INFORMACIONES AGRONÓMICAS
de Hispanoamérica

IPNI International Plant Nutrition Institute

Diciembre 2011 · No. 4

CONTENIDO

Avances en manejo sitio-específico de suelos en el Paraguay 1

Manejo del fósforo en sitios contrastantes de la región mesopotámica argentina bajo uso forestal 7

Fósforo extractable en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina 14

Efectos a largo plazo de la fertilización en el sudeste bonaerense y comparación con la región pampeana central 19

Tendencias en el consumo de fertilizantes en Puerto Rico 27

Cursos y Simposios 35

Publicaciones Disponibles 37

Editores: Dr. Fernando O. García
Dr. Raúl Jaramillo

Propietario: International Plant Nutrition Institute (IPNI)

CUIT: 30-70175611-4

ISSN 2222-016X

No. de Registro de Propiedad Intelectual: 942009

Se permite copiar, citar o reimprimir los artículos de este boletín siempre y cuando no se altere el contenido y se citen la fuente y el autor

www.ipni.net

AVANCES EN MANEJO SITIO-ESPECÍFICO DE SUELOS EN EL PARAGUAY

Enrique Hahn Villalba[1]

Introducción

El concepto de manejo sitio-específico de insumos ha dejado de ser una novedad, herramientas de alta tecnología facilitan el manejo de distintas áreas de la parcela estudiada de forma diferencial. Las tecnologías de precisión incluyen sistemas de posicionamiento global diferencial (DGPS), monitores de rendimiento, sistemas de información geográfica (SIG o GIS), software de computación, y tecnología de dosis variable (variable rate technology 'VRT'). Existe la necesidad de convalidar herramientas precisas y definir metodologías de trabajo para nuestra región agrícola. Los muestreos intensivos de suelo y el diagnóstico de la variabilidad de sus atributos son parte importante del paquete tecnológico.

La agricultura paraguaya es soportada sobre suelos como Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles, que presentan generalmente síntomas de deficiencias en algunos atributos químicos de suelos, prevaleciendo la necesidad de aportar correctivos para obtener altas productividades. El muestreo intensivo detallando la fertilidad de suelos, generando mapas de diagnóstico y mapas de aplicación de correctivos y fertilizantes, es una actividad promisoria para nuestra región y es la puerta de entrada para encarar proyectos de agricultura de precisión con los productores rurales.

La primera década del siglo XXI trajo consigo la gran expansión del cultivo de la soja, superando las 2.6 millones de hectáreas y un porcentual alto de adopción del sistema de siembra directa por superficie agrícola superior a 80%, posicionando al Paraguay en primer lugar, a nivel mundial en términos porcentuales, en adopción del sistema conservacionista (Derpsch y Friedrich, 2009). Se generaron avances en recomendaciones de fertilización en cultivos de granos para la Región Oriental del Paraguay (Cubilla, 2005; Wendling, 2005; Barreto, 2008; Hahn, 2008). Igualmente, en los últimos años, debido a la baja fertilidad encontrada en gran parte de los suelos con alto histórico de uso agrícola, una nueva era con la visión de fertilizar el sistema, y no solamente el cultivo, se va consolidando en nuestro país. Esto implica generar planes de construcción de la fertilidad, principalmente ligadas a aplicaciones de calcáreo, fósforo (P) y potasio (K), para buscar alcanzar mejores

[1] Consultor e Investigador en Manejo de Suelos y Agricultura de Precisión. Presentado en el II Simposio Paraguayo de Manejo y Conservación de Suelos. SOPACIS-UNA, San Lorenzo, 25 y 26 de Agosto de 2011. Correo electrónico: ehahn@sustentap.com.py

productividades y evitar degradaciones en el suelo. Otro avance fue la informatización de las recomendaciones a través de un software que sirve de soporte para la interpretación de resultados de análisis, genera planes de construcción de la fertilidad y selecciona insumos apropiados para la necesidad del suelo, integrando a laboratorios de suelos y empresas del sector agrícola a través de redes online de trabajo (Hahn, 2009). Se verifica interés en los productores paraguayos en mejorar sus suelos, sin embargo, la situación problemática se resume en altos costos de los correctivos de suelo, lo que en muchos casos impide su aplicación.

Actualmente, el manejo sitio-específico de insumos busca identificar y cuantificar la variabilidad espacial de los atributos de suelo presente en la finca, para luego determinar el impacto de esta variabilidad en el rendimiento y las estrategias que permitan el uso eficiente de insumos, conduciendo hacia una agricultura de mayor precisión, donde se incrementen los rendimientos, se mejore la rentabilidad y se reduzca el potencial impacto ambiental de la actividad.

Investigación sobre manejo sitio-específico en Paraguay

Desde inicios del 2009, a través del Instituto de Biotecnología (INBIO), financiador de las investigaciones, y las instituciones como la Cooperativa Colonias Unidas, que ofrece las parcelas experimentales a través de sus socios productores, y la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Católica de Itapúa (UCI), a través de sus estudiantes ligados con trabajos de tesis de final de grado, se realiza un proyecto técnico-científico de evaluación de herramientas disponibles para implementación de agricultura de precisión (AP) en el Paraguay. La finalidad es realizar investigaciones, generando información sobre la viabilidad de la aplicación de las herramientas existentes sobre la tecnología de agricultura de precisión. Esto implica integrar y exponer diferentes áreas de estudio en una forma objetiva, práctica y creativa para adaptar el uso y manejo de metodologías de trabajo y equipos precisos a las condiciones edafo-climáticas de nuestra región productora, partiendo de una situación real de 3 parcelas experimentales de 47, 20 y 13 hectáreas. La propuesta es crear un ciclo paraguayo de agricultura de precisión con las herramientas acordes a las necesidades regionales (**Figura 1**).

En las áreas experimentales se busca encontrar las causas que generan la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos de granos. Se miden los tenores de nutrientes en el suelo, se realizan aplicaciones de fertilizantes y correctivos de suelo a tasa variada, y se controla la evolución de los nutrientes aplicados hacia el nivel de suficiencia en el suelo. Se realizan investigaciones específicas sobre el tipo de muestreo de suelo más representativo en tamaño e intensidad y sobre la variabilidad de los nutrientes de acuerdo al tamaño de grilla. Además de otros estudios sobre la variabilidad de los atributos físicos como textura, compactación, humedad y topografía. Se analiza cómo la fertilización nitrogenada y los rendimientos se relacionan con los tenores de materia orgánica (MO) del suelo y la biomasa a través del índice de vegetación y el tenor de clorofila. Para obtener información se utilizan varios equipos precisos como monitores de siembra, aplicadores a tasa variada de correctivos y fertilizantes, y monitor de cosecha (**Figuras 2 y 3**).

También se utilizan extractores automatizados de suelo, sensores de humedad edáfica, penetrómetro para medir resistencia a la penetración (compactación), y clorofilómetro para el cultivo. Así, se calibran respuestas de un sensor óptico activo, que mide el índice verde del canopeo de cultivos, con el objeto de diagnosticar causas de la variabilidad generada en rendimientos de los cultivos.

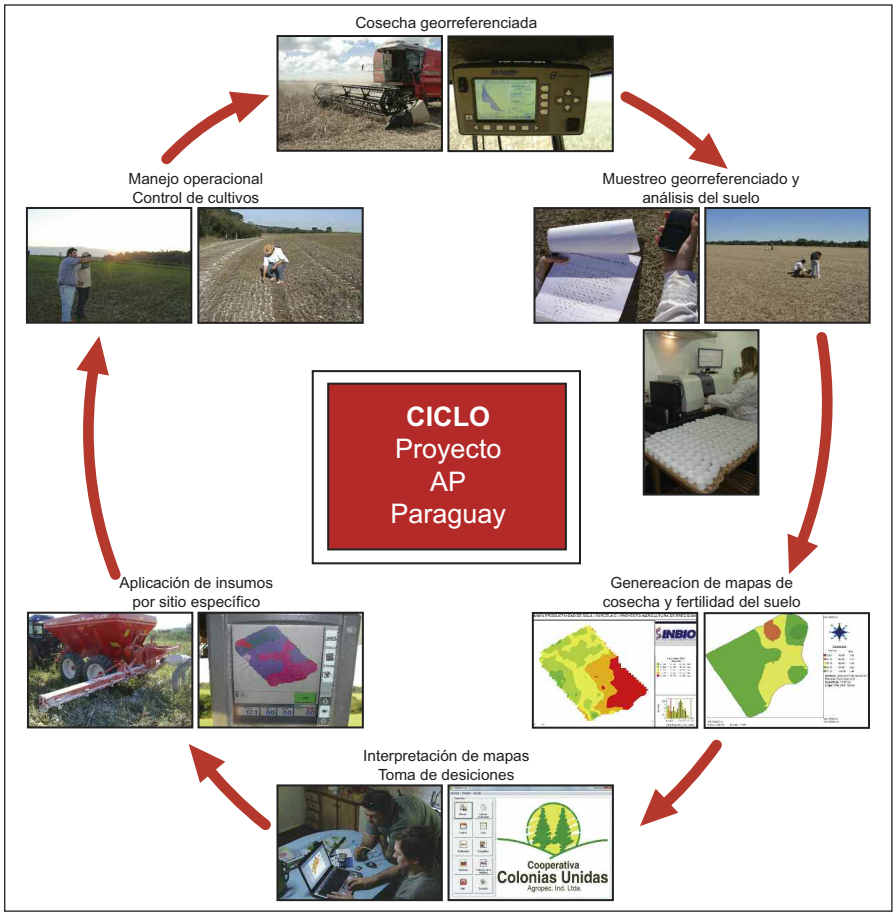


Figura 1. Ciclo de agricultura de precisión implementado en el Proyecto AP Paraguay financiado por el INBIO (Hahn, 2009).

