUN promedio fue de 17 kg trigo kg N⁻¹ para la aplicación a la siembra y de 14 kg trigo kg N⁻¹ para la aplicación fraccionada. Estos resultados, se explicarían en parte, por las escasas precipitaciones ocurridas en los meses de agosto y septiembre. Para ambos meses las precipitaciones solo acumularon 19 mm, lo cual representa solamente el 30 % del promedio histórico de la zona (67 mm) (EEA Rafaela, Agrometeorología).

Por otro lado, se observa como tendencia que

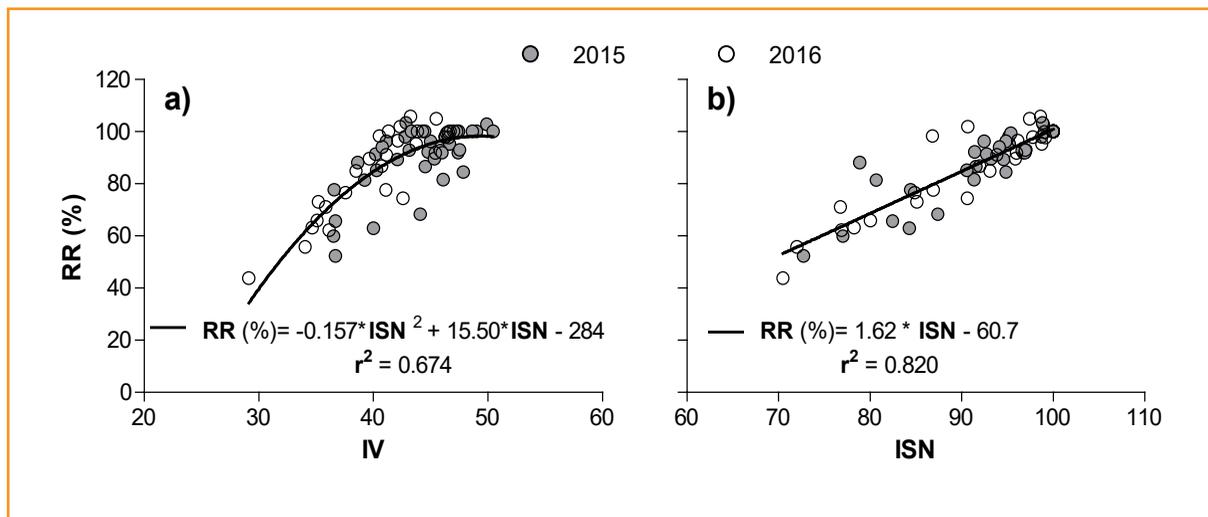


Figura 2. Rendimiento relativo (RR) en función de: a) Índice de verdor (IV) y b) índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) en el estadio de un nudo (Z31). Círculos rellenos para los sitios experimentales del 2015 y círculos vacíos para los sitios experimentales del 2016.

el fraccionamiento de N incrementó el contenido de contenido de PB para la mayoría de las situaciones, siendo dicho incremento significativo en algunos casos (Tabla 2). Por dicho motivo, al evaluar la ERNg no se encontró reducciones por efecto del fraccionamiento de N. Para las dosis más bajas (80 y 100 kg N ha⁻¹), la ERNg promedio fue de 46 y 45 % para la aplicación a la siembra y fraccionada, respectivamente. Similar diferencia se determinó para las dosis más altas (120 y 150 kg N ha⁻¹) donde el promedio fue de 36 % para la aplicación a la siembra y de 35 % para la aplicación fraccionada. Estos resultados indicarían que el N aplicado en el estadio de Z 3.1 fue utilizado en estadios más avanzados del cultivo (llenado de grano), dado que las precipitaciones del mes de octubre fueron de 135 mm.

Estos resultados, difieren de los reportados para regiones con inviernos húmedos, como el sudeste bonaerense (Barbieri et al., 2008; Velasco et al., 2012). Sin embargo, los mismos corresponden a un año de evaluación con un invierno con precipitaciones por debajo de lo normal, siendo necesario continuar con dicho estudio en pos de maximizar la EUN.

En síntesis, para el NRP se determinó que el SPAD, y específicamente el ISN en el estadio de un nudo (Z 3.1) es un buen estimador del N disponible (r²= 0.84) y del RR (r²= 0.82). Sin embargo, debido las escasas precipitaciones en los meses invernales, resulta necesario seguir evaluando si dicha herramienta permite predecir

las necesidades de N en el estadio de un nudo, tal como se ha desarrollado para el sudeste bonaerense (Reussi Calvo et al., 2013b).

Conclusiones

Para las condiciones del NRP se determinó que el uso SPAD en el estadio de un nudo (Z 3.1) es un buen estimador de la disponibilidad de N y del rendimiento relativo del cultivo. No obstante, dado que no se determinó respuesta a la fertilización en dicho estadio, no fue posible evaluar esta herramienta como metodología para predecir la respuesta, tal como está desarrollado para otras zonas trigueras.

Agradecimientos

El presente trabajo se hizo posible por el apoyo del Proyecto Nacional Suelos del INTA (PNSUELO-1134024).

Tabla 2. Dosis de nitrógeno (N), rendimiento, proteína (PB), Eficiencia de uso de N (EUN) y Eficiencia de recuperación de N en grano (ERNg). Para los sitios experimentales del año 2016 (n=6) * indica dosis aplicada en el estadio de 1 nudo (Z31). Letras distintas para cada sitio, indican diferencias significativas con un DMS 5 % de probabilidad.

	Dosis de N (kg N ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	PB (%)	EUN (kg trigo kg N ⁻¹)	ERNg (%)
Sitio 7	0	3459 a	10.3 a		
	40	4783 bcd	11.1 ab	33	67
	80	4957 cd	13.3 cdef	19	58
	40-40*	4463 b	14.3 efg	13	54
	120	5100 d	12.7 cd	14	37
	60-60*	4545 bc	13.7 def	9	34
	200	4866 bcd	14.2 efg	7	25
Sitio 8	0	3775 a	10.2 a		
	40	5222 bc	10.2 a	36	48
	80	5533 bcd	12.5 bc	22	50
	40-40*	5295 bcd	12.8 bcd	19	48
	120	6061 e	13.1 cd	19	45
	60-60*	5471 bcd	13.0 cd	14	36
	200	5734 de	14.7 h	10	30
Sitio 9	0	3630 a	9.7 a		
	40	4403 b	10.6 b	19	38
	80	4986 cd	12.1 cd	17	41
	40-40*	4987 cd	12.7 de	17	46
	120	5474 efgh	12.7 de	15	37
	60-60*	5369 defg	13.0 ef	14	38
	200	5749 gh	15.3 h	11	35
Sitio 10	0	3938 a	9.1 a		
	40	5484 bc	9.5 ab	39	52
	80	6488 defg	10.4 abcd	32	52
	40-40*	5990 cd	10.6 abcd	26	45
	120	6915 fgh	10.4 abcd	25	39
	60-60*	6351 de	11.5 cdef	20	41
	200	7068 h	13.2 fg	16	37
Sitio 11	0	3087 a	10.6 a		
	50	3697 bc	12.8 cd	12	38
	100	4861 g	12.3 c	18	36
	50-50*	3969 cd	14.9 e	9	34
	150	4962 gh	12.5 c	12	26
	100-50*	4602 fg	14.3 e	10	29
	200	4971 gh	12.8 cd	9	20
Sitio 12	0	2552 a	10.9 a		
	50	4264 b	11.3 ab	34	53
	100	4951 cd	11.7 abc	24	39
	50-50*	4735 bc	12.4 bcde	22	40
	150	5228 cde	11.9 abcd	18	30
	100-50*	5025 cd	13.5 ef	16	35
	200	5837 ef	11.8 abcd	16	27

Bibliografía

- Barbieri, P.A., H.R. Sainz Rozas, y H.E. Echeverría. 2008. Time of nitrogen application affects nitrogen use efficiency of wheat in the humid pampas of Argentina. *Can. J. Plant Sci.* 88, 849-857.
- Blackmer, T.M., y J.S. Schepers. 1995. Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. *J. Prod. Agric.* 8:56-60.
- Bruulsema, T.W., C. Witt, F. García, S. Li, T.N. Rao, F. Chen, y S. Ivanova. 2008. Marco global de las mejores prácticas de manejo (MPM) de los fertilizantes. INPO-FOS *Informaciones Agronómicas*, (38), 1-4.
- Finnan, J. M., J.I. Burke, y M.B. Jones. 1997. A note on a non-destructive method of chlorophyll determination in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Irish journal of agricultural and food research*, 85-89.
- Fontanetto, H., H. Vivas, O. Keller, R. Albrecht, L. Gastaldi, y H. Castignani. 2005. Consideraciones sobre la fertilización nitrogenada de trigo en la región central de Santa Fe. *Publicación miscelánea. EEA Rafaela*, (103).
- Gandrup, M.E., F.O. García, K.P. Fabrizio, y H.E. Echeverría. 2004. Evolución de un índice de verdor en hoja para evaluar el status nitrogenado en trigo. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 33(3):105-121.
- Howard, D.D., M.A. Newman, M.E. Essington, y W.M. Percell. 2002. Nitrogen fertilization of conservation-tilled wheat. II. Timing of nitrogen application of two nitrogen sources. *J. Plant Nutr.* 25: 1329-1339.
- Keeney, D.R., y D.W. Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. En: Page, A.L. et al. eds. *Methods of soil analysis*. Part 2. *Agron. Monog 9 ASA and SSSA*, Madison, WI. pp. 643-698
- Nelson, D.W., y L.E. Sommers. 1973. Determination of total nitrogen in plant material. *Agronomy Journal*. 65:109-112.
- R Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [En línea] <<http://www.R-project.org>>.
- Reussi Calvo, N. I., H. Sainz Rozas, H. Echeverría, y N. Diovisalvi. 2013b. ¿Cómo ajustamos la dosis de nitrógeno durante el ciclo del trigo? (En línea). <http://www.laboratoriofertilab.com.ar/publicaciones.php>.
- Reussi Calvo, N. I., y H.E. Echeverría. 2006. Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo: balance hídrico para el sur bonaerense. *Ciencia del suelo*, 24(2), 115-122.
- Reussi Calvo, N.I., H. Sainz Rozas, H. Echeverría y A. Berardo. 2013a. Contribution of anaerobically incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agronomy Journal*. 105(2): 321-328.
- Reussi Calvo, N.I., H. Sainz Rozas, H. Echeverría, y N. Diovisalvi, N. 2015. Using Canopy Indices to Quantify the Economic Optimum Nitrogen Rate in Spring Wheat. *Agronomy Journal*, 107(2), 459-465.
- Schepers, J., T. Blackmer, y D. Francis. 1992. Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions: Using chlorophyll meters. In B. Bock y K. Kelly (ed). *Predicting fertilizer needs for corn in humid regions*. NFERC, Bull. Y-226. Muscle Shoals, AL, EE.UU. pp. 105 - 114.
- Stewart, W.M. 2007. Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Informaciones Agronómicas*, v.67, p.1-6.
- Velasco, J.L., H. Sainz Rozas, H. Echeverría, y P. Barbieri. 2012. Optimizing fertilizer nitrogen use efficiency by intensively managed spring wheat in humid regions: Effect of split application. *Can. J. Plant Sci.* 92: 1-10.
- Villar, J. 2000. Economía del agua en el cultivo de trigo en el área centro de Santa Fe. En: *Información técnica de trigo. Campaña 1998*. Publ. Misc. N°90. Trabajo N°2. INTA EEA Rafaela. 5 p.
- Zadoks, J.C., T.T. Chang, y C.F. Zonczak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421. ●

Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos

Juan M. Pautasso¹ y Pedro A. Barbagelata²

¹AER INTA Diamante; ²EEA INTA Paraná.

*Contacto: pautasso.juan@inta.gob.ar

Introducción

En Entre Ríos se cultivan alrededor de 270 mil hectáreas de pasturas base alfalfa (INDEC, 2002), siendo uno de los recursos forrajeros de menor costo por kilogramo de materia seca cuando se logran buenos niveles de producción (Centeno et al., 2016).

En la provincia de Entre Ríos, la baja disponibilidad de fósforo (P) es una de las limitantes principales para poder maximizar la producción de pasturas (Quintero, 2000; García et al., 2002). Si bien la fertilización fosfatada en pasturas es la tecnología conceptualmente más reconocida, la correcta aplicación de esta tecnología ha sido casi irrelevante (Agnusdei, 2012).

La respuesta al agregado de P depende de la disponibilidad de este nutriente en el suelo, medida en nuestro país a través del P extractable Bray-1 (P Bray). Con este índice de disponibilidad de P se han desarrollado métodos de diagnóstico de fertilidad fosfatada en pasturas que señalan un nivel umbral o rango crítico de P Bray del suelo por debajo del cual existe una alta probabilidad de respuesta a la fertilización, en tanto por encima del mismo la probabilidad de respuesta es baja.

El muestreo de suelos es el primero de una serie de pasos dentro del proceso que lleva a la recomendación de fertilización. La utilidad del valor obtenido en el laboratorio dependerá de cuán representativa sea la muestra del lote a implantar y, además, que el procedimiento involucrado sea similar al realizado en el estudio que definió el umbral o nivel crítico, como la profundidad de muestreo, momento del año, entre otros puntos críticos (Carretero et al., 2016)

Para la provincia de Entre Ríos, Quintero et al. (1995) definieron un modelo continuo para recomendar la fertilización fosfatada en pasturas. Los autores establecieron clases de fertilidad muy

baja (MB), baja (B), media (M), alta (A) y muy alta (MA). Los límites de clases propuestos son 4.9, 10.2, 14.9 y 23.1 mg kg⁻¹ de P Bray que corresponden a los niveles de rendimiento relativo del 50%, 70%, 80% y 90% del máximo. Estos autores usaron muestreos de suelos a una profundidad de 0-10 cm. En el resto de la Pampa Húmeda se estima un umbral para alfalfa de alrededor de 25 mg kg⁻¹ de P Bray, tomando una profundidad de muestreo de 0-20 cm (Díaz Zorita y Gambaudo, 2007; Rubio et al., 2013).

El objetivo del presente trabajo fue validar para Entre Ríos el umbral de P Bray para el cultivo de alfalfa a partir de la información de ensayos de fertilización fosfatada realizados sobre suelos Molisoles.

Materiales y Métodos

Los datos corresponden a muestreos de ensayos de fertilización fosfatada en pasturas de alfalfa diseñados en bloques completos al azar con tres repeticiones. Todos los ensayos se realizaron sobre suelos pertenecientes al Orden Molisol. Más detalles de cada ensayo se muestran en la **Tabla 1**.

Las dosis agregadas fueron 0 y 60 kg P por hectárea como superfosfato triple de calcio (SFT, 0-20-0), excepto en los ensayos 2 y 3 que fueron de 0 y 20 kg de P ha⁻¹. El análisis de suelos se realizó antes de la aplicación del fertilizante químico, previo al momento de la siembra. El análisis se repitió al año de la implantación de las pasturas (sólo se mostrarán datos de dos ensayos con P Bray contrastante). La profundidad de muestreo fue de 0-20 cm.

Para medir la producción de materia seca (MS) por tratamiento y por corte, antes del aprovechamiento que realizó el productor, se cortó una superficie de 0.25 m² por parcela. Luego de pesar las muestras se secaron en estufa a 60°C durante 48 horas.

Tabla 1. Características generales de los ensayos de respuesta a fósforo en pasturas realizados en Entre Ríos entre 2013 y 2016.