Figura 2. Aplicador a tasa variada de correctivos de suelo (izquierda), y monitores de cosecha y de aplicación por sitio-específico utilizados en el proyecto.

Figura 3. Extractor automático de suelo y penetrómetro adaptados a cuatriciclo utilizados en el Proyecto AP, Paraguay.

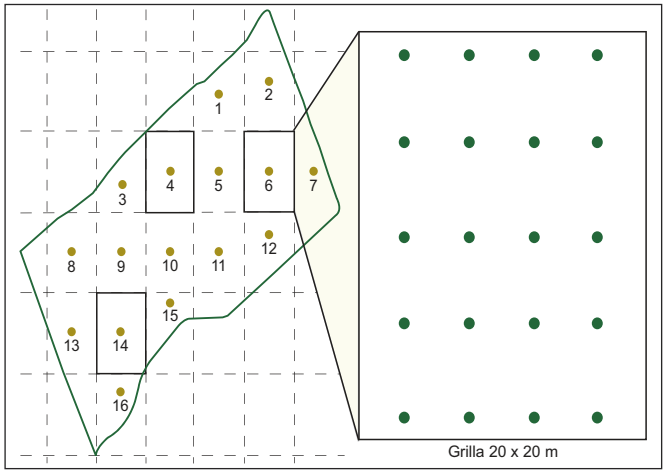


Figura 4. Distribución de la grilla de muestreo (173 x 173 m) y sub-grillas (20 x 20 m) en cuadrículas seleccionadas al azar. Parcela Experimental, Alto Verá, Paraguay.

Tendencias y perspectivas para el manejo sitio-específico en la agricultura paraguaya

En la búsqueda del mantenimiento de la fertilidad de suelos, la actividad básica a realizar debe ser reponer los nutrientes que se exportan en los granos. Un resumen de datos de análisis de suelos demostraron que gran parte del área agrícola sur del país está por debajo de los niveles críticos de P y K (Hahn, 2009). En lo que respecta a P, nuestros suelos presentan baja disponibilidad debido a la mineralogía en la que predomina la caolinita, la cual meteorizada genera óxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al) y ambientes de fijación del nutriente. Así también, se encontraron en muchas parcelas niveles bajos de K en los suelos, cuando originalmente en condiciones de bosque, los suelos poseían niveles considerados altos para la producción agrícola.

Trabajos en la zona sur del país vienen demostrando que, al diagnosticar la situación de los suelos con mapas de fertilidad a través de grillas de muestreo, es posible detallar la variabilidad de cada nutriente en el mismo. En las parcelas experimentales del proyecto se buscó refinar detalles sobre la variabilidad existente de atributos químicos del suelo mediante la realización de subgrillas de 20 x 20 m (20 muestras) en tres cuadrículas elegidas en forma aleatoria que provenían de la grilla de muestreo 173 x 173 m que generó 16 muestras cada 3 ha (**Figura 4**). Las parcelas experimentales son áreas con historia de uso agrícola superior a 30 años y siembra directa consolidada, representativas de las áreas agrícolas del Departamento de Itapúa.

Al detallar con sub-grillas, los resultados (**Figura 5**) generaron una tendencia de comportamiento variable para P en el suelo, con coeficiente de variación (CV) altos entre 30-40% y valores variando desde niveles muy altos (verde oscuro), altos (verde), medios (amarillo), bajos (naranja) y muy bajos (rojo).

El comportamiento de K en el suelo demostró también variabilidad, con CV entre 20-35% y niveles de fertilidad entre alto, medio y bajo. Esta variabilidad en las mayorías de las grillas trabajadas fue inferior a las encontradas en P.

El calcio (Ca) en el suelo demostró un comportamiento poco variable (CV de 10-20%), con niveles de fertilidad medios en la mayoría de los estudios realizados. El magnesio (Mg) por su parte, se situó en niveles de fertilidad medios a altos en casi todos los estudios realizados con CV entre 15-25%, dando resultados de variabilidad inferiores a los encontrados con P y K y superior al encontrado con Ca.

Es bueno entender que con la siembra directa, la variabilidad espacial de atributos químicos aumenta con respecto al manejo convencional usado en décadas anteriores, principalmente para el P y el K, en virtud del efecto residual de los fertilizantes aplicados con la sembradora en línea. En el sur del Brasil varios trabajos demuestran también variabilidad horizontal para P y K, superior que para pH en agua, Ca y Mg (Anghinoni y Salet, 1998; Schlindwein y Anghinoni, 2000). Esta variabilidad espacial se explica por el uso de fórmulas con alto contenido de P y K en línea de siembra, mientras que Ca y Mg se aplican encalando al voleo en forma homogénea sobre los rastrojos.

Actualmente, la tendencia para el manejo sitio-específico de la fertilidad de suelos en el Paraguay es enfocarse a una fertilización de reposición de exportación en granos,

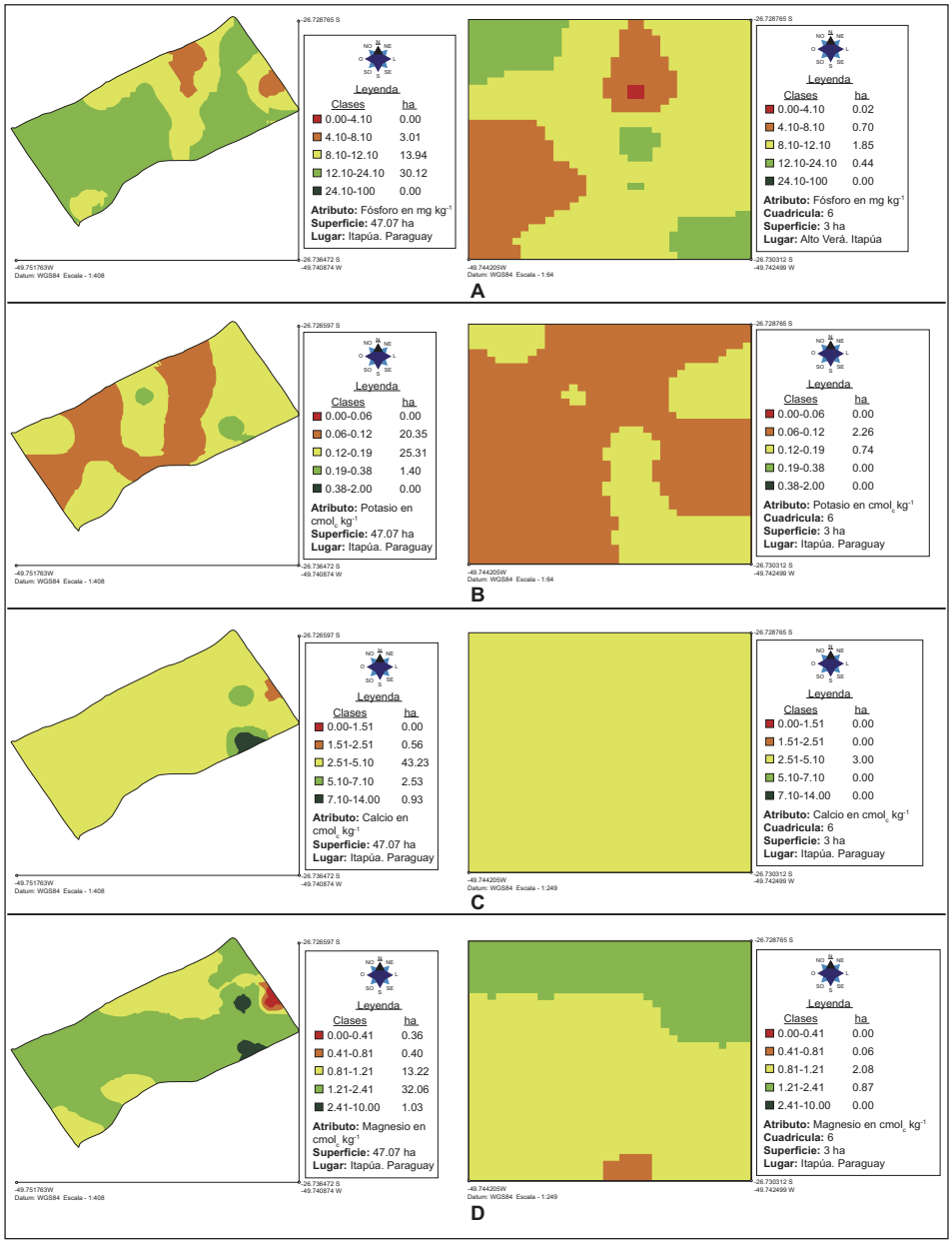


Figura 5. Estudio detallado de la variabilidad de suelo con grilla a 173 x 173 m (mapas a la izquierda) y sub-grillas de 20 x 20 m en cuadrículas seleccionadas al azar (mapas a la derecha) para fósforo (A), potasio (B), calcio (C) y magnesio (D). Parcela Experimental, Alto Verá, Paraguay.