Ensayos	Latitud	Longitud	Año implantación	Cortes medidos	P Bray (mg kg ⁻¹ , 0-20 cm)
1	31°59'56.87"S	60°23'25.10"O	2013	13	5.3
2	32° 0'12.74"S	60°23'47.64"O	2014	3	90.0
3	32° 0'8.12"S	60°23'53.60"O	2014	3	13.9
4	32°12'4.99"S	60°17'51.09"O	2015	9	4.2
5	31°57'11.15"S	60°26'14.75"O	2015	8	24.1
6	32°12'27.03"S	60°22'28.38"O	2016	2	10.3
7	32° 1'39.20"S	60°32'36.13"O	2016	2	121.3
8	31°57'1.04"S	60°26'18.30"O	2016	2	93.2

Para el cálculo de los umbrales se usó la metodología propuesta por Dyson y Conyers (2013) modificada por Correndo et al. (2017), denominado método del arcoseno-logaritmo (ALCC), que considera variables aleatorias tanto al rendimiento relativo (RR, %) como al valor del análisis de suelo. El RR se calculó como el cociente porcentual entre el rendimiento del tratamiento sin fertilizar y el rendimiento máximo medio observado. Para poder comparar, con igual método la información obtenida en el presente trabajo con las recomendaciones existentes en la provincia, se obtuvieron los puntos de la gráfica de Quintero et al. (1995). Para establecer si las dos series de datos pueden combinarse y representarse como una sola población o dos poblaciones diferentes, se probó un test de F (Mead et al., 1993).

Resultados y Discusión

Umbral de P Bray

En la **Figura 1** se muestran las relaciones entre el nivel P Bray del suelo y el rendimiento relativo de alfalfa obtenido en el presente trabajo y por Quintero et al. (1995).

Los modelos obtenidos entre P Bray y RR son estadísticamente diferentes para los datos de Quintero et al. (1995) y los medidos en nuestros ensayos (**Tabla 2**).

La diferencia entre los niveles críticos encontrada entre estos dos set de datos seguramente se debe a las distintas profundidades de muestreo de suelos utilizadas en ambos estudios. Mientras que para los datos propios se utilizaron muestras

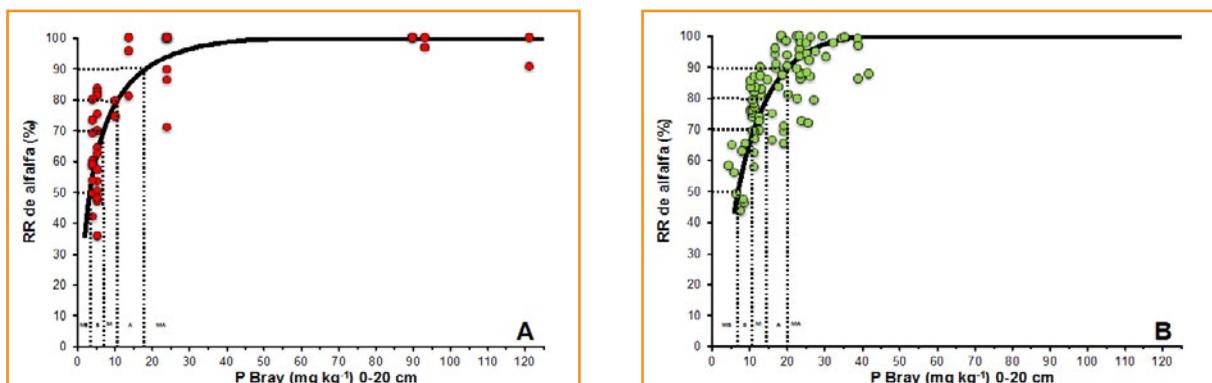


Figura 1. Relación entre el nivel de P Bray en el suelo y el rendimiento relativo (RR) de pasturas de alfalfa: A) Datos propios (n= 42; r= 0.80), cada punto corresponde al promedio de tres repeticiones; B) Datos de Quintero et al. (1995) (n= 79; r= 0.72). Curvas de ajuste (líneas llenas) y clases de fertilidad (líneas punteadas) -muy baja (MB), baja (B), media (M), alta (A) y muy alta (MA)- según el método ALCC modificado.

Tabla 2. Análisis de la variación del error entre el modelo completo y el combinado y de la significancia de la diferencia entre los dos modelos.

	SCE	GL	CME	Valor F	Valor p
A - Datos propios (0-20 cm)	21.02	40			
B - Quintero et al. (1995) (0-10 cm)	10.65	77			
Modelo Completo (dos modelos)	31.67	117	0.27		
Modelo Combinado (un modelo)	37.84	119			
Diferencia entre Modelos	6.17	2	3.09	11.40	0.00003

SCE: Suma de cuadrados del error del modelo; GL: grados de libertad de la SCE; CME: Cuadrado medio del error del modelo completo y de la diferencia entre modelos.

a 0-20 cm de profundidad, Quintero et al. (1995) tomaron muestras a 0-10 cm. Teniendo en cuenta la reconocida estratificación del P en suelos, es esperable obtener niveles críticos mayores en muestreos de suelo más superficiales. Por otro lado, una posible explicación del menor umbral de P Bray obtenido en nuestro estudio respecto a lo informado para el resto de la Pampa Húmeda es que los Molisoles de Entre Ríos poseen un mayor porcentaje de arcilla en los horizontes superficiales. Melgar et al. (2011) informaron que la respuesta al agregado de P (y por lo tanto el cálculo del umbral) está condicionada por el contenido de arcilla de los suelos.

En la **Tabla 3** se informan los límites de las clases de fertilidad para ambos set de datos y sus respectivos intervalos de confianza. Excepto para un RR del 90%, los límites ahora definidos son estadísticamente menores.

En la **Tabla 4** se informan los cambios en el P Bray del suelo (0-20 cm) para los tratamientos evaluados en dos sitios con P Bray contrastante con el agregado de 60 kg de P ha⁻¹.

A pesar de tratarse de dos suelos correspondientes al mismo subgrupo (Argiudol ácuico), la dosis necesaria para elevar una parte por millón el P Bray (denominada dosis equivalente), fue muy diferente entre ambos ensayos, requiriendo más cantidad de P para elevar una parte por millón en el suelo con bajo P Bray inicial. Rubio et al. (2008) calcularon el incremento en el P del suelo ante el agregado de fertilizante fosfatado e informan que el P Bray inicial del suelo y el contenido de arcilla del mismo influyen en la determinación de la dosis de P a agregar.

Tabla 4. Fósforo extractable (P Bray) y dosis de P para elevar una unidad de P Bray, según tratamiento al inicio y al año de la implantación del cultivo de alfalfa en dos sitios evaluados.

P Bray inicial (mg kg ⁻¹)	Tratamiento	P Bray al año (mg kg ⁻¹)	Dosis para elevar 1 mg kg ⁻¹ (kg P ha ⁻¹)
24.1	Fertilizado	36.4	
	Testigo	22.8	4.4
4.2	Fertilizado	5.9	
	Testigo	3.5	25.0

Tabla 3. Niveles críticos (NC) de P Bray para el cultivo de alfalfa y sus respectivos intervalos de confianza (IC, $\alpha=0.10$) para las distintas clases de fertilidad estimadas a partir de dos set de datos: A) Datos propios con muestreo a 0-20 cm (n= 42; r = 0.80), B) Datos de Quintero et al. (1995) con muestreo a 0-10 cm (n= 79; r= 0.72).

P Bray (mg kg ⁻¹)		RR (%)			
		50	70	80	90
A-Datos propios	NC	3.2	6.9	10.6	18.1
	IC _{90%}	(2.4 - 4.3)	(5.6 - 8.5)	(8.8 - 12.8)	(14.8 - 22.1)
B-Quintero et al. (1995)	NC	6.8	11	14.4	20.2
	IC _{90%}	(5.9 - 7.8)	(10.0 - 12.0)	(13.4 - 15.5)	(18.7 - 21.7)

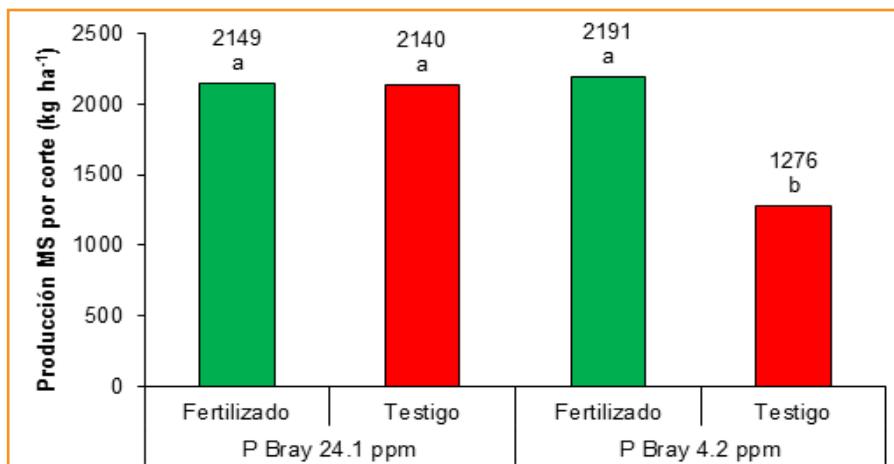


Figura 2. Producción de MS por corte de la pastura de alfalfa en función del agregado de 60 kg P ha^{-1} para dos situaciones de disponibilidad inicial de P contrastantes. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Test Tukey; $p > 0.05$).

En la **Figura 2** se informan las producciones promedio por corte según los diferentes tratamientos. En un suelo donde la limitante principal fue el P (P Bray = 4.2 mg kg^{-1}) la fertilización fosfatada incrementó un 70% la producción de MS de alfalfa por corte con respecto al tratamiento sin fertilización, llegando a niveles de producción similares a los logrados en un suelo bien provisto de P (P Bray 24.1 mg kg^{-1}), donde no se observó respuesta a la fertilización fosfatada.

Conclusiones

El umbral o nivel crítico de P Bray estimado para obtener el 90% del RR de alfalfa en Molisoles de Entre Ríos fue inferior (18.1 mg kg^{-1}) a lo informado previamente para la región (23 a 25 mg kg^{-1}). Asimismo, respecto de estudios previos en Entre Ríos, los niveles críticos de las distintas clases de fertilidad de P Bray también resultaron inferiores en todos los casos. Por un lado, diferente profundidad de muestreo en estudios anteriores, y por otro lado, características inherentes a los suelos de la provincia (contenido y tipo de arcilla) pueden explicar estos resultados.

El P limita fuertemente la producción de alfalfa en la provincia de Entre Ríos. Sin una adecuada provisión de este nutriente mediante fertilización en suelos con bajo P Bray el cultivo de alfalfa puede rendir la mitad que un cultivo fertilizado o que se siembra en suelos con buena disponibilidad de P.

Es necesario continuar con estos ensayos para incorporar mayor cantidad de datos, explorando rangos intermedios de P Bray para lograr un mejor ajuste de los modelos de fertilización fosfatada para alfalfa en Entre Ríos.

Agradecimientos

A Rubén Isaurralde, Silvestre Cabaña y Javier Kühn por la colaboración en los cortes de las pasturas. A los productores Ricardo Farall, Néstor Lell, Ángel Olivero y Germán Bierig por su predisposición a apoyar las actividades del INTA en sus establecimientos.

Bibliografía

- Agnusdei, M. 2012. Rol de la ecofisiología en el diseño de manejos especializados de pasturas. En Pasturas 2012: hacia una ganadería competitiva y sustentable. Jornada técnica. Síntesis de material de conferencias. Mar del Plata 23 de marzo 2012. Páginas 13-28.
- Carretero, C., P. Marasas, E. Souza, y A. Rocha. 2016. Conceptos de utilidad para lograr un correcto muestreo de suelos. Archivo Agronómico N° 15. IPNI. Disponible [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/7712B35AB30A4403257F880046ABB5/\\$FILE/AA%2015.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/7712B35AB30A4403257F880046ABB5/$FILE/AA%2015.pdf) (verificación febrero de 2017).
- Centeno, A., I. Esnaola, G. Almada, P. Engler, L. Gastaldi, y M. Suero. 2016. "La alimentación en el tambo y el impacto económico del nuevo escenario". Disponible http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_boletin_lecheria_sustentable_nro1_1.pdf [Verificación: febrero de 2017].
- Correndo, A.A., F. Salvagiotti, y F.O. García, y F.H. Gu-

tiérrez-Boem. 2017. A modification of the arcsine-log calibration curve for analyzing soil test value-relative yield relationships. *Crop & Pasture Science* 68 (3): 297-304, doi:10.1071/CP16444.

Díaz-Zorita, M., y S. Gambaudo. 2007. Capítulo 11: Fertilización y encalado en alfalfa. En *El Cultivo de la Alfalfa en Argentina*. Basigalup (Editor). INTA Manfredi. ISBN 978-987-521-242-8. Pág. 227-246. Disponible http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-el_cultivo_de_la_alfalfa_en_la_argentina.pdf [Verificación: febrero de 2017]

Dyson, C.B., y M.K. Conyers. 2013. Methodology for online biometric analysis of soil test-crop response datasets. *Crop & Pasture Science* 64, 435-441.

García, F.O., F. Micucci, G. Rubio, M. Ruffo, e I. Devede. 2002. Fertilización de forrajeras en la región pampeana. Edición INPOFOS. ISBN 987-20486-0-6. 72 páginas.

INDEC. 2002. Encuesta Nacional agropecuaria 2002. Ministerio de Economía, obras y servicios públicos. Buenos Aires, Argentina.

Mead, R., R.N. Curnow, y A.M. Hasted. 1993. *Statistical methods in agriculture and experimental biology*. Chapman and Hall, London, 415p.

Melgar, R., G. Vitti, y V. De Melo Benites. 2011. Fertilizando para altos rendimientos. Soja en Latinoamérica. IIP Boletín No 20. Instituto Internacional de la Potasa. ISBN 978-3-9523243-7-0. DOI 10.3235/978-3-9523243-7-0. 180 páginas.

Quintero C., N. Boschetti, y R. Benavidez. 1995. Fertilización fosfatada de pasturas en implantación en suelos de Entre Ríos. *Ciencia del Suelo* 13:60-65. Disponible http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_13n2/Quintero.pdf [Verificación: febrero de 2017]

Quintero C. 2000. Estado de fertilidad de los suelos de Entre Ríos. Principales Limitaciones. En: *Revista Facultad de Agronomía*. UBA, 20: 15-19.

Rubio, G., M.J. Cabello, F.H. Gutiérrez-Boem, y E. Munaro. 2008. Estimating available soil P increases after P additions in Mollisols. *Soil Science Soc. Amer. J.* 72: 1721-1727.

Rubio, G., F. Micucci, y F.O. García. 2013. Capítulo 14: Ciclado de nutrientes y fertilización de pasturas. En *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. ISBN 978-987-27793-7-5. Páginas 263-292. ●

Aporte nutricional de los cultivos de cobertura en nuestros sistemas productivos de granos

Gonzalo E. Robledo^{1*}, Miguel Morandini¹, G. Agustín Sanzano¹, Hugo Rojas Quinteros¹, Mario R. Devani², y Facundo Daniel²

¹Ings. Agrs. Sección Suelos y Nutrición Vegetal, ²Ings Agrs. Sección Granos. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes. Tucumán - Argentina.

*Contacto: gerobledo@eeaac.org.ar

Introducción

En el NOA, los sistemas de producción de granos han evolucionando hacia secuencias de cultivos con fuerte predominio del cultivo de soja en detrimento del maíz (Fandos et al., 2012). Esta falta de rotación de cultivos ha provocado la degradación física, química y biológica de los suelos, lo que se tradujo en importantes pérdidas de materia orgánica, fósforo, reducción progresiva del pH, aumento de la densidad aparente, disminución de la infiltración, y aumento del escurrimiento y la erosión hídrica (Dantur et al., 1989; Sánchez et al., 1998; Hernández et al., 2011). Los resultados agronómicos de la agricultura de secano están fuertemente determinados por la eficiencia en la captación del agua de lluvia y por la reducción de pérdidas por escurrimiento y evaporación. Desde ese punto de vista, manteniendo la cobertura con residuos de cosecha, aumenta la infiltración, disminuye las pérdidas por evaporación y permite un mejor control de malezas (Sanzano et al., 2005). Para ser más eficientes, los residuos deben quedar en superficie y cubrir no menos del 60 % del suelo.

En los últimos años se ha desarrollado el concepto de intensificación agrícola con la introducción de cultivos de cobertura entre dos cultivos de verano. Un cultivo de cobertura (CC) se define como una cubierta vegetal viva que cubre el suelo de manera temporal. No tiene un valor comercial, pero agrega valor al siguiente cultivo, que es el de principal interés económico. Los CC son cultivos que no se cultivan para cosechar, sino para llenar vacíos, sean de tiempo o espacio, que dejan las siembras comerciales (Altieri, 1999). Los residuos de los CC juegan un papel importante tanto como mulch que favorece la conservación del suelo y el agua, así como un insumo para mantener la materia orgánica y restituir nutrientes al suelo (Schomberg et al., 1994). Los cultivos de cobertura se realizan durante el período de barbecho, previo a la siembra de un cultivo destinado a la producción de granos,

interrumpiendo su crecimiento a través de la aplicación de herbicidas (Caviglia et al., 2008).

La finalidad de éstos es contribuir en el aporte de materia orgánica y nutriente, disminuir la erosión hídrica y eólica, reducir la población de malezas y en lo posible, conservar la humedad del suelo.

Como recomendación general para un esquema de rotación soja-maíz, se sugiere la implantación de una gramínea antes de la soja con el objetivo de lograr cobertura y absorber nitratos residuales de la fertilización del maíz. Antes del maíz, la inclusión de un cultivo de leguminosa como cobertura genera protección al suelo, reduce el requerimiento de fertilizante nitrogenado e incrementa el rendimiento potencial del cultivo principal.

Con el objetivo de evaluar el aporte de materia seca y nutriente de la biomasa generada por parte de los CC, en campos de productores, se realizó un seguimiento de los mismos durante el invierno. Además, durante el verano se instalaron ensayos de fertilización nitrogenada en maíces sembrados sobre distintos antecesores como CC, y así evaluar la respuesta por parte del cultivo al agregado de nitrógeno (N).

Materiales y métodos

Durante las campañas 2014-2015 y 2015-2016, en las localidades de Garmendia y Gob. Piedra buena respectivamente, ambas pertenecientes al Dpto. de Burruyacú, provincia de Tucumán, se llevo a cabo ensayos de fertilización nitrogenada en el cultivo del maíz, con distintos cultivos antecesores utilizados como cobertura invernal.

Durante el invierno, en ambas campañas y localidades, se realizó un seguimiento de los cultivos antecesores utilizados como cobertura (CC): Avena negra (como Gramínea) y Vicia villosa (como Leguminosa). En la localidad de Garmendia la siembra de estos cultivos se realizó en abril de 2014, utilizando entre 35-40 kg ha⁻¹ de semillas sembradas al voleo sobre el cultivo de

verano anterior, en este caso soja. Mientras que en Gob. Piedrabuena, la siembra fue en mayo de 2015, utilizando 30 kg ha⁻¹ de semilla de Vicia; y 50 kg ha⁻¹ de Avena, ambas sembradas en línea, una vez cosechado el cultivo de verano anterior, también soja. Se determinó rendimiento de materia seca (kg ha⁻¹), las características químicas y estimación del equivalente Urea de los residuos de los CC, como muestran la **Tabla 1** y **Tabla 2**.

La metodología utilizada para la obtención de las muestras fue mediante un anillo de superficie conocida. Dichas muestras fueron secadas en estufa hasta peso constante a 60°C. Y por último, los pesos obtenidos fueron llevados a kg ha⁻¹, estimando así el rendimiento de materia seca de cada CC por unidad de superficie. Por otro lado, en laboratorio, a cada una de las mismas se les determinó N total (%), por el método de Kjeldahl, y Carbono Orgánico Total (%), por método de Calcinación.

Cabe destacar que estos cultivos no llegaron a cosecha, ya que en floración se realizó un quemado con herbicidas dejando los residuos en la superficie del suelo hasta la siembra del maíz, sin ser incorporados.

Es muy importante aclarar que nuestra región se caracteriza por un régimen pluviométrico del tipo monzónico, ya que más del 80% de las precipitaciones anuales se dan durante el semestre cálido. Es decir, que el éxito de una buena implantación de un cultivo de invierno, depende en gran medida de la humedad de suelo remanente del verano anterior.

Durante el verano, en el cultivo de maíz sembrado sobre los distintos antecesores, se mon-

taron ensayos de fertilización nitrogenada con dosis crecientes. En el mismo se evaluaron 8 tratamientos: un testigo absoluto, un tratamiento con una base de fósforo (22 kg ha⁻¹ de P) y seis tratamientos con la misma base de fósforo y dosis crecientes de N, que fueron desde 25 a 150 kg ha⁻¹. El fertilizante fosfatado utilizado fue el Superfosfato Triple de Calcio (SPT: 0-20-0; 12% Ca), aplicado superficialmente y durante la siembra; y el fertilizante nitrogenado fue Urea (46-0-0), también aplicado superficialmente, pero en este caso cuando el maíz presentaba seis hojas verdaderas (V6). Además, en el mismo estadio, se determinó nitratos de suelo hasta los 90 cm de profundidad en cada uno de los sitios ensayados, antes de la aplicación del fertilizante nitrogenado, y solo de los testigos absolutos. Como se puede observar en la **tabla N°3**, en Garmendia se ensayó sobre Vicia y Avena negra, mientras que en Piedrabuena se ensayó además sobre barbecho invernal.

El diseño experimental utilizado para los ensayos de fertilización nitrogenada, fue en bloques completamente aleatorizados con 4 repeticiones. El análisis de la varianza de las medias de cada tratamiento fue realizado mediante Test Tukey, con una probabilidad de error del 95% (P>0.05). Cada parcela estuvo constituida por seis líneas sembradas a 52 cm, con un largo de 10 mts., sumando así una superficie por parcela de aproximadamente 31 m². Durante la madurez del cultivo, se cosecharon las espigas de las tres líneas centrales de cada parcela, en una longitud de 5 mts. Las

Tabla 1. Rendimiento materia seca (kg ha⁻¹) y características químicas de los CC. Garmendia 2014 y Gob. Piedrabuena 2015. Tucumán - Argentina.

Campaña	Localidad	CC	MS (kg ha ⁻¹)	N total (%)	COT (%)	C:N
14-15	Garmendia	Vicia villosa	5610	1.74	49.37	28.4
		Avena Negra	4425	1.02	53.62	52.6
15-16	Piedrabuena	Vicia villosa	3770	1.81	48.9	27.01
		Avena Negra	2765	1.06	52.7	49.71

Tabla 2. Nitrógeno Total, Carbono Orgánico Total y Equivalente Urea (kg/ha) de los CC. Garmendia 2014 y Gob. Piedrabuena 2015. Tucumán - Argentina.

Campaña	Localidad	CC	N total (kg ha ⁻¹)	C. Org. Total (kg ha ⁻¹)	Equivalente Urea (kg ha ⁻¹)
14-15	Garmendia	Vicia villosa	97.4	2764.7	211.7
		Avena negra	44.9	2359.3	97.6
15-16	Piedrabuena	Vicia villosa	68.2	1843.5	148.2
		Avena negra	29.3	1457.1	63.7

Tabla 3. Nitratos de suelos en el cultivo de maíz sembrados sobre distintos antecesores como CC. Garmendia 2014 y Gob. Piedrabuena 2015. Tucumán - Argentina.

Campaña	Localidad	CC	Nitratos de suelos en V6			
			0-30	30-60	60-90	Total
14-15	Garmendia	Vicia villosa	42.1	39.3	31.8	113.2
		Avena negra	28.1	26.1	17.1	71.3
15-16	Piedrabuena	Vicia villosa	29.8	29.7	35.9	95.4
		Avena negra	18.6	20.0	31.7	70.3
		Barbecho invernol	14.9	17.0	29.9	61.8

mismas se trillaron en maquinas fijas para obtener peso de granos de cada parcela y finalmente estimar kg.ha⁻¹ de granos de las mismas.

Resultados y discusión

En Garmendia, donde la siembra fue realizada con anticipación, los rendimientos de materia seca de los CC fueron mayores que en la segunda localidad, dejando mayor cantidad de nitrógeno orgánico en sus residuos para el cultivo de verano. Tal es así, que se puede observar altos valores de equivalente Urea que presentaron ambos CC para esa localidad. Además se puede decir que la relación C:N del residuo de la leguminosa es más baja que el de la gramínea, dejando en superficie un residuo de mayor velocidad de descomposición, permitiendo liberar los nutrientes en menor tiempo, para el cultivo del maíz.

Los rendimientos de granos en el cultivo del maíz obtenidos con cada uno de los tratamientos evaluados, para ambas campañas y localidades, se pueden observar en los **Figura 1** y **Figura 2**.

En la localidad de Garmendia, los rendimientos de todos los tratamientos evaluados fueron superiores al testigo absoluto, tanto en el maíz sembrado sobre rastrojo de Vicia, como aquel sembrado sobre Avena. Sin embargo, sobre la leguminosa se observan diferencias significativas, comparado con el testigo, a partir de los 100 kg N ha⁻¹ (aproximadamente 217 kg urea ha⁻¹); y sobre la gramínea a partir de los 25 kg ha⁻¹ de N (55 kg

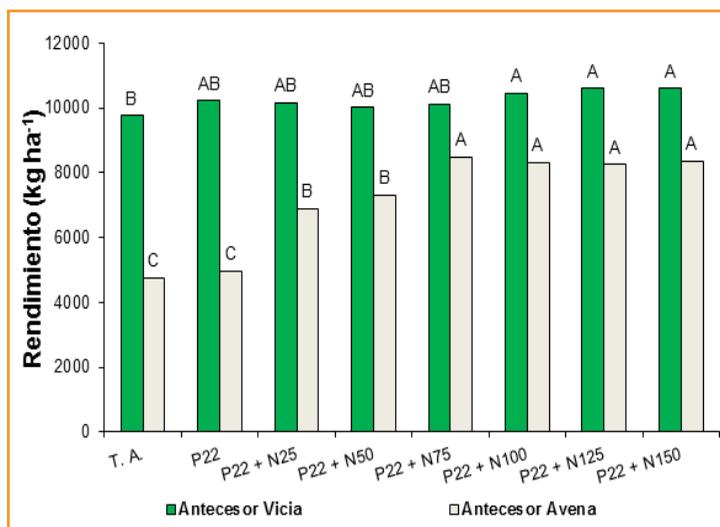


Figura 1. Rendimiento medio de maíz (kg ha⁻¹) de cada tratamiento sobre distintos cultivos antecesores. Garmendia 2015. Tucumán - Argentina. *Letras distintas indican diferencias significativas con test DLS, con una probabilidad de error del 5% (P>0.05).

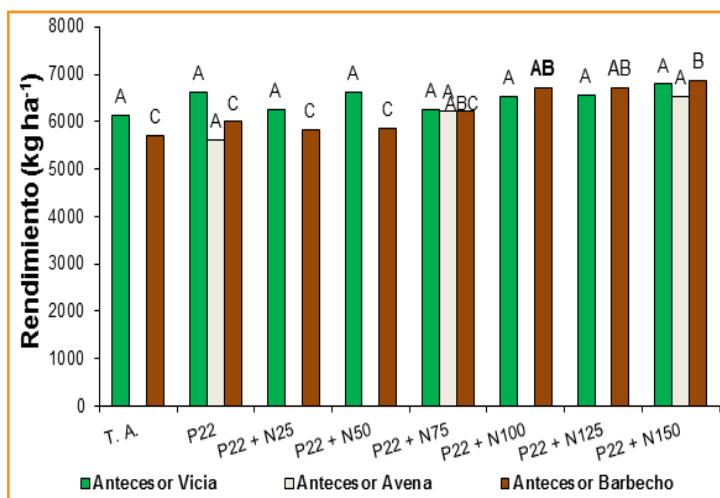


Figura 2. Rendimiento medio de maíz (kg ha⁻¹) de cada tratamiento sobre distintos cultivos antecesores. Gob. Piedrabuena 2015. Tucumán - Argentina. *Letras distintas indican diferencias significativas con test DLS, con una probabilidad de error del 5% (P>0.05).

urea ha^{-1} aproximadamente).

En la localidad de Piedrabuena, como en el caso anterior, se observa que todos los tratamientos con agregado de N fueron superiores que el testigo absoluto. Sin embargo en el único caso que se diferencia estadísticamente con el testigo absoluto, fue en aquel maíz que vino de Barbecho durante el invierno, y con una respuesta por parte del cultivo del maíz, a partir de los 100 kg ha^{-1} de N (aproximadamente 217 kg ha^{-1} de Urea).

Por otra parte se puede observar en los distintos sitios ensayados, como los contenidos de nitratos de suelo, hasta los 90 cm de profundidad, varían con los distintos CC como antecesores. Se observo mayores contenidos de nitratos de suelo cuando venimos de una leguminosa como cultivo antecesor. De este modo, las respuestas por parte del cultivo del maíz al agregado de N, son también distintas.

Conclusiones

Hubo una asociación importante entre los contenidos de nitratos de suelo en V6 y la respuesta por parte del cultivo a la fertilización nitrogenada



Fotografía 1. Maíz en V6 sembrado sobre Avena negra (Izquierda) y Sobre Vicia villosa (Derecha). Garmendia 2015. Tucumán – Argentina.



Fotografía 2. Maíz en V9 sembrado sobre Avena negra (Izquierda) y sobre Vicia villosa (Derecha). Garmendia 2015. Tucumán – Argentina.

en cada campaña y localidad.

El mayor inconveniente observado en los ensayos se relacionaría con la fecha de implantación de los CC, ya que si es demasiado tardía, se generarían bajos rendimientos de materia seca, dejando menores contenidos de N y CO en los suelos. Por el contrario, la siembra temprana de los CC se traduciría en altos rendimientos de materia seca, y por lo tanto, de N y Carbono orgánico total. Si bien se trata del análisis de dos campañas, la repetición de estas evaluaciones en los próximos años permitirá brindar mayor solidez a estas consideraciones.

La vicia como cultivo de cobertura hizo un buen aporte de nitratos para el cultivo de maíz. Además por presentar una relación C:N baja, su residuo es de rápida descomposición, dejando los nutrientes disponibles más rápidamente para el maíz. A la hora de fertilizar con N es muy importante tener en cuenta el cultivo antecesor.