en la línea de siembra y a una corrección de suelo sobre todo de calcáreo, P y K a tasa variada, buscando alcanzar niveles críticos o de suficiencia en los suelos, con el principal objeto de obtener mejores rendimientos en los cultivos implantados.

Para el manejo sitio-específico de nitrógeno (N) se desarrollan nuevas alternativas para la fertilización, que buscan mejorar la eficiencia e incluyen métodos de diagnóstico ligados a dosis, momento y estado nutricional, donde sobresale el uso de métodos no destructivos y de rápido análisis como los sensores ópticos que miden el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado de los cultivos (NDVI). Las investigaciones generadas con esta tecnología verifican un amplio rango de momento de aplicación de N, que se extiende hasta estadios más tardíos (V8 hasta V12). Con el uso de sensores NDVI se puede sincronizar la oferta de N con la demanda y disminuir riesgos en la toma de decisiones por tener gran parte de los componentes de rendimiento definidos (Melchiori, 2010).

Los resultados experimentales obtenidos en Paraguay con uso de sensor óptico activo en función a dosis de N para el cultivo de maíz, marcó una buena correlación entre la lectura del sensor, la producción de materia seca ($R^2 = 0.65$ a 0.95) y los rendimientos de granos ($R^2 = 0.5$ a 0.7) principalmente desde V10 hasta V14 (**Figura 6**).

Al obtener datos experimentales de varias zafras relacionando producción de materia seca y rendimiento de granos con las lecturas NDVI por el sensor, identificando zonas de stress y de alto potencial productivo, se pueden crear recomendaciones a tasa variada de aplicaciones de N y tomar medidas en tiempo real que induzcan a disminuir los rangos de variabilidad de productividad causados por deficiencia de N en el cultivo.

Implementación de proyectos de agricultura de precisión con productores de la Cooperativa Colonias Unidas

El Dr. Telmo Amado, referente en agricultura de precisión en el Brasil y propulsor e investigador líder del Proyecto Aquarius de alto impacto social (Amado et al. 2006), resalta que cada región debe adaptar su propio sistema conveniente de agricultura de precisión, de acuerdo a las condiciones edafo-climáticas y a los datos experimentales que se presentan, siendo esto clave para consolidar la implementación de proyectos precisos a escala de productores rurales.

En un trabajo sobre interpretación y diagnóstico de los suelos agrícolas de 209 parcelas de socios productores de la Cooperativa Colonias Unidas, los cuales presentaban histórico de fertilización en línea y siembra directa consolidada con más de 10 años del sistema, se verificaron deficiencias en fertilidad de P (79% de las parcelas) y K (69% de las parcelas) en los suelos analizados, donde se ha recomendado tomar medidas a través de planes de construcción de la fertilidad de suelos (Hahn y Bonussi, 2010).

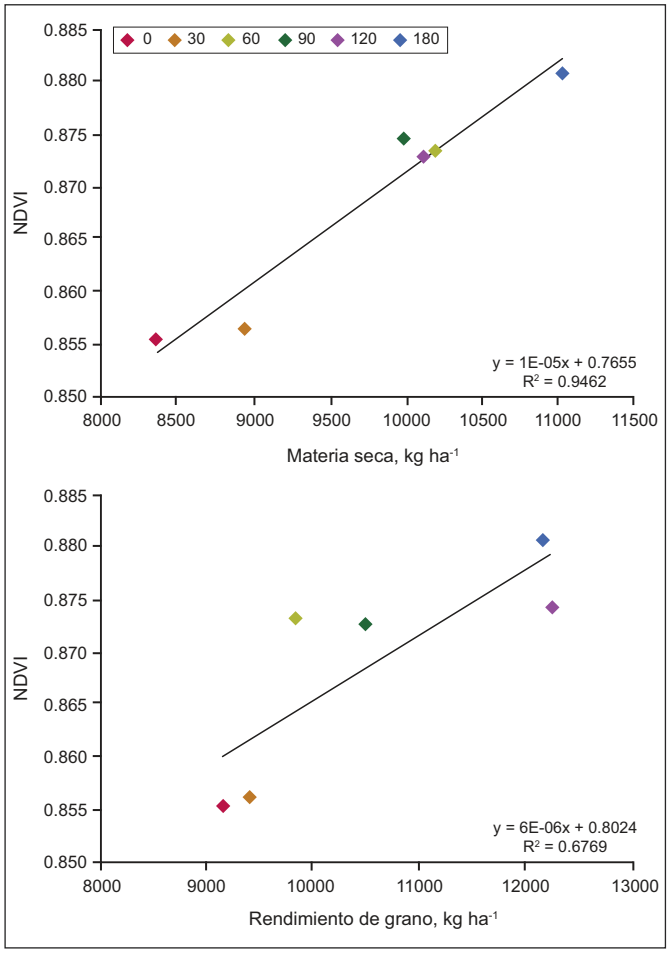


Figura 6. Relación entre el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) y la producción de materia seca (superior) y rendimiento de granos (inferior) medidos en estadio fenológico V14 para 6 dosis de N (kg ha^{-1}). Parcela Experimental Alto Verá, Paraguay.

Una de las herramientas más utilizadas en la agricultura de precisión en suelos deficientes es la corrección de suelo a tasa variada. A partir del 2011 se implementó con los productores este servicio en el sector Asistencia Técnica de la Cooperativa Colonias Unidas, donde se dispone de equipos precisos e insumos para la corrección de suelos.

En la primera etapa del proyecto se implementaron trabajos de manejo sitio-específico de corrección de suelos con 30 productores y 42 parcelas agrícolas. Se realizaron mapas de atributos de suelos y se generaron recomendaciones para corrección de suelo con calcáreo, P y K. En las 42 parcelas se aplicó tasa variada y se usaron grillas de muestreo con puntos de muestreo cada 2 ha. Se elaboró un análisis sobre los beneficios económicos de la utilización de tasa variada versus tasa fija, para ello se simularon aplicaciones a tasa fija en las mismas parcelas, con recomendaciones que se obtuvieron en base al promedio de los resultados de los análisis de suelo de la grilla obtenida para tasa variada.

El encalado es una práctica necesaria en los suelos de la región para mejorar la disponibilidad de nutrientes y neutralizar el Al^{+3} existente en nuestros suelos. Los resultados más favorables de economía con tasa variada fueron encontrados con el uso de calcáreo (**Figura 7A**) y en el 95% de las parcelas trabajadas hubo una economía de insumos positiva en comparación a la recomendación promedio. Existió una economía total de 26% en el uso de cal agrícola para corrección de suelos.

La aplicación de superfosfato triple como fuente de P en tasa variada resultó en 24 parcelas con balance favorable y 18 con pérdidas en economía con el uso de tasa variada al comparar con tasa fija (**Figura 7B**). En cantidad total de P utilizado en las parcelas hubo una economía del 14%, a favor de la implementación de la tasa variada.

Al realizar el análisis de la utilización de cloruro de potasio (KCl) como fuente de K en tasa variada se percibe un incremento en costos en relación al uso de dosis fijas (**Figura 7C**). El 25% de las parcelas no necesitaron K en tasa variada para superar el tenor crítico (75 mg dm^{-3} o ppm). Igualmente, al simular una dosis fija de recomendación en base al promedio, más del 75% de las parcelas no necesitaron aplicación de K. De las 9 parcelas que necesitaban el nutriente por el promedio, 8 parcelas tuvieron pérdidas en economía al comparar el uso en tasa variada versus dosis fija. Por consiguiente, hubo un balance económico negativo para la tasa variada en aplicaciones de KCl.