Bibliografía

- Fandos, C., P. Scandaliaris, J. Carreras Baldrés, y F. Soria. 2012. Superficie cultivada con soja y maíz en Tucumán en la campaña 2011/2012 y comparación con campañas anteriores. Boletín Electrónico (En línea). Disponible en: www.eeaoc.org.ar
- Hernández, C., F. Sosa, G. A. Sanzano, G. Robledo, D. E. Gamboa, C. Sotomayor, J. I. Romero, M. Morandini, y H. Rojas Quinteros. 2011. Experiencia de fertilización en maíz. En: Gamboa, D., Lane Wilde B., Goizueta F. y M. R. Devani (eds.). El maíz en el NOA. Campaña 2011/2012. Publ. Espec. EEAOC (46): 91-98.
- Dantur, N.C., C.F. Hernández, M.R. Casanova, V. Bustos, y L. Guzmán. 1989. Evolución de las propiedades de los suelos de la Región Chaco-Pampeana de Tucumán bajo diferentes alternativas de producción. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 66 (1): 33-66.
- Sánchez, H.A., J.R. García, M.R. Cáceres, y R.D. Corbella. 1998. Labranzas en la Región Chacopampeana Subhúmeda de Tucumán. En: Panigatti, J. L., H. Marelli, C. Buzchiazzo y R. Gil (eds.), Siembra Directa. INTA. Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires, R. Argentina, pp. 245-256.
- Sanzano, G.A., R.D. Corbella, J. R. García, y G. S. Fadda. 2005. Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. Ci Suelo (Argentina) 23 (1): 93-100.
- Caviglia, O.P., N.V. Van Opstal, V.C. Gregoratti, R.J.M. Melchiori, y E. Blanzaco. 2008. El invierno: estación clave para intensificación sustentable de la agricultura. Agricultura sustentable. Actualización técnica. INTA Paraná. Septiembre de 2008. Pp: 7-13.
- Altieri, M. 1999. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. Ed. Nordan-Comunidad.
- Schomberg, H. H., P.B. Ford, y W.L. Hargrove. 1994. Influence of crop residues on nutrient cycling and soil chemical properties. In Managing Agricultural Residues. Ed. P. Unger. Chapter 6 pp 100-116. ●

Emisiones de gases de efecto invernadero con fertilización variable de N a escala intralote⁺

M.E. Sanahuja^{1*}, H.M. Redel¹, y M.M. Zubillaga¹

¹Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417) CABA

*Contacto: sanahuja@agro.uba.ar

⁺Trabajo publicado en el XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, del 27 de Junio al 1 de Julio de 2016, Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

Introducción

Investigaciones recientes señalan a la agricultura como una de las principales fuentes de emisión de N hacia la atmósfera como N₂O a partir de la fertilización nitrogenada (EPA, 2009). Las dosis superiores a las requeridas pueden tener un marcado efecto negativo sobre el ambiente, al contribuir en las emisiones de GEI (IPCC, 2007). Las emisiones de GEI a partir de los fertilizantes nitrogenados son principalmente como N₂O, las que pueden clasificarse en directas o indirectas. Las emisiones directas provienen de los procesos de desnitrificación y nitrificación. Por otro lado, las emisiones indirectas se producen a partir de la volatilización de N como amoníaco (NH₃) y óxidos de N (NO_x) y de la lixiviación y el escurrimiento del N de los fertilizantes agregados (IPCC, 2006).

Del N aplicado a los cultivos en promedio un 20-80 % es absorbido por los cereales a nivel mundial, mientras que el resto es susceptible de escurrirse o lixivarse a las aguas subterráneas o superficiales (produciendo eutrofización), o de perderse en forma gaseosa (Doberman y Cassman, 2005; Kant et al., 2011). Si bien es cierto que, desde una visión productivista, la obtención de mayores rendimientos se hace posible mediante la aplicación de N al suelo, es necesario contar con herramientas que promuevan un manejo de la fertilización que no atente contra la sustentabilidad del ambiente (Cassman et al., 2002; Snyder, 2010). Precisamente, la agricultura de precisión permite el manejo diferencial a escala de parcela según la variabilidad existente en la misma (Urricariet y Zubillaga, 2013). La delimitación de ambientes a escala de lote y la recomendación de N a cada unidad permite la implementación del manejo específico por sitio de la fertilización (Schmidt et al., 2007).

Los objetivos planteados en el siguiente estudio fueron cuantificar la variabilidad existente en las emisiones de GEI según diferentes dosis de

aplicación de N en maíz, a partir de la metodología de cálculo del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2006) y, a su vez como dichas emisiones son afectadas por la interrelación de la dosis con la diferenciación de ambientes productivos a escala de lote.

Materiales y métodos

Ubicación geográfica del ensayo

La experimentación fue conducida en la localidad de Vedia (provincia de Buenos Aires), perteneciente a la Pampa Arenosa, en 3 lotes subdivididos en 3 ambientes productivos, caracterizados por la heterogeneidad en su contenido de arena y materia orgánica (MO). La variabilidad intralote de los suelos corresponde a su ubicación topográfica en el paisaje: Hapludoles énticos en las partes altas del lote y Hapludoles típicos en las zonas más bajas y cóncavas. Por lo tanto, queda conformada la unidad experimental por tres ambientes productivos: baja (B), media (M) y alta (A) ubicados en la loma, media loma y pie de loma, respectivamente. Los ambientes de baja productividad tuvieron contenidos de arena de aproximadamente 72%, y los ambientes más productivos tuvieron contenidos promedio de arena del 52% (Urricariet et al., 2011; Redel y Zubillaga, 2014). La delimitación de ambientes fue a través de análisis de imágenes satelitales LANDSAT y mapas de rendimientos.

Se sembró, a principios de octubre, el híbrido 'Dekalb 692 VT triple PRO', con a 5, 7 y 8.5 semillas m⁻² para B, M y A, respectivamente, a 0.525 m entre hileras y bajo siembra directa en los 3 lotes. Se aplicó una fertilización de base de 150 kg superfosfato triple (0-20-0) ha⁻¹. Se fertilizó cada ambiente con N en franjas con 0 (N0), 60 (N60) y 120 (N120) kg N ha⁻¹ en forma de UAN (32-0-0) cuando el maíz tenía 4 hojas completamente expandidas (V4).

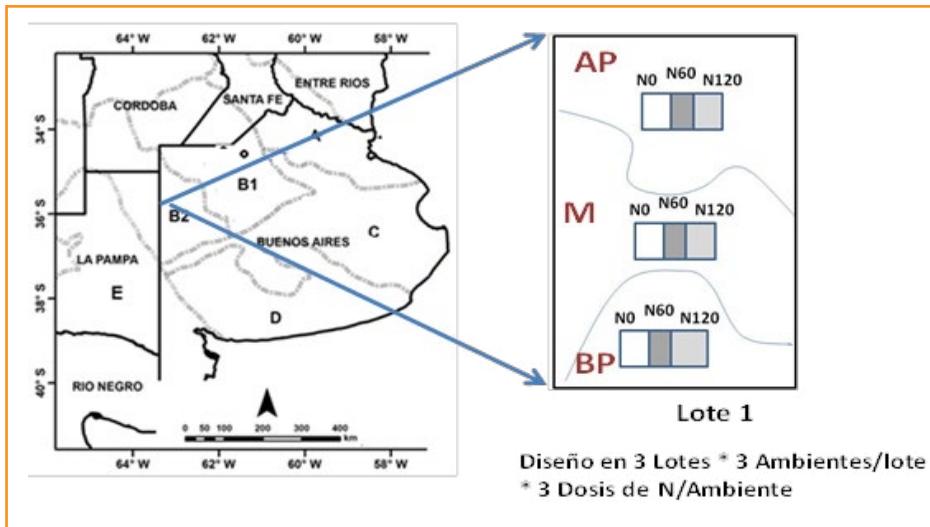


Figura 1. Ubicación geográfica de la experimentación y diseño del ensayo. AP: Alta productividad, M: media productividad, BP: baja productividad.

Determinaciones de GEI

Las emisiones se calcularon en toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO₂) por unidad de superficie y por tonelada de grano producido. El factor de conversión de N₂O a CO₂ fue 310 según el inventario nacional (IPCC, 2006). Para el cálculo, fueron aplicados los factores de emisión del IPCC (IPCC, 2006) sobre los datos de biomasa aérea, dosis de N y N vegetal por tratamiento para todos los sitios experimentales.

Emisiones directas:

$$N-N_2O = (DF + \Delta \text{Residuos agrícolas}) * FE_d \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

DF: dosis anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético (kg N ha⁻¹).

Δ Residuos agrícolas: Incremento de la cantidad anual de N de los residuos agrícolas (aéreo y subterráneo) por efecto de la fertilización nitrogenada (kg N ha⁻¹).

FE_d: factor de emisión por defecto de los aportes de N fertilizantes minerales y residuos agrícolas (=0.01).

Emisiones indirectas:

$$N-N_2O \text{ (volatilización)} = (DF * F_{vol}) * FE_{vol} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

DF: dosis anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético (kg N ha⁻¹).

F_{vol}: fracción de N de fertilizante sintético que se volatiliza como NH₃ y NO_x, kg de N volatilizado (= 0.1, o sea el 10% del N aplicado).

FE_{vol}: factor de emisión para emisiones de N₂O por volatilización (=0.01).

$$N-N_2O \text{ (lixiviación)} = (DF + \Delta \text{Residuos agrícolas}) * F_{lix} * FE_{lix} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

DF: dosis anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético (kg N ha⁻¹).

Δ Residuos agrícolas: incremento en la cantidad anual de N en los residuos agrícolas (aéreo y subterráneo) por efecto de la fertilización nitrogenada (kg N ha⁻¹).

F_{lix}: Fracción de N del fertilizante al sistema perdido por lixiviación y escurrimiento (=0.30).

FE_{lix}: factor de emisión para emisiones de N₂O por lixiviación y escurrimiento de N (=0.0075).

Resultados y discusión

Los rendimientos a escala intralote se relacionaron con el factor ambiente (p= 0.006, DMS= 2200 kg ha⁻¹) y la dosis de N (p=0.027; DMS= 1420 kg ha⁻¹). No hubo interacción entre ambiente y dosis de N (p= 0.75). Los rendimientos promedios por ambiente fueron 4314, 7919 y 11409 kg grano de maíz ha⁻¹ para B, M y A, respectivamente. Los rendimientos promedios por dosis de N fueron 6637, 8196 y 8809 kg de grano de maíz ha⁻¹ para N0, N60 y N120 kg N ha⁻¹, respectivamente. El ambiente de alta productividad presentó mayores rendimientos al aumentar la dosis de N. Por otro lado, los ambientes M y B no evidenciaron respuestas importantes al agregado del N (**Figura 2**).

Las emisiones totales en t eq CO₂ ha⁻¹ se relacionaron significativamente con el ambiente

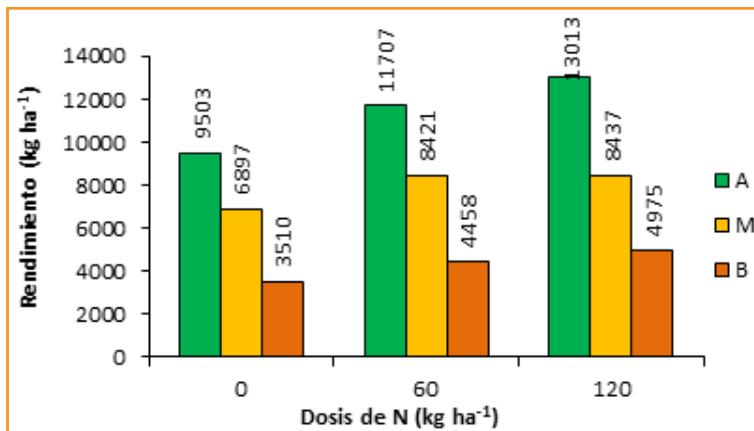


Figura 2. Efecto de la dosis nitrogenada aplicada sobre el rendimiento según los distintos ambientes. A: Alta productividad, M: Media productividad, B: Baja productividad.

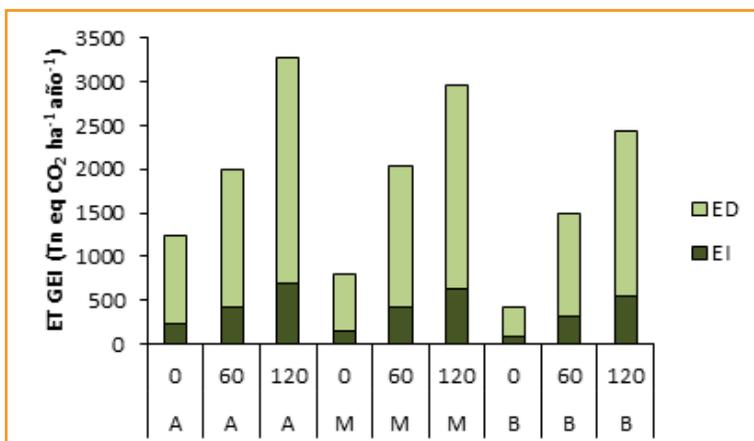


Figura 3. Emisiones totales de GEI en la interacción dosis y ambiente. ED: Emisiones directas, EI: Emisiones indirectas.

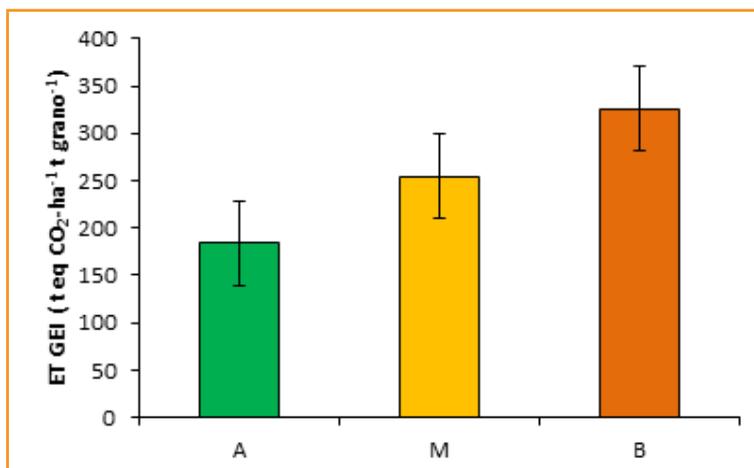


Figura 4. Valores medios de emisiones totales por tonelada de grano de maíz producido por ambiente. Barras verticales indican error estándar de la media. A: Alta productividad, M: Media productividad, B: Baja productividad.

($p=0.003$; $DMS=170$ t eq CO_2 ha $^{-1}$), siendo de 1457, 1930 y 2166 t CO_2 ha $^{-1}$ para B, M y A, respectivamente. Todos los ambientes mostraron aumentos de las emisiones totales de GEI con la dosis de N, con registros de 817, 1845 y 2890 t eq CO_2 ha $^{-1}$ para las dosis N0, N60 y N120, respectivamente ($p=0.000$; $DMS=200$ t eq CO_2 ha $^{-1}$). No hubo interacción entre dosis N x ambiente para las emisiones totales. Cabe señalar que las emisiones directas representaron aproximadamente el 80% de las emisiones totales en todos los tratamientos (**Figura 3**). La mayor cantidad de rastrojo producido en A se relaciona principalmente con estos resultados.

Sin embargo, cuando las emisiones GEI son estimadas en relación a la producción de granos los ambientes de mayor productividad tuvieron menor impacto relativo. Las emisiones totales por t producida de grano en el ambiente de baja productividad fueron en promedio un 77% mayores que el ambiente de alta productividad (**Figura 4**).

Las emisiones totales de GEI en la interacción dosis N x ambiente demuestran la mayor capacidad de los ambientes más productivos en la captación del N aplicado y por lo tanto se disminuyen sus emisiones. En la **Figura 5** se muestra que aunque aumente la dosis de fertilizante nitrogenado aplicado en los ambientes A, las emisiones siguen siendo considerablemente inferiores a las emisiones en los ambientes de B a partir de la dosis de N60.

Por los resultados expuestos, se propone expresar las emisiones GEI en función de la producción de granos (t eq CO_2 ha $^{-1}$ t grano $^{-1}$) debido a que contemplaría la mayor eficiencia de recuperación de N aplicado. De esta forma, el ambiente más productivo resultaría el de menor aporte relativo a las emisiones GEI. En este sentido, la mayor productividad supone mayor

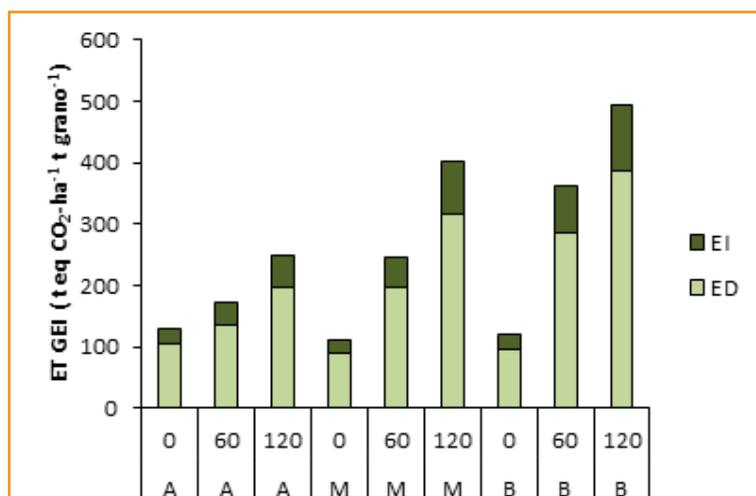


Figura 5. Valores medios de las emisiones totales por tonelada de grano de maíz producido por ambiente y por dosis. EI: Emisiones indirectas, ED: Emisiones directas.

biomasa vegetal con capacidad de absorber del suelo mayor proporción del N aplicado, teniendo entonces la productividad un efecto no considerado en el cálculo anterior: hay menor riesgo de contaminación por emisiones GEI por unidad de producción (kg maíz en este caso), por mayor eficiencia de recuperación del N.

Conclusiones

La agricultura de precisión puede ser considerada como una práctica conservacionista por adecuar la fertilización del ambiente con lo requerido realmente por éste. Por ello, es importante evaluar la heterogeneidad de los lotes y aportar un manejo diferencial en la escala intralote para lograr una mayor eficiencia del sistema. A su vez, resulta apropiado realizar las estimaciones de GEI expresadas según la productividad del ambiente considerado. De esta forma, la mayor capacidad de utilización del N aplicado en ambientes más productivos resultaría en menores emisiones de GEI por unidad producida de grano o biomasa.

Bibliografía

Cassman, K.G., A. Dobermann, y D. Walters. 2002. Agroecosystems, N use efficiency and N management. *Ambio*. 31:132-140.
 Environmental Protection Agency (EPA). 2009. United States greenhouse gases inventory report, <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/isinevmtoyreport.html> (último acceso Marzo 2015).
 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. Emisiones de N₂O de los suelos gestionados y

emisiones de CO₂ derivadas de la aplicación de cal y urea. En: HS Eggleston, L Buendia, K Miwa, T Ngara, K Tanabe (Eds.), Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero [IGES, Japón, 56 pp].

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change [WMO-UNEP, Geneve, Suiza]. Agro: Tecnología y Sustentabilidad. Pp.287-292. [Buenos Aires, Argentina].

Kant, S., Bi, y S.J. Rothstein. 2011. Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. *J Exp Bot.* 62 (4): 1499-1509.

Muschietti, M.P., y M.M. Zubillaga. 2014. Agricultura de precisión y GEI: Efecto de la fertilización nitrogenada. In Suelos, producción agropecuaria y cambio climático. Pp 486-498. Ed: Pascale, Taboada, Zubillaga.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 1ª ed., Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Redel, H.M., y M.M. Zubillaga. 2014. Aproximaciones para el manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada en maíz a través de índices espectrales. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. Sept.2014. Versión Cono Sur: 15-21.

Schmidt, J.P., N. Hong, A. Dellinger, D,B, Beegle, y H. Lin. 2007. Hillslope Variability in Corn Response to Nitrogen Linked to In-Season Soil Moisture Redistribution. *Agron J.* 99: 229-237

Snyder, C.S. 2010. Fertilizer Management to Reduce GHG Emissions. Presented to the Nicholas Institute Technical Working Group on Greenhouse Gases (T-AGG): Experts Meeting Chicago [Illinois, Estados Unidos].

Urricariet, S., y M.M. Zubillaga. 2013. Manejo de la fertilización por ambientes. En: R Alvarez, P Prystupa, MB Rodríguez & CR Alvarez (Eds). Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía [Buenos Aires, Argentina, 623 pp].

Urricariet, S., Niborski, M., y C.M Kvolek. 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ciencia del Suelo* 29: 49-59.

Vázquez Amabile, G., M. Gonzalo, M. Pella, G. Cueto, y S. Galbusera. 2013. Nutrición y agricultura por ambientes: Avances en el sur de Buenos Aires. En: FO García & AA Correndo (Eds.). Simposio Fertilidad 2013: nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable, 1a ed., pp. 104-111. International Plant Nutrition Institute [Buenos Aires, Argentina].

Zubillaga, M.M., y H. Rimski-Korsakov. 2014. Fertilización nitrogenada y gases de efecto invernadero en cultivos extensivos de agroecosistemas pampeanos. In Suelos, producción agropecuaria y cambio climático. Pp 137-155. Ed: C. Pascale, M. Taboada, M. Zubillaga. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 1ª ed., Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de sorgo granífero en el sudoeste chaqueño

M.V. Sauer¹, D.M. González²; J. Pietrowicz² y M. Irrazabal²

¹Investigadora EEA INTA Las Breñas, ²Becarios del Programa de Entrenamientos Laborales 2016.

*Contacto: sauer.mariana@inta.gob.ar

Introducción

El sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench) es uno de los principales cultivos a nivel mundial, cuyo destino más importante es el consumo humano y animal. Es una gramínea de origen tropical que ha sido adaptada, mediante selección, a las regiones templadas del mundo. Se cultiva tanto en regiones semiáridas, como en áreas de grandes precipitaciones, con buenos rendimientos y seguridad de cosecha en ambos casos. (Agroalimentos argentinos, 2005).

En Argentina, el sorgo posee una amplia región ecológica para su cultivo, aprovechando su adaptación a una gran diversidad de ambientes a través del mejoramiento genético, siendo considerado uno de los cultivos mundiales de seguridad alimentaria que se extiende aproximadamente entre los 22° y 40° Latitud Sur y delimitada hacia el Oeste por la isohieta de 500 mm de precipitación anual. El límite austral del cultivo está dado por la isoterma media anual de 14°C (Jimenez, 2014).

El sorgo es un cultivo que presenta ventajas agronómicas en algunas zonas del país como el sudoeste chaqueño, considerado como una buena alternativa para diversificar riesgos y obtener planteos de rotación asegurando buena cobertura bajo siembra directa, asignándoles otros usos como pastoreo directo o consumo diferido.

Otros de los beneficios de este cultivo considerado de gran comportamiento agronómicamente, por la alta producción con un menor consumo de agua respecto a otros cereales primavero-estivales, que garantiza producir con un mínimo de 250 mm de agua durante su ciclo, con un óptimo comprendido entre los 400-550 mm.

En las últimas campañas ha recuperado superficie frente a otros cultivos, como el caso de la soja, por mejora en la competitividad en el mercado dado por menor costo de implantación, rusticidad, tolerancia a falta de agua, usos no convencionales, adaptación a suelos de inferior calidad, en otros, (Agroalimentos argentinos,

2005), además de la mejora en los rendimientos pasando de rindes de 3000 kg ha⁻¹ en el año 1950, llegando a rangos entre 6000-10 000 kg ha⁻¹ en la última década.

Es fundamental que el suelo tenga una adecuada humedad en el momento de la siembra para lograr una emergencia rápida y homogénea y con ello lograr una buena implantación del cultivo. Las mayores exigencias en agua comienzan unos 30 días después de emergencia y continúan hasta el llenado de los granos, siendo las etapas más críticas las de panojamiento y floración, puesto que deficiencias hídricas en estos momentos producen mermas en los rendimientos. Aunque este cultivo tiene la capacidad de permanecer latente durante un periodo de sequía y reemprender su crecimiento en periodos favorables, pero estas situaciones de estrés modifican su comportamiento y pueden repercutir en el rendimiento.

Si bien el cultivo presenta buena respuesta al stress hídrico, una adecuada capacidad de retención hídrica del suelo es necesaria para la obtención de altos rendimientos. La disponibilidad hídrica del suelo y el nivel de fertilidad serán factores de incidencia para lograr altos rendimientos. Cuanto mejores sean las condiciones ambientales será necesaria una buena disponibilidad de nitrógeno.

La disponibilidad de nutrientes para el cultivo depende de distintos factores entre los que destacan el tipo de suelo, las rotaciones, el cultivo antecesor, los sistemas de labranza y las condiciones ambientales. Es fundamental contar con un buen diagnóstico del lote destinado a la siembra, a través de un análisis de suelo, y tener presente la historia agrícola del lote, esto constituye la herramienta principal para definir una correcta fertilización.

Entre los macronutrientes primarios que el cultivo de sorgo necesita están: el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K), y los macronutrientes denominados secundarios serían: el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y el azufre (S). El cultivo posee un alto requerimiento de N (30 kg N tn⁻¹ de grano

producido; Ciampitti y García, 2007) y en numerosos trabajos realizados en diferentes regiones de la Argentina se han registrado respuestas positivas al agregado de este nutriente (De Battista et al., 2010; Fontanetto et al., 2010; Zamora et al., 2010). Uno de los nutrientes que mayor deficiencia presentan los suelos de la región es el N, siendo para los demás nutrientes la disponibilidad de media a alta, sin que esto signifique considerar la reposición de los mismos para evitar pérdida a través de la exportación que hacen los granos a través de la agricultura continua.

Además de la utilización de fertilizantes químicos, el empleo de microorganismos promotores de crecimiento, es una posibilidad que cuenta el productor para mejorar el rendimiento. En este último caso, el costo que tiene su aplicación es relativamente pequeño, comparado con cualquier otra práctica que implique desembolsar dinero, alcanzándose normalmente un retorno económico (peso ganado/peso invertido), difícil de ser logrado con otras prácticas. Al respecto se ha experimentado con promotores de crecimiento en sorgo, estas demuestran la buena respuesta del cultivo frente al agregado de promotores de crecimiento, específicamente *Azospirillum* y *Pseudomonas* (Cáceres et al., 2011).

Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en la EEA INTA Las Breñas (61° 05' 20" LW; 27 06' 20" LS), las condiciones climáticas que caracterizan la zona son un régimen de precipitaciones y térmico subtropical subhúmedo, con una precipitación media anual promedio entre los últimos años de 971.66 mm, con una temperatura media anual de 21° C (Herrera y Leiva, 2008). Implantado sobre suelos de la Serie Tizón (Haplustol óxico), familia limosa fina, mixta, hipertérmica, poco evolucionado, de textura pesada, sus problemas principales son erosión hídrica moderada, drenaje imperfecto. Moderadamente pobre en materia orgánica; medianamente alta capacidad de retención de agua hasta los 160 cm de profundidad estudiados; profundidad efectiva de 1 m, alto contenido de P; débilmente ácido en superficie y ligeramente alcalino en profundidad; rico en calcio y magnesio, muy rico en potasio; moderadamente alta capacidad de intercambio de cationes; alto porcentaje de saturación de bases (Ledezma y Zurita, 1994).

El diseño experimental del ensayo se correspondió a bloques completos al azar con cuatro repeticiones, el tamaño de las unidades experimentales era de 62.4 m². Se realizaron los muestreos de suelo antes de la siembra y en estado V10 del cultivo, para determinar el estado nutricional de los mismos, y se cuantificó también el contenido de humedad gravimétrica hasta los 100 cm de profundidad al momento de la siembra, acompañado de los registros de precipitaciones durante el ciclo de cultivo. Se utilizó la escala fenológica de Vanderlip para describir los estados de crecimiento y desarrollo del cultivo.

Se sembró el híbrido Malón, a una densidad de 13 semillas por metro lineal, y una distancia entre hileras de 0.52 m, el 13 de enero de 2015. Se definieron 8 tratamientos según diferentes combinaciones de dosis de N y momento de aplicación (**Tabla 1**). La fuente nitrogenada utilizada fue urea (46-0-0). La aplicación del fertilizante se realizó al costado y por debajo de la línea de siembra. A fines de asegurar la suficiencia de azufre (S), todas las parcelas fueron fertilizadas con 15 kg S ha⁻¹ (como sulfato de calcio) aplicados en cobertura total antes de la emergencia del cultivo.

La cosecha se efectuó en forma manual, recolectándose 2 m lineales en surcos apareados, por cada unidad experimental. El material recolectado fue trillado en una cosechadora estacionaria, limpiado, pesado, registrado la humedad y llevado los datos a kg ha⁻¹ a humedad de recibo. Posteriormente, se realizó un análisis de variancia y al ser significativa la misma, se compararon las medias mediante el test de Duncan para la diferencia mínima significativa ($p < 0.05$) (**Figura 1**).

Tabla 1. Tratamientos de fertilización nitrogenada ensayados en sorgo granífero. Campaña 2015/16. EEA INTA Las Breñas.

Tratamiento	Dosis de N (kg ha ⁻¹)	Momento de aplicación		
		Siembra	v6	v10
1	0	0	-	-
2	60	60	-	-
3	120	120	-	-
4	180	180	-	-
5	240	240	-	-
6	120	-	120	-
7	120	60	60	-
8	120	60	-	60

Como puede observarse en la tabla de rendimientos, los tratamientos que resultan estadísticamente significativos son el Testigo y T4, mientras que T2, T3 y T8 también muestran una respuesta positiva ante aplicación de dosis de N. Se aprecia que en el T5 el rendimiento decae pudiendo deberse a sobredosis del elemento, mientras que el T6 es el que muestra la respuesta más baja respecto del testigo, indicando que para un año con condiciones ambientales como las que tuvieron lugar en la campaña agrícola en estudio, la diferencia clara esta en agregado a la siembra, y combinado a la siembra y reposición en V6 y V10, que el agregado sólo en V6. Estos resultados pueden visualizarse mejor en la **Figura 1**.

En general se puede observar que en todos los tratamientos que recibieron fertilización nitrogenada adicional obtuvieron respuestas positivas respecto del tratamiento testigo. Estos datos coinciden con los obtenidos por Garcia et al., 2001, quien halló mejores respuestas con 120 kg de N. Otros resultados similares fueron encontrados por Zamora et al., 2010, en la zona sur de la provincia de Buenos Aires, y por Fontanetto et al. (2008, 2010), quienes reportaron que una oferta inicial de N cercana a los 130 kg ha⁻¹ permitió alcanzar rendimientos de sorgo de 8-10 tn grano ha⁻¹ en la zona central de Santa Fe.