Un 80% de estas parcelas de socios productores son del departamento de Alto Paraná que poseen histórico más reciente de agricultura en comparación al departamento de Itapúa (20% de las parcelas). En esta región, los suelos tienen tenores medios a altos de K y esto explicaría los resultados con promedio por encima del nivel crítico, que daría una dosis fija de igual a cero. Sin embargo, debido a la variabilidad encontrada en K, algunos puntos de las grillas coincidían con niveles por debajo del nivel crítico, generando recomendaciones de aplicación de tasa variada.

Al realizar un balance general de los correctivos utilizados en las 42 parcelas (calcáreo, superfosfato triple y KCl) existió un beneficio en economía a favor del manejo sitio-específico, por la reducción de 16% en el costo total de los insumos, en comparación de la simulación de recomendación promedio para tasa fija. Además debemos considerar que los correctivos por manejo sitio-específico se ubican en el lugar correcto y en dosis adecuadas para la construcción de la fertilidad apuntada por el proyecto.

Consideraciones finales

La cotización de la tierra agrícola se elevó considerablemente en el Paraguay, cesando la gran expansión agrícola sobre los suelos del territorio en los últimos 3 años, debido a que las tierras con buena aptitud para el sector ya están cubiertas por cultivos. Con estos acontecimientos los productores paraguayos están más concentrados en adoptar tecnología para

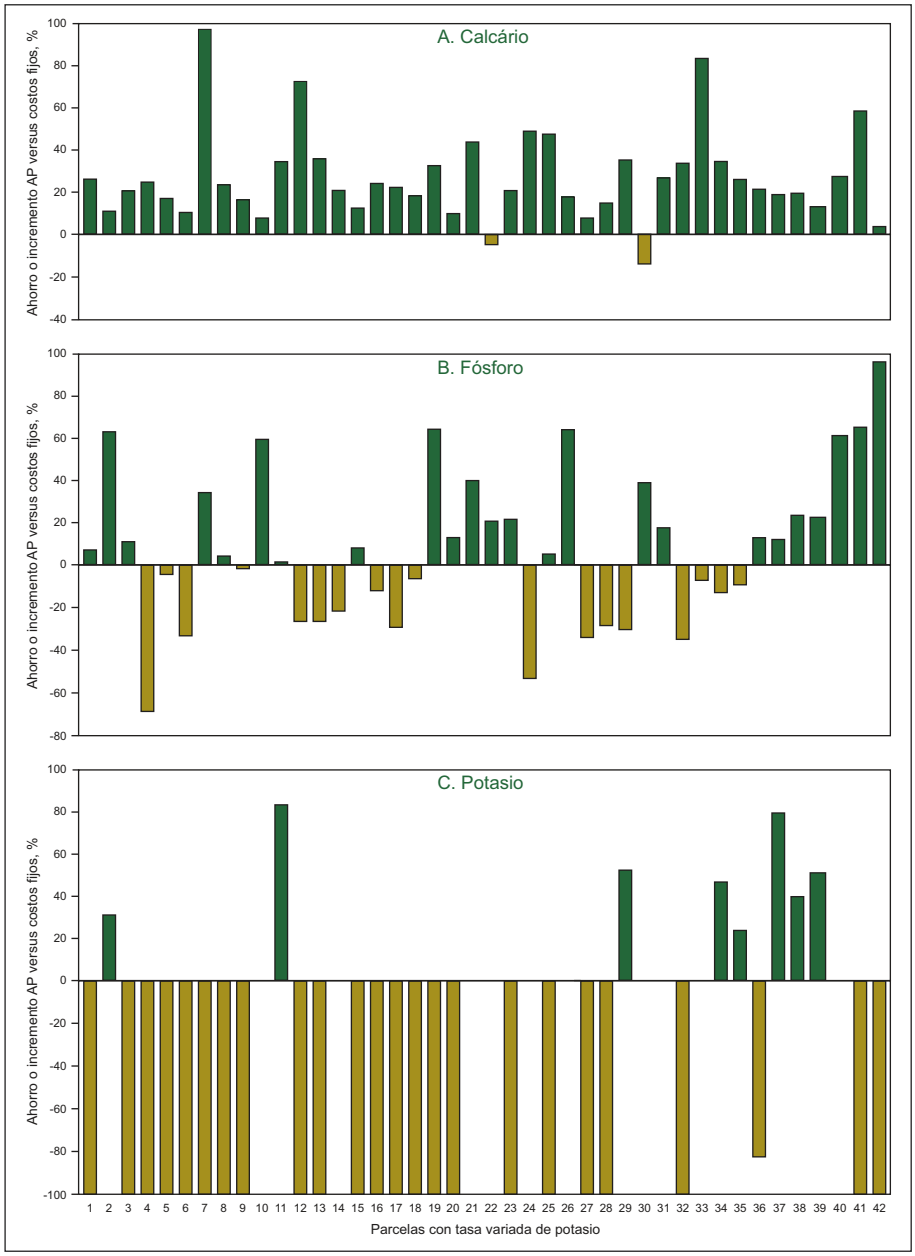


Figura 7. Variación de costos (ahorro en verde e incremento en gastos en amarillo) del uso de la tasa variada de insumos comparada con un promedio simulado de tasa fija, para calcáreo (A), Fósforo (B) y Potasio (C) en las parcelas de productores Cooperativa Colonias Unidas, Paraguay.

ganar en rendimientos por superficie cultivada. Obtener resultados satisfactorios estará vinculado al manejo y la conservación de los suelos agrícolas y al uso racional y eficiente de los insumos, pilares que cumplirán un rol importante para la sostenibilidad de nuestra agricultura.

Bibliografía

Amado, T.J. C., G.L. Belle, R.B.C. Dellamea, L.Z. Pes, R. Fulber, L. Pizzutti, R.B. Schenato, y C.L. Lemainski. 2006. Projeto Aquarius-Cotrijal: pólo de AP. Revista Plantio Direto, Passo Fundo, 91(1):39-47.

Anghinoni, I., y R.L. Salet. 1998. Amostragem do solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema plantio direto. In: NUERNBERG, N.J., ed. Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto. Lages, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, pp. 27-52.

Barreto, U.F. 2008. Recomendações de fertilização fosfatada e potássica para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. Tese Doutorado. Universidade Federal de Santa María.

Cubilla, M.M.C. 2005. Calibração visando recomendações de fertilização fosfatada para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai / 2005. 97 f. Mestrado em Ciência do Solo – Universidade Federal de Santa Maria.

Derpsch, R., y T. Friedrich. 2009. Global overview of Conservation Agriculture No till adoption. *In*: IV Congresso Mundial da Agricultura Conservacionista. Disponible en internet: www.wccagri.ernet.in

Hahn, E. 2008. Recomendação de Nitrogênio, Fósforo e Potássio para girassol sob sistema plantio direto no Paraguai. Mestrado em Ciência do Solo - Universidade Federal de Santa Maria.

Hahn, E. 2009. Informatización para el manejo de suelo. Primer Simposio Paraguayo de Manejo y Conservación de Suelos. Cooperativa Colonias Unidas, Obligado, Paraguay. 2009. 230 p.

Hahn, E., y D. Bonussi. 2010. Interpretación y diagnóstico de niveles de fertilidad de suelos agrícolas sobre siembra directa en la zona de influencia de la Cooperativa Colonias Unidas (Paraguay). Informaciones Agronómicas del Cono Sur No. 45:5-8.

Melchiori, R.J.M. 2010. Sensores remotos para el manejo de nitrógeno. Libro del 9o. Curso Internacional de Agricultura de Precisión y 4a. Expo de Maquinarias Precisas. *In* Resúmenes de trabajos presentados. EEA Manfredi. Manfredi, Córdoba. AR.

Schlindwein, J.A. e I. Anghinoni. 2000. Variabilidade espacial de atributos de fertilidade e amostragem de solo no sistema plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 24: 85-91.

Wendling, A. 2005. Recomendação de Nitrogênio e Potássio para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai . 123 f. Mestrado em Ciência do Solo – Universidade Federal de Santa Maria.

MANEJO DEL FÓSFORO EN SITIOS CONTRASTANTES DE LA REGIÓN MESOPOTÁMICA ARGENTINA BAJO USO FORESTAL

Ana María Lupi[1], Jorge Aparicio[2], Teresa Boca[3], Diana Díaz[4], María de los Ángeles García[4], Luciana Ingaramo[4], César Quintero[5] y Graciela Boschetti[5]

Introducción

El fósforo (P) es uno de los elementos esenciales para el crecimiento de los cultivos y, en consecuencia, su manejo adecuado es fundamental para lograr sistemas de producción sustentables. Las principales vías de salidas de P de un sistema en producción son la continua extracción a partir de la cosecha junto con pérdidas de suelo por erosión (Díaz Zorita y Barraco, 2002, Martiarena et al., 2009). En sistemas forestales productivos, la pérdida de P depende de la longitud de la rotación (en rotaciones cortas la pérdida es mayor que en las largas), del destino de la producción (biomasa, madera de calidad), del sistema de cosecha empleado (extracción del fuste o del árbol completo) y del sistema de establecimiento que se aplique (quema, laboreo o ausencia de estos). Esto define la magnitud de los impactos sobre la capacidad productiva de los suelos.