Conclusión

El cultivo de sorgo muestra muy buena respuesta al agregado de fertilizantes nitrogenados en el área de estudio, sin embargo es necesario ajustar los momentos de aplicación, pues queda manifiesto que cuando las condiciones ambientales no son restrictivas para el cultivo se obtienen respuestas favorables con aplicaciones a la siembra, y combinadas en estadios vegetativos.

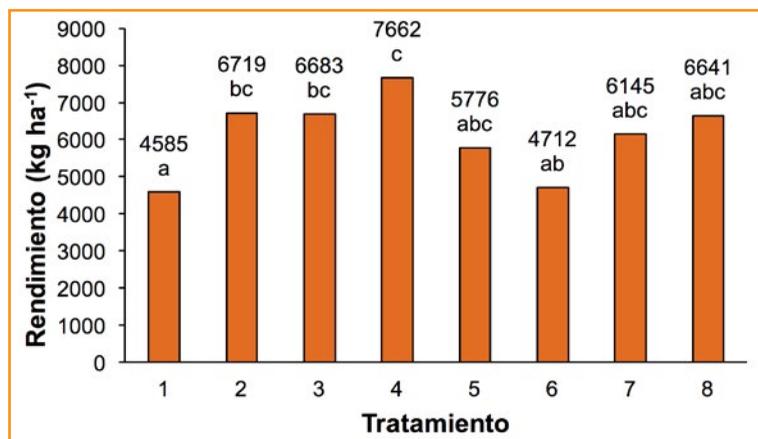


Figura 1. Rendimiento de sorgo granífero para los diferentes tratamientos de dosis y momento de fertilización con N. Campaña 2015/16. EEA INTA Las Breñas.

Bibliografía

AACREA. 2005. Agroalimentos argentinos II. Compilación y análisis del área de economía de AACRA. CABA, Argentina. 284 pp.

Cáceres Díaz, R. O., Sauer V. y N. Nadal. 2011. Respuesta a la fertilización nitrogenada y promotores de crecimiento en sorgo granífero para la región Suroeste de la provincia de Chaco. REBIOS. VIII Reunión Nacional Científico Técnico de Biología. 6 al 8 de Julio de 2011. Salta, Argentina.

Ciampitti, I.A. y F.O. García. 2007. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I. Cereales, oleaginosos e industriales. Archivo Agronómico No. 11. Informaciones Agronómicas del Cono Sur 33:13-16.

De Battista, J.J., A.C. Alaluf, N.M. Arias, y M. Castellá. 2010. Efecto del nitrógeno sobre el crecimiento y rendimiento de sorgo granífero *Sorghum bicolor* (L.) Moench. En: Actas IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo, pp. 408-410. Rosario, Santa Fe, 17-19 de noviembre de 2010. AIANBA, Pergamino, Argentina.

Ferrari, M., L.A. Rivoltella y J.M. Casado. 2012. Diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización nitrogenada en sorgo granífero. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16-20 de Abril de 2012, Mar del Plata, Argentina.

Fontanetto, H., O. Keller, L. Belotti, C. Negro, y D. Giailevra. 2010. Efecto de diferentes combinaciones de nitrógeno y azufre sobre el cultivo de sorgo granífero (campaña 2008/09). Informaciones Agronómicas del Cono Sur 46:21-23.

García, P.A., A.R. Ferrero y M. Goujon. 2001. Fertilización nitrogenada en siembra directa de sorgo. Resumen A-006. RCCyT FCA, UNNE. 2 pp.

Herrera, G., y M. Leiva. 2007. Boletín agrometeorológico anual 2007. (Temperaturas y Precipitaciones. Estación Agrometeorológico "Delfino Juan Palaoro". Edición digital. 2008.

Jimenez, O. 2014 En: El Cultivo de sorgo granífero en la Provincia del Chaco. Sauer, M.V. Coord. Técnica. Ed. INTA. ISBN: 978-987-521-619-8. 41 pp

Ledesma, L.L., y J.J. Zurita. 1994. Los suelos del departamento 9 de Julio (Chaco). Convenio entre el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Gobierno de la Provincia del Chaco por intermedio de Ministerio de Agricultura y Ganadería. Programa Estudio y Extensión en Suelos de la Provincia del Chaco. SAGPyA - Estimaciones agrícolas: www.sagpya.gov.ar. Acceso: 20/09/2015

Ventimiglia, L. y L. Torrens Baudrix. 2013. Dosis de inoculante y complementación de *Bradyrhizobium* con BPCV en soja. *Agromercado* 177:14-17.

Zamora, M., A. Melin y S. Balda. 2010. Fertilización con nitrógeno y azufre en sorgo granífero en el centro de Buenos Aires. En: Actas IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo, pp. 444-446. Rosario, Santa Fe, 17-19 de noviembre de 2010. AIANBA, Pergamino, Argentina. ●

Condición hidrofísica y química de un suelo Haplustol éntico tratado con zeolita y residuos de feed lot

Martín Torres Duggan^{1,2,*}, Mónica B. Rodríguez², Filipe Behrends Kraemer^{2,3}, Patricia L. Fernández², Liliana Castro^{2,4} y Pablo Leal⁴

¹Tecnoagro, 2 UBA, Facultad de Agronomía. Dpto. de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra; ³INTA Castelar,

⁴UBA. FCEN. Dpto de Cs. Geológicas-IGEBA

*Contacto: torresduggan@tecnoagro.com.ar

Introducción

Los residuos orgánicos de feed lot (F) representan un recurso sumamente valioso para mejorar la fertilidad del suelo y aportar nutrientes esenciales a las plantas, principalmente nitrógeno (Herrero, 2014). La acumulación de este tipo de materiales y los riesgos ambientales derivados se han incrementado marcadamente en los últimos tiempos debido a la expansión de los sistemas intensivos de producción de carne o leche. Así, existen evidencias de procesos de contaminación del suelo, agua y aire en los propios sistemas de producción como así también en el área donde se aplican (Herrero y Gil, 2008).

Por otro lado, el uso de minerales en general, y de la zeolita (Z) en particular ha crecido en los últimos tiempos y se considera una de las innovaciones tecnológicas más destacadas para ser aprovechada en el ámbito agropecuario con fines de mejoramiento de la fertilidad de los suelos y la eficiencia de uso de recursos abióticos como agua y nitrógeno (N), principales factores limitantes de la productividad vegetal (De Campos Bernardi et al., 2013; Van Straaten, 2014; Herrmann y Torres Duggan, 2016). Dentro del grupo de las zeolitas naturales, la serie heulandita/clinoptilolita se considera especialmente importante por su abundancia en la naturaleza, capacidad de retención específica de amonio y de liberación progresiva de N a las plantas. Este mecanismo permite aumentar la asimilación de N en la biomasa vegetal y reducir pérdidas de N fuera del sistema suelo-planta, aumentando la eficiencia de uso del N aplicado a través de los abonos orgánicos, mitigando el impacto ambiental del N aplicado (Ramesh y Reddy, 2011).

La formulación conjunta de Z y F resulta en enmiendas órgano-zeolíticas (EOZ) que poseen buen potencial de aplicación en el ámbito local, teniendo en cuenta la disponibilidad de rocas portadoras de Z en yacimientos de la Argentina, como así también de una creciente generación de estiércoles y efluentes derivados de los siste-

mas intensivos de producción de carne y leche. Dichos efluentes, en términos generales, no son aprovechados como recursos dentro de los agroecosistemas, sino que representan un pasivo ambiental. Los mayores beneficios esperados de la aplicación de EOZ en agro-ecosistemas se presentan en suelos arenosos, caracterizados por bajos contenidos de MO, reducida CIC y muy baja capacidad de retención de agua. Estos suelos ocupan extensas áreas del territorio argentino tanto en zonas de secano como irrigadas (Duran et al., 2011; Panigatti, 2014). Sin embargo, la generación de tecnologías de manejo de Z, F y EOZ requiere de investigaciones básicas que permitan contribuir con nuevo conocimiento sobre las propiedades y funcionamiento de las enmiendas en el suelo. Por ello, en este trabajo se evalúa la viabilidad del uso de estas enmiendas en sistemas agropecuarios analizando dos aspectos: (1) los efectos sobre de la aplicación de Z, F y EOZ sobre la retención y disponibilidad de agua edáfica y (2) los cambios en propiedades químicas y físico-químicas del suelo.

Materiales y métodos

Se realizaron dos tipos de estudios. En primer lugar, se formularon diferentes combinaciones de suelo con Z y F en un gradiente de succión mátrica para evaluar los cambios en la retención hídrica. En segundo lugar, se realizó un experimento en invernáculo donde se cultivó raigrás perenne (*Lolium perenne* L) y al final del ensayo se midieron los cambios en el pH, CE y CIC derivadas del agregado individual o combinado de Z y F.

Características del suelo

El suelo utilizado correspondió a un Hapludol éntico, serie Ameghino (**Tabla 1**). Luego de la extracción del suelo en el campo, el mismo se procesó en laboratorio utilizando metodologías de rutina. Así, el suelo se homogeneizó, secó en

estufa a 40°C y tamizó por 2 mm. Se determinó: pH (potenciometría), CE (conductimetría), COT (Walkley y Black), N total (Kjeldahl), P extractable (Bray 1, cuantificación colorimétrica) según lo descrito en Sparks et al. (1996). Asimismo se cuantificó la concentración de nitratos en suelo por la técnica de diazotación con Snedd (Marban, 2005), amonio, CIC y cationes intercambiables (Richter et al., 1982). El fraccionamiento granulométrico (textura) se realizó según la metodología descripta en Ashworth et al. (2001). La medición de las constantes hídricas se realizó utilizando el método de Richards (1965).

Tabla 1. Principales propiedades del suelo.

Analisis/propiedad	Unidad	Valor
Propiedades químicas y físico-químicas		
pH	-	6.4
CE en extracto de saturación	dS m ⁻¹	0.1
COT	g kg ⁻¹	6.0
MO	g kg ⁻¹	10.3
Nt	g kg ⁻¹	0.75
Relación C/N		8.0
P extractable	mg kg ⁻¹	29.2
Ca intercambiable	cmolc kg ⁻¹	4.9
Mg intercambiable	cmolc kg ⁻¹	1.0
K intercambiable	cmolc kg ⁻¹	1.2
Na intercambiable	cmolc kg ⁻¹	0.03
Saturación cálcica	%	79.0
Saturación magnésica	%	17.3
Saturación potásica	%	19.4
Saturación sódica (PSI)	%	0.5
CIC	cmolc kg ⁻¹	6.2
N-NO ₃ ⁻	mg kg ⁻¹	2.6
N-NH ₄ ⁺	mg kg ⁻¹	3.9
Fraciones granulométricas		
Arena	%	75.5
Limo	%	13.0
Arcilla	%	11.5

Características de la zeolita natural y del residuo de feed lot

La Z utilizada provino de yacimientos de la Cuenca de Paganzo (La Rioja). Con el fin de clasificar la roca portadora de la Z y la composición mineralógica de ésta, se integraron diferentes metodologías, como difracción de rayos X (DRX), análisis petrográficos en secciones delgadas de 30 µm y microscopía electrónica de barrido (SEM, EDS). Los resultados de los análisis por DRX de las rocas portadoras de Z (tobas vítreas) indicaron que la mismas están formadas mayoritariamente de Z de la serie Heulandita/clinoptilolita, en concordancia con los análisis químicos efectuados en diferentes secciones de las rocas (EDS) en el laboratorio de Microscopía Avanzada (CMA) de la FCEN de la UBA. En la mayor parte de las muestras analizadas, la relación Si/Al fue superior a 4, con un máximo de 4.3, valores considerados dentro del rango típico de la clinoptilolita (Russo et al., 2015). Los constituyentes minoritarios detectados en los análisis por DRX fueron plagioclasas, con contenidos accesorios de feldespato potásico, sin detectarse la presencia de filosilicatos. En la **Tabla 2** se presenta la composición química, CIC, pH, pérdida de calcinación y densidad aparente de la Z.

Tabla 2. Propiedades químicas, físicas y físico-químicas de la zeolita utilizada.

Elemento	%
SiO ₂	70.94
Al ₂ O ₃	12.41
F ₂ O ₃	2.20
TiO ₂	0.22
P ₂ O ₅	0.02
MnO	0.02
CaO	2.39
MgO	0.67
K ₂ O	1.32
Na ₂ O	1.9
SO ₃	<0.01
pH (relación Z/agua 1:10)	9.5
CIC (meq g ⁻¹)	1.49 (+/-0.01)
Pérdida de calcinación a 1000°C	7.84
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0.92

El F utilizado en los diferentes estudios se obtuvo en un establecimiento de feed lot, tomado como barrido de corral. Para el análisis de las muestras se utilizaron métodos estándar de laboratorio, cuyos resultados se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Principales características químicas y físico-químicas del residuo de feed lot (F).

Analito/propiedad	Unidad	Valor
pH	-	7.8
CE	dSm ⁻¹	15.1
MO	g kg ⁻¹	160.4
C	g kg ⁻¹	70.5
Humedad	%	20
N	g kg ⁻¹	6.9
P	g kg ⁻¹	4.9
Na	g kg ⁻¹	1.5
K	g kg ⁻¹	8.6
Ca	g kg ⁻¹	7.2
Mg	g kg ⁻¹	2.8
S	g kg ⁻¹	2.3
B	mg kg ⁻¹	33
Fe	mg kg ⁻¹	9484
Mn	mg kg ⁻¹	422
Cu	mg kg ⁻¹	64
Zn	mg kg ⁻¹	159
C/N	-	10.2
N-NO ₃ ⁻	mg kg ⁻¹	0.45
N-NH ₄ ⁺	mg kg ⁻¹	42
Densidad aparente	g cm ⁻³	0.95

Evaluación de la retención hídrica gravimétrica en condiciones de laboratorio

Se formularon diferentes combinaciones del suelo natural (testigo o T) y sus combinaciones con F, Z o ambas: suelo + F (SF); suelo + Z (SZ); suelo + F + Z (SZF) en recipientes de 500 cm³. (**Tabla 4**).

Tabla 4. Niveles de dosis de Z y F evaluadas para medir los cambios en la retención y disponibilidad de agua edáfica

Enmienda	Nivel de dosis	Dosis	Unidad
Z	1	25	g kg ⁻¹
	2	50	g kg ⁻¹
	3	75	g kg ⁻¹
	4	100	g kg ⁻¹
F	1	5	Mg ha ⁻¹
	2	10	Mg ha ⁻¹
	3	20	Mg ha ⁻¹

En condiciones de laboratorio, los diferentes materiales fueron tamizados por 2 mm y secados en estufa a 40°C. Luego se determinó la retención de agua en cinco niveles de succión mátrica: 33, 100, 500, 750 y 1500 kPa utilizando la metodología de Richards (1965). En base a los valores de las constantes hídricas de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) se calculó el contenido de agua útil (AU) y agua fácilmente disponible (AFD), según las ecuaciones (1) y (2):

$$AU = HG_{cc}(\psi = -33 \text{ kPa}) - HG_{PMP}(\psi = -1500 \text{ Kpa}) \quad \text{Ec. 1}$$

$$AFD = HG_{CC}(\psi = -33 \text{ kPa}) - HG(\psi = -200 \text{ Kpa}) \quad \text{Ec. 2}$$

Con el fin de generar las curvas características de retención hídrica, los datos de humedad gravimétrica obtenidos en los diferentes niveles de succión mátrica, incluyendo la succión en saturación (i.e. 0Kpa), se ajustaron al modelo de retención hídrica de van Genuchten (1980) mediante la ecuación (3), considerando la restricción $m = 1 - 1/n$ (Mualen, 1986). Para ello se utilizó el programa RETC (van Genuchten et al., 1991), obteniéndose en todos los casos una estimación de los parámetros del modelo con un R2 mayor a 0,89.

$$\theta_g = (\theta_{gs} - \theta_{gr}) [1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{gr}; h \geq 0; h \text{ en cm} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde,

θ_g es el contenido de agua gravimétrica.