La región mesopotámica argentina incluye las provincias de Entre Ríos, Corrientes y Misiones en el noreste del país. Los suelos mesopotámicos tienen contenidos de P total medios a bajos (Boschetti et al., 2003) y se conoce poco sobre el rol de las diferentes formas del P en la nutrición de los cultivos forestales. Los estudios realizados sobre estos suelos analizan el efecto de diferentes manejos sobre el P disponible siendo poco frecuentes las investigaciones sobre las formas del P, su biodisponibilidad y su dinámica como consecuencia de las prácticas aplicadas en el periodo inter-rotación.

Debido a los cambios ocurridos en los últimos años en relación al manejo forestal inter-rotación, este artículo tiene como objetivo difundir los resultados de cuatro ensayos que evalúan el efecto de diferentes sistemas de manejo de residuos de la cosecha de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) y de pino (*Pinus elliottii*), sobre la dinámica del P. La importancia de abordar esta línea de trabajo en la Mesopotamia radica en que se trata de la principal región forestal del país y en la diversidad de suelos ocupados con bosque de especies de rápido crecimiento. Comprender las características particulares de la dinámica del P en cada suelo permitirá evaluar y optimizar la silvicultura inter-rotación en cada ambiente.

Materiales y métodos

Se trabajó con suelos de 4 sitios localizados en el noreste de Entre Ríos (S1 y S2) y sudoeste de Corrientes (S3 y S4), que se encuentran bajo uso forestal y han tenido uno o dos ciclos o rotaciones forestales previos. En la **Tabla 1** se presenta una síntesis de las características edáficas y climáticas de los sitios estudiados.

Diseño experimental y tratamientos

1. *Eucalyptus grandis* en el NE de Entre Ríos.

   En S1 y S2 se aplicaron los siguientes tratamientos de manejo de residuos de la cosecha: 1) Extracción total de residuos (ER): luego de la cosecha, toda la biomasa remanente (mantillo, sotobosque, residuos de la cosecha) fue retirada de la parcela. 2) Conservación de residuos sin descortezado (CR): luego de la cosecha, sin descortezado a campo, toda la biomasa fue mantenida en la parcela. 3) Quema de residuos (QR): luego de la cosecha los residuos fueron quemados. 4) Conservación de residuos, doble adición (DA): luego de la cosecha toda la biomasa fue mantenida en la parcela y se adicionó el material extraído del tratamiento ER.

   En S1, los tratamientos se aplicaron entre agosto y noviembre de 2005, mientras que en S2 se aplicaron entre noviembre y diciembre del mismo año. Los ensayos se dispusieron bajo un diseño completamente aleatorizado (DCA) con 4 repeticiones en S1 y 3 repeticiones en S2. Cada parcela experimental contó con una superficie de 1352 m^2. El suelo no recibió laboreo y la plantación de *Eucalyptus grandis* se realizó en forma manual, con pala.

   A partir de un muestreo de los residuos realizado luego de la cosecha, se estimó la cantidad de P almacenada en los mismos. Se cuantificó la materia seca proveniente de la copa (ramas, hojas y frutos) y del mantillo y la cantidad promedio de P en residuos.

2. *Eucalyptus grandis* y *Pinus* en el SO de Corrientes.

   En S3 y S4 se aplicaron los siguientes tratamientos de manejo de residuos de la cosecha: 1) Cosecha árbol completo (CAC): se extrajo el árbol entero del lote, en el sitio sólo permanece el mantillo. 2)

[1] Instituto de Suelos CIRN, INTA, Castelar, Buenos Aires. Correo electrónico: amlupi@cnia.inta.gov.ar
[2] EEA Bella Vista, INTA, Corrientes.
[3] Instituto de Clima y Agua CIRN, INTA, Castelar, Buenos Aires.
[4] EEA Concordia, INTA, Concordia, Entre Ríos.
[5] Facultad de Ciencias Agrarias UNER, Oro Verde, Entre Ríos.

Conservación de residuos (CR): Todos los residuos de la cosecha permanecen esparcidos en la parcela. 3) Quema de residuos (QR): Los residuos esparcidos sobre el suelo fueron quemados mediante un fuego controlado.

Los tratamientos se dispusieron con un diseño en bloques completos al azar (DBCA), en 5 repeticiones en S3 y 4 repeticiones S4. Cada unidad experimental contó con una superficie de 1680 m^2. En S3, los tratamientos se aplicaron entre septiembre y octubre de 2005, y la plantación con pino híbrido (*Pinus elliottii x Pinus caribea var. hondurensis*) se realizó en noviembre. En S4, la cosecha se realizó en el año 2006, la quema a fines de septiembre de 2007 y la plantación en octubre de 2007.

Fraccionamiento de P

De cada parcela se conformaron muestras compuestas de suelo (a partir de 30 submuestras) en las profundidades 0-5 cm y 5-10 cm. En éstas se determinaron las siguientes fracciones del P mediante el método de Hedley et al. (1982): 1) P muy lábil, compuesto por P inorgánico en la solución del suelo y P adsorbido muy débilmente sobre hidróxidos y/o carbonatos, que se encuentra disponible para la planta y microorganismos ($P_{muy\ lábil}$); 2) P inorgánico lábil (P_{il}) es el P fácilmente disponible para la planta; 3) P orgánico lábil fácilmente mineralizable (P_{ol}); 4) P inorgánico moderadamente lábil (P_{iml}) unido a la superficie de las arcillas o de los óxidos e hidróxidos de Fe y Al, que es disponible para la planta y microorganismos en el mediano plazo; 5) P orgánico moderadamente lábil (P_{oml}), asociado a compuestos orgánicos tales como ácidos fúlvicos y húmicos; 6) P inorgánico relativamente insoluble ligado al calcio (Ca) y P ocluido en suelos meteorizados ($P_{i\ Ca}$), no disponible para las plantas y microorganismos en el corto y mediano plazo y no reactivo. 7) P residual, formas inorgánicas y orgánicas químicamente muy estables e insolubles ($P_{i\ res}$), no reactivo y no disponible para las plantas y microorganismos en el corto y mediano plazo; y 8) P total (P_t).

Resultados y discusión

Fracciones de P en los suelos de los cuatro sitios

La información obtenida sobre las fracciones del P en los 3 órdenes de suelo bajo uso forestal se enmarca dentro de lo expresado en otras investigaciones realizadas sobre estos suelos en la región (Zubillaga y Giuffré, 1999; Fernández López et al., 2002; Boschetti et al., 2003; Fernández López et al., 2006). En la **Figura 1** se observa que el P total (P_t) varió con el grado de

Tabla 1. Localización y características de los sitios donde se instalaron los experimentos.

	S1	S2	S3	S4
Localización	Concordia Entre Ríos	Concordia Entre Ríos	Bella Vista Corrientes	Bella Vista Corrientes
Clima	Templado húmedo		Cálido templado	
Temperatura media anual	18.5 °C		20 °C	
Precipitación anual-ETP anual	1275 mm - 1420 mm		1168 mm - 1330 mm	
Tipo de suelo	Peluderte argiacuólico Serie Yerua	Hapludol fluventico Serie Calabacilla	Psamacuent típico Serie Pampin	Udipsament ácuico Serie Bravo
Textura del horizonte A1	Franco limoso	Franco arcillo arenoso	Arenoso	Arenoso
Materia orgánica, %	3.17	2.03	0.80	0.89
pH agua	5.80	5.30	4.64	4.73
P-Bray, mg kg^{-1}	1.81	3.23	5.09	5.59
Crecimientos promedio, m^3 ha^{-1} $año^{-1}$	20-26	40-45	22-30	22-30
Uso previo	1 rotación de *E. grandis* con 2 ciclos de rebrotes	1 rotación de *E. grandis* con 2 ciclos de rebrotes	1 rotación de *Pinus elliottii* de 24 años	1 rotación de *E. grandis* con 1 ciclo de rebrotes
Período hasta el muestreo de suelos*	18 meses	22 meses	22 meses	10 meses

* **Tiempo desde la quema hasta el muestreo de suelo.**

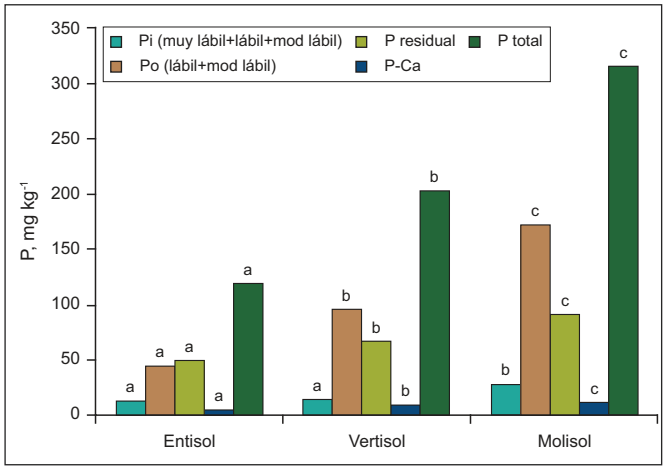


Figura 1. Concentración de P total, P orgánico, P inorgánico, P unido al Ca, P residual y P total, en la profundidad 0-10 cm, en tres suelos bajo uso forestal. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre órdenes de suelo.