θ_{gs} es el contenido de agua gravimétrica en saturación.

θ_{gr} es el contenido de agua gravimétrica residual.

h es el potencial mátrico en columna de agua.

α , m y n son parámetros empíricos de ajuste de la curva de retención hídrica.

El modelo de van Genutchen ha sido seleccionado entre diferentes modelos para generar funciones de ajuste ya que, además de ser ampliamente utilizado y conocido, se dispone del software RETC de uso libre, mencionado previamente (Reynolds et al., 2009).

Experimento en invernáculo

Se realizó un experimento en invernáculo durante 105 días donde se cultivó raigrás perenne (*Lolium perenne* L.) en macetas plásticas de 17 cm de diámetro, utilizando una densidad de siembra de 4 g de semilla maceta⁻¹. Durante el mismo se realizaron diferentes cortes de biomasa y luego del último corte se realizaron análisis químicos y físico-químicos del suelo tendientes a evaluar los efectos de las enmiendas agregadas en el momento de la siembra.

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron seis tratamientos, utilizando un diseño en bloques completamente aleatorizados (DBCA) (Tabla 5).

Tabla 5. Tratamientos evaluados y dosis de enmiendas utilizadas en la formulación de los mismos

Tratamiento	Formulación	Dosis de enmiendas
1	Testigo (suelo sin tratar)	-
2	SZ	50 g kg ⁻¹ de Z
3	SF1	10 Mg ha ⁻¹ de F
4	SF2	20 Mg ha ⁻¹ de F
5	SZF1	50 g kg ⁻¹ de Z y 10 Mg ha ⁻¹ de F
6	SZF2	50 g kg ⁻¹ de Z y 20 Mg ha ⁻¹ de F

Al finalizar el experimento, luego del último corte, se muestrearon todas las unidades experimentales para cuantificar los cambios en el pH, CE y CIC.

Análisis estadístico

Los efectos de tratamientos se analizaron mediante ANVA, para un DBCA, previa verificación de los supuestos del modelo lineal. Las comparaciones de medias se realizaron a través del test LSD Fisher ($\alpha=0.05$) utilizando el software Statistix (versión 9.0). La normalidad de las variables se verificó mediante el test Shapiro-Wilk. Cuando

las variables no cumplían con el supuesto de normalidad, se realizó una transformación mediante \sqrt{X} (Box et al., 2005)

RESULTADOS

Cambios en la disponibilidad de agua para las plantas

La dosis más baja de Z aplicada (2,5% p/p) provocó pequeños cambios tanto sobre la magnitud de las constantes hídricas (agua retenida a 33 y 1500 kPa), como sobre la disponibilidad de agua útil (AU) o del agua fácilmente disponible (AFD). Por el contrario, se observó un aumento del 9, 16 y 24% en el agua retenida en CC y del 0, 13 y 28% en el AU para los tratamientos SZ2, SZ3 y SZ4, respectivamente. Se destacó el efecto sobre la fracción de AFD, con incrementos del 271, 254 y 245% para los tratamientos SZ2, SZ3 y SZ4, respectivamente. En cuanto a los efectos del agregado de F, el contenido de agua retenida en CC se redujo 13, 11 y 8.7% en relación al suelo natural y aumentó el contenido de agua retenida en PMP en 5.5, 7.4 y 5.5%, en los tratamientos SF1, SF2 y SF3, respectivamente. Como consecuencia, se redujo la disponibilidad de AU en 48.3; 34.3 y 31.4% para dichos tratamientos. No obstante ello, se verificó un aumento del 185, 200 y 257% en la fracción de AFD para SF1, SF2 y SF3, respectivamente.

En los tratamientos donde se combinó la aplicación de Z y F, se observó el mismo patrón descrito para la aplicación de las enmiendas en forma individual: un aumento de la retención hídrica y del contenido de AU en aquellos tratamientos con mayor dosis de Z. El mayor impacto sobre la disponibilidad de AU se presentó en los tratamientos SZ3F1 y SZ4F1, es decir donde se aplicaron dosis elevadas de Z bajas de F (5 Mg ha⁻¹) (Figura 1).

Curvas de retención hídrica gravimétrica

Las Figuras 2 y 3 muestran las curvas de retención hídrica gravimétrica ajustadas con la función de van Genutchen para los diferentes tratamientos, incluyendo el suelo sin tratar y el suelo tratado con las enmiendas en forma individual y/o en aplicación conjunta. La retención hídrica en Z1, siguió un patrón de distribución de retención hídrica similar al suelo natural, evidenciando un escaso impacto en la condición hidrofísica del suelo. Por el contrario, los tratamientos SZ2, SZ3 y SZ4 aumentaron la retención hídrica en todo el

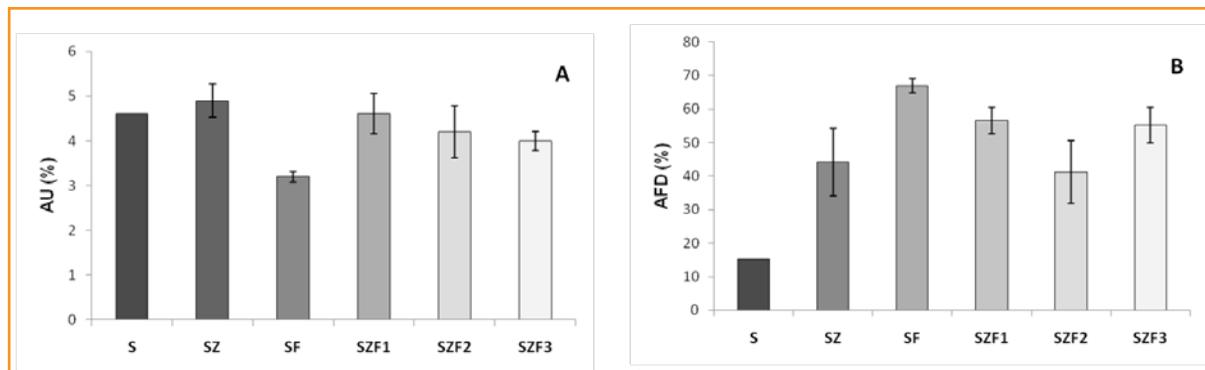


Figura 1. Contenido de agua útil (A) y agua fácilmente disponible (B) según tratamiento. En los tratamientos donde se analizaron la Z o el F en forma independiente, se promediaron las dosis (N=4 y N=3, respectivamente). Nota: S: suelo natural (testigo). SZ: suelo + zeolita. SF: suelo + residuo de feed lot. SZF1: suelo+ zeolita + dosis baja de residuo de feed lot. SZF2: suelo+ zeolita + dosis intermedia de residuo de feed lot. SZF3: suelo+ zeolita + dosis alta de residuo de feed lot.

rango de succión explorado, destacándose el muy marcado impacto en los niveles bajos de succión. La aplicación de F aumentó significativamente la retención hídrica en todos los niveles de dosis en el rango inferior de succión. Sin embargo, la retención hídrica del suelo tratado con F fue menor a la del testigo en niveles de tensión intermedios (incluyendo aquellos alrededor de CC), mientras que en niveles de tensión próximas al PMP, la retención hídrica en SF fue moderadamente superior al suelo sin tratar.

De acuerdo a los resultados presentados antes, se evidencia que las diferencias entre tratamientos de agregado de las enmiendas son especialmente evidentes en el rango de baja succión. Se observó una mayor retención

hídrica en suelos tratados con F respecto de los detectados cuando se aplicó Z a niveles bajos de succión, mientras que a niveles intermedios la retención en SF se ubicó levemente por debajo del tratamiento testigo. En cambio, a bajas succiones (próximas a CC), SZ y SF presentaron una distribución similar. Por otro lado, no se observaron diferencias apreciables entre la retención hídrica de SZ y SZF (Figura 3).

Experimento en invernáculo

La aplicación de Z incrementó significativamente ($p < 0.05$) el pH, CE y la CIC (+14%; +294 y +27,14%, respectivamente) medido al final del experimento, es decir, luego de 105 días de ocurrida la siembra del raigrás (Tabla 6).

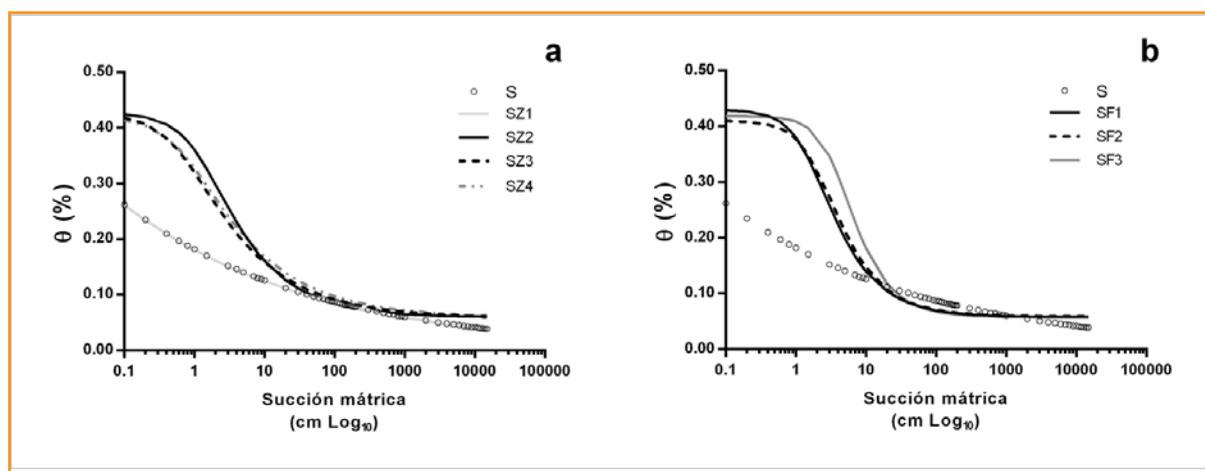


Figura 2. Curvas de retención hídrica gravimétrica del suelo tratado con Z (a) y F (b). En ordenadas se expresa la humedad gravimétrica (% p/p) y en abscisas la succión (logaritmo en base 10 de la tensión generada por la columna de agua expresada en cm).

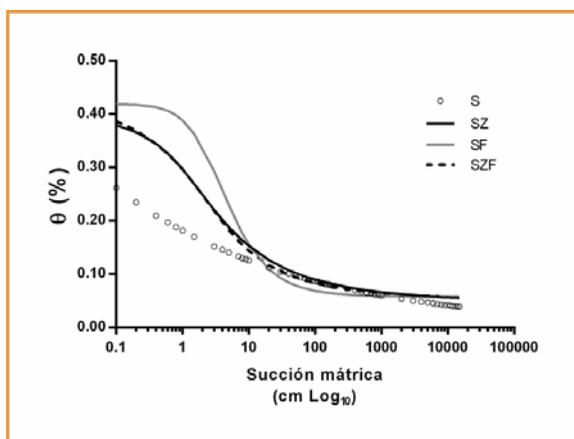


Figura 3. Curvas de retención hídrica gravimétrica para los diferentes tratamientos, promediando los niveles de dosis de Z y F. En ordenadas se expresa la humedad gravimétrica (% p/p) y en abscisas la succión (logaritmo en base 10 de la tensión generada por la columna de agua expresada en cm).

Tabla 6. Cambios en la reacción del suelo (pH), salinidad (CE) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo según tratamiento de aplicación de las enmiendas.

Tratamiento	pH	CE (dS m ⁻¹)	CIC (cmolc kg ⁻¹)
S	6.3 e	0.17 d	7.0 c
SZ	7.2 b	0.67 c	8.9 b
SF1	6.5 d	0.30 d	7.0 c
SF2	6.7 c	0.35 d	7.2 c
SZF1	7.3 a	0.97 b	8.7 b
SZF2	7.4 a	1.27 a	9.9 a
ANVA (valor p)	<0.0001	<0.0001	<0.0001

La aplicación de F aumentó levemente el pH del suelo ($p < 0.05$), sin provocar cambios estadísticamente significativos en la salinidad. En cuanto a los efectos de la EOZ, se presentó interacción entre Z y F, ya que en los tratamientos en donde se combinaron dichas enmiendas, se observó un aumento del pH, CE y de la CIC superior al detectado en los tratamientos donde las enmiendas se aplicaron en forma individual.

Discusión

Retención hídrica edáfica y disponibilidad de agua para las plantas

La forma y el patrón de distribución de las curvas de retención hídrica constituyen una he-

rramienta valiosa para inferir el comportamiento hidrofísico del suelo y la influencia del agregado de las enmiendas sobre éste. Así, en términos generales, los cambios observados en la retención hídrica a bajas succiones se pueden vincular con el almacenamiento de agua en macro y mesoporos, afectados por el manejo. Por el contrario, a mayores niveles de potencial mátrico (e.g. cercanos a PMP), la retención hídrica se encuentra determinada principalmente por la cantidad y mineralogía de las arcillas (Reynolds et al., 2009; Picone, 2014). El agregado de Z demostró ser una herramienta efectiva para incrementar la retención hídrica del suelo, efecto observado en todo el rango de potencial mátrico, aumentando de un modo muy considerable la fracción de agua fácilmente disponible para las plantas (AFD). Estos resultados coinciden con otros estudios realizados en condiciones de laboratorio y de campo en suelos arenosos (Campos Bernardi et al., 2013; Ippolito et al., 2010).

Varios autores han informado que la presencia de esferas externas e internas dentro de la microestructura cristalina de la Heulandita/clinoptilolita permite el intercambio reversible de agua (Mumpton, 1999; Chester y Derouane, 2009; Ferreira y Schulthess, 2011), aspecto favorable por sus implicancias agronómicas en el sistema suelo-planta. Posiblemente el agua retenida a bajas succiones corresponda al agua contenida en las esferas externas de la Z mientras que las esferas internas serían las responsables de la conservación de agua a altas presiones mátricas. Independientemente de la ubicación del agua retenida dentro de la estructura cristalina de la Z, la capacidad de este mineral de incrementar la porosidad total y la porosidad capilar en forma simultánea es un atributo de gran interés aplicado, especialmente para el mejoramiento de la fertilidad de los suelos arenosos, cuya capacidad de retención hídrica es intrínsecamente baja (Leggo et al., 2006; Githinji et al., 2010).

En cuanto al agregado del F, también se evidenció un marcado aumento de la retención hídrica gravimétrica a bajas succiones, reflejando un efecto principalmente sobre la macroporosidad del suelo. Estos resultados coinciden con lo reportado en otros trabajos que analizaron la influencia de la aplicación de diferentes residuos orgánicos como estiércol vacuno o compost (Reynolds et al., 2009; Larney et al., 2012). En cuanto a los efectos del agregado de residuos orgánicos al suelo, la literatura científica mues-

tra que éstos pueden aumentar, disminuir o no modificar la disponibilidad de AU y ello depende de diferentes factores como la composición del material, tipo de suelo, prácticas de manejo, entre otros aspectos (Rasoulzadeh y Yaghoubi, 2010; Reynolds et al., 2014). La disminución en el contenido de AU reflejada en las curvas de retención hídrica de van Genuchten en el suelo tratado con F se podría vincular con fenómenos de hidrofobicidad derivados del aporte de determinados compuestos orgánicos presentes en el residuo de feed lot, como por ejemplo ceras provenientes de la superficie de las hojas, exudados y estructuras derivadas de raíces y hongos, entre otros (Hallett, 2007). Los procesos de hidrofobicidad se manifiestan especialmente en suelos arenosos por presentar menor área específica y por consiguiente el agregado de compuestos hidrofóbicos afectan a un mayor número de partículas de suelo comparado con suelos francos y/o arcillosos (Vogelmann et al., 2013). Sin embargo, en los experimentos en maceta, la aplicación de F, ya sea en forma individual y/o en combinación con Z, no afectaron el crecimiento del raigrás, sino que por el contrario, maximizaron la producción de MS debido al aporte de N, tanto en condiciones de elevada o baja disponibilidad hídrica (datos no mostrados).

En los tratamientos donde se aplicó Z y F en forma conjunta (i.e. EOZ), la magnitud de los cambios observados en la condición hidrofísica (AU, AFD) fue variable dependiendo de la dosis de las enmiendas dentro de la mezcla. Sin embargo, el análisis de las curvas de retención hídrica integrando todos los niveles de dosis del F, permitió demostrar la mayor capacidad de retención de agua de los tratamientos SF en relación a SZ o SZF, sobre todo a bajas succiones. Los resultados no mostraron un efecto progresivo del agregado de dosis crecientes de F sobre la retención hídrica en SZF, sugiriendo una posible interacción entre Z y F diferencial según el nivel de dosis de F aplicado.

La elevada retención hídrica gravimétrica a bajas succiones derivada de la aplicación de Z y F, presenta algunas implicancias sobre el manejo de las enmiendas. Así, desde la perspectiva agronómica, este atributo podría ser una ventaja bajo una condición de sequía (por la mayor conservación de agua), mientras que en escenarios hídricos donde se presenten excedentes hídricos, una mayor retención de agua edáfica podría favorecer procesos de anegamiento y

escurrimiento, impactando desfavorablemente sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos, como así también facilitando la pérdida de nutrientes fuera del sistema suelo-planta (Taboada y Lavado, 2009; Sasal et al., 2010; Urricariet y Fernández, 2014). Por lo dicho antes se deduce que las prácticas de manejo de las enmiendas deberían ajustarse según los contextos esperados de variabilidad y cambio climático propios del sitio de producción.

Cambios en la condición química y físico-química edáfica

El conocimiento de la influencia del agregado de las enmiendas sobre la reacción y salinidad del suelo son aspectos centrales para evaluar la calidad y el valor fertilizante de las mismas (Mazzarino et al., 2012; Zubillaga y Branzini, 2012). Desde el punto de vista agronómico, interesa conocer si los aumentos en la CE y el pH pueden limitar la productividad de los cultivos, aspectos importantes para analizar la viabilidad de la utilización de las enmiendas orgánicas y minerales en los sistemas de producción.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el experimento en invernáculo, el pH determinado en el suelo al final del experimento mostró relación con la composición química y pH en agua de las enmiendas (pH de Z=9.5; pH de F=7.8), observándose un proceso de alcalinización moderado (**Tabla 6**). El origen de la alcalinidad derivada de la aplicación de Z, se vincula con las propiedades químicas y mineralógicas de la Z, con presencia de cationes básicos como Na, Ca y Mg.

El incremento observado en la CIC del suelo por el agregado de la Z es consistente con la propia CIC del mineral, muy superior a la del suelo (1.49 vs. 0.062 meq g⁻¹). Estos resultados coinciden con lo reportado por otros autores que han evaluado la aplicación de Z en suelos arenosos (Mumpton, 1999; Campos Bernardi et al., 2013). En otras investigaciones, realizadas sobre un suelo Entisol con 0.95 g kg⁻¹ de MO y 62% de arena; muy similar al empleado en el presente experimento, se evaluó el agregado de diferentes dosis de Z al trigo cultivado en macetas (*Triticum aestivum* var. Mexicali) registrándose aumentos en la CE y CIC del suelo y sin incrementos significativos en el pH (Tsadilas y Argyropoulos, 2011).

La aplicación de F modificó levemente la reacción y la CE del suelo. A pesar de las dosis

elevadas aplicadas y el pH alcalino del F, la alcalinización observada fue moderada, al igual que los aumentos en la CE y CIC. Los cambios provocados por la EOZ (aplicación conjunta de F y Z) tuvieron una tendencia esperada según los efectos individuales observados en cada componente, descriptos previamente. Es interesante resaltar que, debido a la gran variabilidad composicional y de características físicas y químicas de los residuos orgánicos pecuarios, éstos pueden determinar diferentes efectos sobre la reacción y/o salinidad del suelo, tanto aumentando como reduciendo o no modificando dichas propiedades (Larney y Angers, 2012). En una recopilación de experimentos locales efectuada por Álvarez et al. (2015), se observó que la aplicación de los abonos orgánicos aumentaron un 3% el pH del suelo ($p < 0.05$) luego de un ciclo de cultivo, independientemente del pH inicial del suelo o del abono. A diferencia de los resultados obtenidos en este experimento, los autores detectaron una tendencia ($p = 0.10$) al incremento en la CE asociada a la aplicación de los abonos, que en promedio pasó de 0.74 a 1.05 dS m⁻¹. Esta revisión incluyó el análisis de diferentes tipos de abonos y residuos orgánicos, incluyendo compost, lombricompostos, efluentes de tambo, entre otros, cuya media de CE fue de 7.06 dS m⁻¹.

Las modificaciones observadas en el pH y CE no afectaron la producción de MS del raigrás (datos no mostrados). Asimismo, en ninguna de las UE se observaron problemas de fitotoxicidad durante la emergencia/germinación que se pudieran vincular con efectos salinos y/o osmóticos causados por las enmiendas aplicadas. Estos resultados son esperables teniendo en cuenta que la magnitud de la alcalinidad y salinidad edáfica no alcanzaron niveles considerados críticos o desfavorables para el normal crecimiento vegetal (Summer, 1993; Qadir y Schubert, 2002). Es importante destacar que el sistema experimental utilizado (bajo cubierta) y con disponibilidad de agua edáfica en niveles del 90% de la CC), no se presentaron condiciones de drenaje (percolación), que hubieran podido lavar las sales. Este mecanismo es un componente importante en cultivos a campo abierto, ya que permite limitar la acumulación salina y/o la sodicidad de origen antrópico como puede ser la producida por la aplicación de residuos, efluentes o riego con aguas bicarbonatadas sódicas (Torres Duggan et al., 2012; Gambaudo et al., 2014).

Conclusión

La aplicación de zeolita incrementó significativamente la CIC del suelo y el contenido de agua útil, destacándose un muy marcado aumento sobre la fracción de agua fácilmente disponible para las plantas. El agregado del residuo de feed lot aumentó muy considerablemente el contenido de agua fácilmente disponible aunque redujo el contenido de agua útil. La aplicación de la enmienda órgano-zeolítica demostró ser una práctica muy efectiva para mejorar la retención y disponibilidad de agua para las plantas.

Los niveles de pH y CE del suelo si bien aumentaron por el agregado de zeolita, residuo de feed lot y de la enmienda órgano-zeolítica se ubicaron en niveles no limitantes para el crecimiento y rendimiento de los cultivos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con fondos del proyecto UBACYT 20020120100172BA. Los autores agradecen especialmente a Tecnoagro S.R.L (Laboratorio INAGRO) por su apoyo y recomendaciones para los análisis de suelos, plantas y enmiendas; a Liliana Marbán por su apoyo metodológico en los estudios de retención hídrica; al Lic. Guillermo Cozzi (SEGEMAR) por su colaboración en los análisis por DRX y a Francisco Couchot, Sabina Marelli, Gabriela Civeira y Ana Muzlera por la ayuda durante la realización del experimento en invernáculo.

Bibliografía

- Álvarez, R.; H.S. Steinbach y C.R. Alvarez. 2015a. Manejo de la fertilidad en producción orgánica. En: EFertilidad de suelos y fertilización en la Región Pampeana. Capítulo 25. p 471-485.
- Box, G.E.P. ; W.G. Hunter, y J. Stuart. 2005. Estadística para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos. Editorial Reverté S.A. p 241-242
- De Campos Bernardi, AC.; P. Anchoa Oliviera; M.B. de Melo Monte y F. Souza-Barros. 2013. Brazilian sedimentary zeolite use in agriculture. Microporous and Mesoporous Materials. 167:16-21.
- Durán, A.; H. Morrás; G. Studdert y L.I.U. Xiaobing. 2011. Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America. Chin. Geogra. Sci. 21 (5) 511-530.
- Ferreira, D.R. y C.P. Schulthess. 2011. The nanopore inner sphere enhancement effect on cation adsorption: sodium, potassium and calcium. SSSAJ. Vol. 75, N° 2
- Gambaudo, S., S. Imhoff, M.E. Carrizo, M. Marzetti, y S. Racca. 2014. Uso de efluentes líquidos de tambo para mejorar la productividad de cultivos anuales y

- la fertilidad del suelo. *Ciencia del Suelo* (Argentina). 32 (2): 197-208.
- Hallett, P.D. 2007. An introduction to soil water repellency. Proceedings of the 8th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals. Columbus, Ohio, USA. RE Gaskin (Editor). ISBN 978-0-473-12388-8
- Herrero, M. y S.B. Gil. 2008. Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecología Austral* 18: 273-289.
- Herrero, M.A. 2014. Manejo y tratamiento de estiércol y purines. En: La producción animal y el ambiente. M. A. Herrero; S. B. Gil, M. Reuelto y G.M.I. Sardi (Eds). Bmpress. 97-126 p
- Herrman, C. y M. Torres Duggan. 2016. Fertilizantes y enmiendas de origen mineral en la Argentina: caracterización y uso en la Argentina. En: Suelos y Geología Argentina. FX Pereyra y M Torres Duggan (Eds). Capítulo 13. Coedición de la Asociación Geológica Argentina y Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. p 329-355.
- Ippolito, J.A.; D.D. Tarkalson, y G.A. Lehrsch. 2010. Zeolite soil application method affects inorganic nitrogen, moisture, and corn growth. *Soil Science*. Vol 176: 136-142.
- Larney, F.J. y D. A. Angers. 2012. The rol of organic amendments in soil reclamation: A review. *Can. J. Soil. Sci.* 92: 19-38.
- Leggo, P.J.; B. Ledesert, y G. Christie. 2006. Tue rol of clinoptilolite in órgano-zeolitic-soil systems used for phytoremediation. *Science of the Total Environment*. 363. 1-10
- Marbán, L. 2005. Métodos de extracción y determinación de nitratos en suelos. Parte (II). En *Tecnologías en análisis de suelos*. Capítulo V. L. Marbán & S. Ratto (Eds) Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS). pp.131-138
- Mualem, Y. 1986. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: *Methods of Soil Analysis, Part1*. A. Klute (Ed). ASA. Madison. WI. P 799-823.
- Mumpton, F.A. 1999. La roca mágica: uses of natural zeolites in agricultura and industry. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. Vol 96. Pp. 3463-3470.
- Panigatti, J.L. 2014. Clasificación de suelos y su relación con la fertilidad. En: *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Capítulo 2H.E. Echeverría y F.O. García (Eds).. 53-72 p.
- Picone, L. 2014. El ambiente físico-químico del suelo relacionado con la fertilidad. En: *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. H. E. Echeverría y F.O. García (Eds). Capítulo 1. INTA p 31-52
- Qadir, M., y S. Schubert. 2002. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. *Land*
- Ramesh, K. y D. D. Reddy. 2011. Zeolites and their potential uses in agriculture. *Advances in Agronomy*. (113) p 219-241.
- Rasoulzadeh, A., y A. Yaghoubi. 2010. Effect of cattle manure on soil physical properties on a Sandy clay loeam soil in North-West Iran. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 8(2): 976-979.
- Reynolds, W.D.; C.F. Drury.; C.S. Tan; C.A. Fox, y X.M.Yang. 2009. Use of indicators and pore volumen-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152: 252-263.
- Reynolds, W.D.; C.F. Drury.; C.S. Tan; C.A. Fox, y X.M.Yang. 2014. Temporal effects of food waste compost on soil physical quality and productivity. *Can. J. Soil. Sci.* 95: 251-268.
- Richards, L.A. 1965. Physical condition of water in soil. In: *Methods of soil analysis*. Agronomy N°9. ASA. INC. Madison, Wisconsin. USA; C.A. Black (Ed). Par 1. 2nd Ed. 131-137 p.
- Richter, M., M. Conti, y G. Maccarini. 1982. Mejoras en la determinación de cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónico en los suelos. *Rev. Fac. de Agronomía* 3(2): 145-155
- Russo, A. V., A. Labourt, P. G Bercoff, y S.E. Jacobo. 2015. Optimization of iron load in a natural zeolite for heterogeneous catalysis. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)(Online)*.2319-183X, (Print) 2319-1821.4 (2). 19-25.
- Sasal, M.C., M.G.Castiglioni, y M.G. Wilson. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108: 24-29.
- Summer, ME. 1993. Sodic soils: new perspectives. *Australian Journal of Soil Research*. (31): 683-750.
- Taboada, M.A., y R.S. Lavado. 2009. Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones. Editorial de la Facultad de Agronomía (UBA). 160 p.
- Torres Duggan, M., C.R. Alvarez, M.A.Taboada, T. Celesti, F. Vignarolli, y D. D'ambrosio. 2012. Riego complementario en un Argiudol típico de la Pampa Ondulada argentina bajo siembra directa: efectos sobre algunas propiedades químicas y físicas. *Ciencia del Suelo*. 30 (2):201:207.
- Tsadilas, C.D. y G. Argyropoulos. 2006. Effect of clinoptilolite addition to soil on wheat yield and nitrogen uptake. *Comm. Soil. Sci. Plant Aanal.* 37: 2691-2699.
- Urricariet, S., y P. Fernández. 2014. Impacto del uso de fertilizantes y abonos en agroecosistemas. En: *Agroecosistemas. Caracterización, implicancias ambientales y socioeconómicas*. Sección 3. Capítulo X. P. Lombardo, P; P. Fernández; M. Moya; C. Sainato; E. Borodowski; P. Muschiatti; F. Pescio; A. Acosta y S. Urricariet. Editorial Facultad de Agronomía (UBA).
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, y S.R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA/600/2-91/065.
- Van Straaten P. 2014. Rocks for crops: the use of locally available minerales and rocks to enhance soil productivity. Proceedings of the 16th World Fertilizer Congress of CIEC. Technological innovations for a sustainable tropical agriculture. October 20-24. Río de Janeiro. Brazil. p 55-58
- Vogelmann, E.S., J.M. Reichert, J. Prevedello, C.O.B. Consensa, A.E. Oliveira, G.O. Awe, y J. Mataiz-Solera. 2013. Threshold water content beyond which hydrophobic soils become hydrophilic: the role of soil texture and organic matter content. *Geoderma* (209-2010):177-187
- Zubillaga, M.S., y A. Branzini. 2013. Abonos orgánicos. En: *Fertilización de cultivos y pasturas*. Sección 4. Capítulo 3. R. Alvarez, P. Prystupa, M.B. Rodríguez y C. Alvarez (Eds). p 583-612. ●