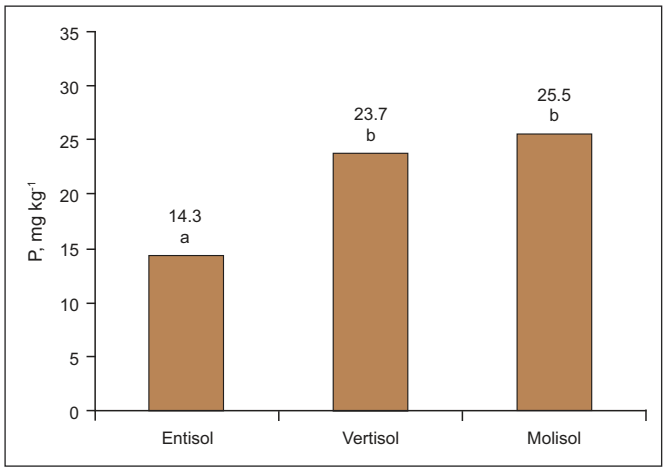


Figura 2. Fósforo disponible en tres suelos contrastantes bajo uso forestal. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre órdenes de suelo.

evolución de los suelos, desde un promedio de 118 mg P kg^{-1} en el Entisol de Corrientes (S3 y S4) hasta 314 mg kg^{-1} en Molisol de Entre Ríos (S2). El Vertisol (S1) ocupó una situación intermedia. Las diferencias entre los suelos reflejan el efecto de la génesis sobre la química del P y la fertilidad del suelo.

Las formas inorgánicas ($P_{i\ muy\ lábil\ +\ lábil\ +\ mod\ lábil}$) fueron menores que las formas orgánicas ($P_{o\ lábil\ +\ mod\ lábil}$) y las no reactivas ($P_{i\ res}$ + $P_{i\ Ca}$). Proporcionalmente, el P_i fue menor en los suelos más evolucionados. Por otra parte, el P_o creció con el aumento de P_t. El valor más bajo se encontró en el Entisol (44.0 mg P kg^{-1}), con los menores niveles de materia orgánica (MO) y el valor más alto en el Molisol (171.4 mg P kg^{-1}), un suelo más rico en MO. Esta secuencia se debe a que durante la evolución de los suelos se incrementan las fracciones orgánicas debido al aporte de MO que realiza la vegetación en el horizonte superficial; efecto que se traduce en un incremento en el contenido de P_t (Cross y Schlesinger, 1995).

En todos los suelos predominó el P_o que actúa como reserva (P_{oml}). Esta fracción ligada a la MO de mediana estabilidad se corresponde con estructuras orgánicas de mediana a alta complejidad que se encuentran estabilizadas (Tiessen et al., 1984). En general, cuanto mayores son los niveles de limo+arcilla, mayores pueden ser las reservas de P_o del suelo por la protección que genera la fracción mineral. En este sentido, las reservas de P se ordenaron de la siguiente forma: Entisol con 29.2 mg kg^{-1}, Vertisol con 75.3 mg kg^{-1} y Molisol con 137.6 mg kg^{-1}.

El P_{oml} fue de dos (Entisol) a cuatro (Molisol) veces superior que el P_{ol} asociado a la MO, el cual se mineraliza en el corto plazo (ácidos fúlvicos o MO particulada). En el Entisol, el P_{ol} juega un rol importante en la nutrición ya que naturalmente contiene pocas reservas orgánicas.

En todos los suelos estudiados, el P disponible para las plantas ($P_{muy\ lábil\ +\ lábil}$) fue relativamente bajo (**Figura 2**) y representó menos del 15% del P_t. El valor hallado en el Entisol fue significativamente más bajo que el determinado en el Vertisol y el Molisol, sin embargo, no es un valor crítico limitante para el crecimiento del cultivo forestal.

Tal como lo plantean Tiessen et al. (1984), las correlaciones indican que, en el Molisol, la mayor parte del P disponible ($P_{muy\ lábil\ y\ Pil}$) proviene de las reservas inorgánicas (P_{iml}), que explican en un 74% y 87% de aquellas fracciones (**Tabla 2**). Paralelamente, un aumento en el P_{il} significó una reducción en la reserva orgánica (P_{oml}), lo cual indicaría que la mineralización de esta fracción abastecería también al P_{il}.

En el Vertisol, el $P_{muy\ lábil}$ en solución y el P_{il} se asociaron con las reservas orgánicas e inorgánicas (P_{oml} y P_{iml}). El aporte de las formas orgánicas fue menor en relación a las formas inorgánicas. En el Entisol, las correlaciones fueron bajas pero significativas e indican que a medida que aumenta la reserva de P_o (P_{oml}) aumenta el P en solución, y a medida que aumenta el P_{il} disminuye su forma orgánica. En definitiva, las formas lábiles inorgánicas se explican a partir de las fracciones orgánicas poco trasformadas reflejando la necesidad de un adecuado manejo de los aportes de MO fresca como fuente de P disponible.

La fracción unida al Ca ($P_{i\ Ca}$) tuvo menor representatividad que el $P_{i\text{-}res}$ y evidenció la siguiente tendencia según orden de suelo: Molisol > Vertisol > Entisol. La mayor abundancia en el Molisol se debe a la estabilidad de las uniones P-Ca en estos suelos con un elevado porcentaje de saturación de bases (Tiessen et al., 1984). La fuerte correlación encontrada entre esta fracción y el $P_{muy\ lábil}$ + P_{il} (r = 0.74), nos muestra que a pasar de su baja velocidad de reciclaje contribuye con el P disponible para las plantas.

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre el P disponible y las fracciones orgánicas e inorgánicas lábil y moderadamente lábil.

Suelos	Fracciones de P					
	$P_{muy\ labil}$			P_{il}		
	P_{ol}	P_{oml}	P_{iml}	P_{ol}	P_{oml}	P_{iml}
Vertisol	0.17	0.45 *	0.54 *	- 0.35 *	0.36 *	0.50 *
Molisol	- 0.26	- 0.27	0.74 *	- 0.35	- 0.61 *	0.87 *
Entisol	0.11	0.39 *	0.19	- 0.28 *	0.07	0.20

*** Significativo a nivel de probabilidad $p \leq 0.05$.**

Fracciones de P en diferentes sistemas de manejo de los residuos de la cosecha

En el corto plazo, la QR fue el único tratamiento que generó modificaciones en las fracciones de P, provocando un incremento del P_i y, en especial, del P disponible para las plantas ($P_{muy\ lábil}$, P_{il}). Los cambios ocurrieron básicamente en la profundidad 0-5 cm. En el Vertisol (S1), el $P_{muy\ lábil}$ y el P_{il} en QR fueron 1.8 y 2.0 veces mayores a CR, respectivamente. Además, fracciones más estables como el P_{iml} y el $P_{i\ Ca}$ también aumentaron 1.4 y 1.6 veces, respectivamente, en relación al tratamiento CR. En el Entisol con residuos de *Pinus* (S3), el efecto de la quema se detectó sólo en la fracción lábil (P_{il}) y en la más resistente o no reactiva ($P_{i\ Ca}$) con aumento de 2.1 y 1.3 veces respecto de CAC. El aumento de las diferentes fracciones inorgánicas en S1 y S3 expresa una redistribución del P que ingresó al suelo; comportamiento mencionado por Picone et al. (2007) y Boschetti et al. (2008) al evaluar el efecto de diferentes fertilizantes fosforados en Molisoles, Vertisoles e Inceptisoles. En el Entisol con *Eucalyptus* (S4), el incremento se encontró sólo en el $P_{muy\ lábil}$ pero los efectos se vieron en ambas profundidades. La concentración de P disponible, suma de las fracciones del P en solución más el P fácilmente disponible ($P_{i\ muy\ lábil}$ + P_{il}), en QR fue 2.6 y 2.2 veces superior al tratamiento con residuos para las profundidades 0-5 y 5-10 cm, respectivamente. El aumento en subsuperficie puede asociarse a la translocación de las cenizas en los macroporos de la arenas, tal como lo indican Turrion et al. (2010).

A efectos de simplificar el análisis de las fracciones, en la **Figura 3** se presenta el comportamiento del P disponible para la profundidad 0-5 cm de cada tratamiento y tipo de suelo. Como se observa, no se advierten cambios entre tratamientos en los sitios muestreados a los 22 meses (S2 y S3) y esto puede relacionarse con diferentes procesos sucedidos en este tiempo: 1) el P disponible por la quema pudo ser absorbido por los vegetales (malezas y cultivo), 2) pudo suceder una redistribución del P hacia diferentes fracciones, 3) ocurrió una re-adsorción a la fracción mineral, y/o 4) trasformarse en P_o por procesos de inmovilización microbiana. Las diferencias significativas en S1 y S4, pueden asociarse al menor tiempo trascurrido desde la quema al muestreo y la mayor parte del P se localizaría aún en la solución del suelo.

El incremento en el P_i generado por QR produjo un aumento significativo en el P_t en el Entisol con *Pinus* (S3) donde se presentaron las mayores cantidades de P en residuos (25 kg P ha^{-1}) (**Figura 4**). En el Molisol (S2) no se detectaron cambios en las fracciones inorgánicas y en el P_t como consecuencia de la quema de los residuos.

Entre los factores que determinan las modificaciones de las fracciones del P debido a la quema se encuentran: la cantidad de material en combustión, la intensidad de la quema y el tiempo trascurrido desde su aplicación. Es importante destacar que a diferencia de las quemas

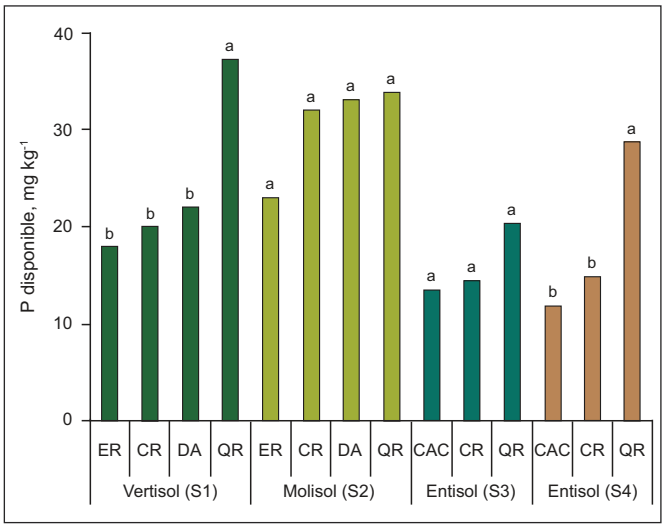


Figura 3. Fósforo disponible ($P_{i\ muy\ lábil\ +\ lábil}$) en la profundidad 0-5 cm, bajo diferentes sistemas de manejo de residuos aplicados en diferentes sitios. ER: Extracción de residuos. CR: Conservación de residuos. QR: Quema de residuos. DA: Doble adición de residuos. CAC: Cosecha del árbol completo. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos dentro de cada orden de suelo ($p < 0.05$).

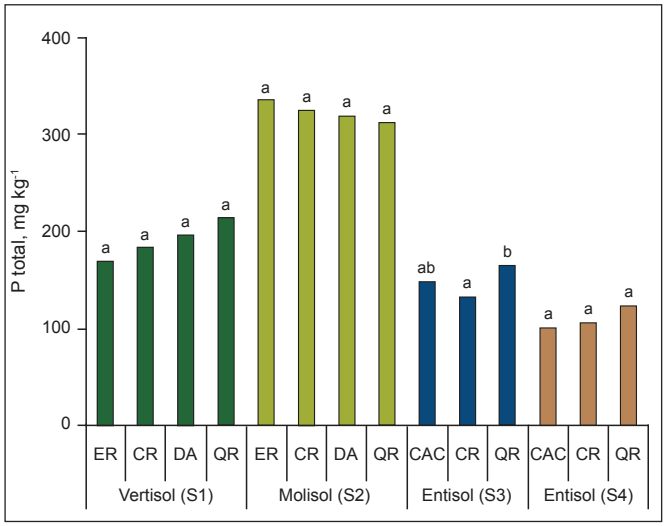


Figura 4. Fósforo total (P_t) en la profundidad 0-5 cm de diferentes sistemas de manejo de residuos, según sitios. ER: Extracción de residuos. CR: Conservación de residuos. QR: Quema de residuos. DA: Doble adición de residuos. CAC: Cosecha del árbol completo. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos dentro de cada orden de suelo ($p < 0.05$).

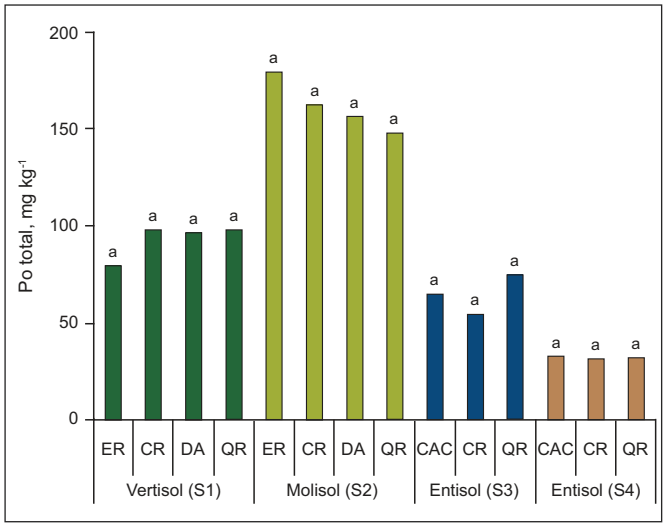


Figura 5. Fósforo orgánico total ($P_{ol + ml}$) en la profundidad 0-5 cm de diferentes sistemas de manejo de residuos forestales aplicados en diferentes suelos. ER: Extracción de residuos. CR: Conservación de residuos. QR: Quema de residuos. DA: Doble adición de residuos. CAC: Cosecha del árbol completo. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos dentro de cada orden de suelo ($p < 0.05$).

intensas (> 500 °C), las quemas leves-moderadas tienen un efecto temporal dado que los cambios que se generan no son profundos y, en consecuencia, el sistema conserva resiliencia. La factibilidad de detectar los cambios en las fracciones del P disminuye con el tiempo. En esta experiencia, la temperatura de la quema debió superar los 120 °C, de lo contrario el P disponible no debió verse afectado (Serrasolas et al., 2008). Según se indica, entre 170 °C y 300 °C, el P_o del suelo comienza su mineralización térmica con algunos cambios en la MO (Giovannini et al., 1990; Neary et al., 2005), llegando a su máxima combustión a partir de los 500 °C donde se consigue la liberación del P y la combustión completa de la MO con la volatilización de los fosfatos (Raison et al., 1985; Giardina et al., 2000 a, b; Hepper et al., 2008).

La ausencia de modificaciones en las fracciones orgánicas (**Figura 5**) nos permite inferir que el incremento en el P disponible es una consecuencia de las cenizas que ingresaron al suelo luego de la combustión de los residuos y de la muerte de microorganismos por efecto del calentamiento (Raison et al., 1985; Romayá et al., 1994; Giardina y Rhoades, 2001; Kolawole et al., 2004 y Serrasolas et al., 2008).

De haber ocurrido mineralización del P_o del suelo, ésta hubiera tenido lugar a temperaturas del orden de los 170 °C a 200 °C. A partir de ello, se puede descartar un impacto significativo de la quema sobre la fracción orgánica y mineral del suelo, tal como se observa en las determinaciones de carbono orgánico total (COT) realizadas en el Vertisol y en el Molisol (**Figura 6**). En forma adicional, ya que la volatilización del P no ocurre a temperaturas menores a 700 °C, la mayor parte de este elemento P quedó retenido en el suelo (Gray y Dighton, 2006; Serrasolas et al., 2008). Así, las posibles vías de salida podrían haber sido erosión, por humos y transporte aéreo de partículas (Neary et al., 2005).

La conservación de residuos o su eliminación no produjo modificaciones significativas en las fracciones del P_o, lo cual es concordante también con la ausencia de modificaciones en los niveles de COT presentados en la **Figura 6** para S1 y S2. Este comportamiento puede explicarse a partir del escaso tiempo trascurrido desde el inicio del experimento en combinación con otros factores como la baja calidad de los residuos forestales (elevadas relaciones C/N, presencia de taninos, resinas, etc.). En los tratamientos sin residuos (ER o CAC) de S1 y S2, la MO se encuentra protegida de ataque de los microorganismos debido a la ausencia de disturbios como el laboreo. Adicionalmente, la humificación del C aportado por las raíces del cultivo previo y de las malezas podrían compensar las pérdidas ocurridas en la fracción orgánica siendo el balance insuficiente para detectar cambios.

En el tratamiento CR es esperable que las reservas de P del suelo incrementen con el tiempo ya que restan descomponer residuos leñosos. En ER y CAC, las pérdidas de P ocurridas en la cosecha se acentúan por la exportación de los residuos. La extracción de residuos cuantificada en nuestros sitios genera una salida adicional del sistema que puede ser de 13 a 25 kg P ha^{-1}. En S1, la cantidad promedio de P en los residuos de la cosecha de *E. grandis* fue de 13.5 kg ha^{-1} en CR, QR y ER, y 18.6 kg ha^{-1} en DA. En S2, la cantidad de P en residuos fue de 14.4

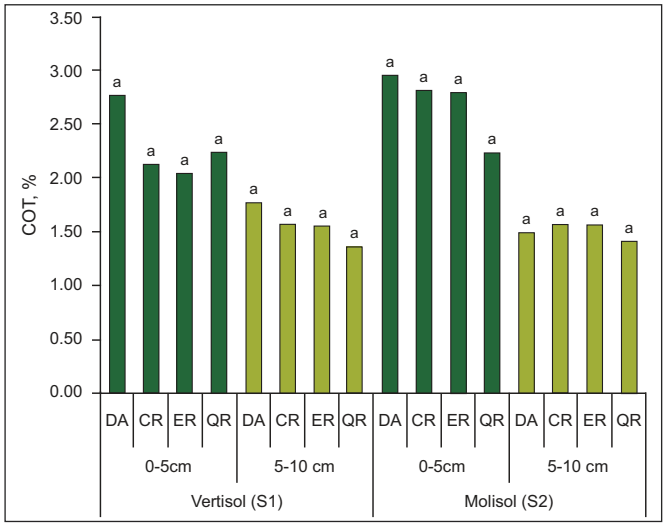


Figura 6. Carbono orgánico total (COT, %) para los distintos tratamientos en un Vertisol y un Molisol bajo uso forestal. S1: Vertisol, S2: Molisol. ER: Extracción de residuos. CR: Conservación de residuos. QR: Quema de residuos. DA: Doble adición de residuos. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos en una misma profundidad y sitio ($P < 0.05$).

kg ha^{-1} en CR, QR y ER; y de 20.4 kg ha^{-1} en DA. En S3, los residuos de *Pinus elliottii* presentaron 25 kg P ha^{-1} en CR y QR. No se cuantificó la cantidad de P en los residuos en S4. Estos valores serían equivalentes a extracciones por cosecha: a modo orientativo, en plantaciones adultas de *Pinus spp*, Goya et al. (2003) y Martiarena (2008) informan que en la madera se exportan entre 13 y 29 kg P ha^{-1} (según la intensidad de raleo y para la cosecha del fuste comercial). Para *Eucalyptus*, estos valores son de 24.8 y 34.6 kg ha^{-1} en plantaciones de 8 y 11 años, respectivamente (Goya et al., 2009).

Conclusiones

La gran extensión territorial que abarca la Mesopotamia Argentina va acompañada de una gran variabilidad de ambientes donde los suelos difieren en su formación y evolución, imprimiéndole en cada caso características particulares. Aplicar una silvicultura intensiva con un planteo sustentable implica conocer las potencialidades y las limitantes de cada ambiente y, a partir de esto, manejar cada uno de ellos en el marco de una silvicultura sitio-especifica integrada con buenas prácticas.

Los contenidos de P total en los suelos estudiados son altamente contrastantes. Las concentraciones de P total en el Molisol prácticamente triplican lo observado en el Entisol (S3 y S4) y las diferencias prácticamente se cuadruplican cuando se considera la fracción orgánica del nutriente.

Los niveles de P disponible de estos suelos variaron desde 14 mg kg^{-1} hasta 25 mg kg^{-1} respectivamente. A pesar de las diferencias, estos sitios pueden ser calificados de buena calidad si se los compara con suelos forestales de otras regiones del mundo. Los niveles de P disponible son suficientes para satisfacer las demandas anuales de los cultivos forestales, inclusive las de *Eucalyptus* que es más exigente en relación a *Pinus*. Las demandas anuales de P del suelo en los primeros años se encuentran entre 2-5 kg P ha^{-1} año^{-1}. Las importantes tasas de crecimiento que se pueden obtener en estos suelos se correlacionan con la ausencia de deficiencias de P.

La extracción de P generada por la cosecha representa una salida neta del sistema. Las posibles pérdidas por manejos no adecuados a las características de los suelos (sistemas intensivos de alta densidad, quemas moderadas a intensas, ciclos muy cortos) impactarán de manera diferencial cada sitio. Es esperable que las deficiencias se manifiesten de manera más acentuada y en forma más temprana en los Entisoles.

En el corto plazo, la conservación de residuos (CR) no generó cambios en las fracciones del P pero es esperable una ganancia en las reservas de este nutriente debido a la descomposición de los residuos (ramas y tocones presentes en el terreno al momento del muestreo). En este sentido, cabe destacar que tratamientos como CR y ER posiblemente requieran evaluaciones que involucren el ciclo forestal completo.

El cambio más destacado en el corto plazo fue debido a la acción del fuego. La quema de los residuos aumentó el P disponible sin modificar las fracciones orgánicas del suelo por calentamiento. El fuego resultó en una herramienta de transferencia instantánea de nutrientes de la biomasa al suelo.

Si bien no se rescatan impactos negativos directos por la quema y la extracción de residuos, se remarca que son prácticas no recomendadas por el potencial efecto negativo directo a largo plazo y el impacto negativo indirecto sobre la calidad y funcionamiento del suelo en general (desprotección de la superficie, riesgo de erosión, evaporación, compactación, etc.). Sin duda, los impactos serán más tempranos y mayores si estos tratamientos se aplican en suelos Entisoles.

Recomendaciones generales

Realizar un adecuado manejo del P en el sistema de producción significa aplicar una serie de prácticas que se traducen en la búsqueda de un sistema productivo sustentable. La aplicación de buenas prácticas orientadas a minimizar las pérdidas de P tiene impactos a diferentes escalas que van desde el lote hasta la cuenca.

En este sentido se recomienda:

- Evitar la exportación o eliminación de la biomasa en todos los sitios, pero de manera particular en:
  - ✓ Los suelos de escasa profundidad efectiva.
  - ✓ Los suelos con volúmenes restringidos de enraizamiento o con un alto porcentaje de fragmentos gruesos.

- ✓ Los suelos de textura gruesa y con bajas reservas de P.

- Reducir al mínimo la perturbación o laboreo del suelo.
- Evitar las prácticas que eliminan las capas orgánicas del suelo (fuego, exportación de mantillo y de biomasa como combustible) o que generen mezcla del horizonte orgánico con el suelo mineral.
- Maximizar la conservación de los nutrientes en el sitio:
  - ✓ Promoviendo la rápida ocupación del sitio con coberturas vivas.
  - ✓ Manteniendo los residuos muertos sobre el suelo.
  - ✓ Descortezando en el sitio.
  - ✓ Reponiendo el P exportado.
  - ✓ Manteniendo franjas de vegetación a lo largo de los cursos de agua.

Bibliografía

Boschetti, N.G., C.E. Quintero, R.A. Benavides, y L. Giuffré. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la mesopotamia Argentina. Ciencia del Suelo 21(1):1-8.

Boschetti, N.G., C.E. Quintero, y L. Giuffré. 2008. Phosphorus fractions of soils under Lotus corniculatus as affected by different phosphorus fertilizers. Biol Fertil Soil. 45:379-384.

Cross, A.F., y W.H. Schlesinger. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. Geoderma 64:197-214.

Díaz-Zorita, M., y M. Barraco. 2002. ¿Cómo es el balance de P en los sistemas pastoriles de producción de carne en la región pampeana?. Informaciones Agronómicas del Cono Sur 13:8-11.

Fernández López, C., S. Vázquez, y H.C. Dalurzo. 2002. Formas de fósforo en suelos altamente meteorizados del sur de la provincia de Misiones. Ci. Suelo (Argentina) 20(2):81-87.

Fernández López, C., R. Mendoza, y S. Vázquez. 2006. Fracciones de fósforo en suelos de Corrientes con producción citrícola, arrocera y pastoril (Nota Científica). Ci. Suelo (Argentina) 24(2):161-168.

Giardina, C.P., R.L. Sanford, y I.C. Døckersmith. 2000a. Changes in soil phosphorus and nitrogen during slash and burn clearing of a dry tropical forest. Soil Sci. Am J. 64:399-405.

Giardina, C.P., R.L. Sanford, I.C. Døckersmith, y V. Jaramillo. 2000b. The effects of slash burning on ecosystem nutrients during the land preparation phase of shifting cultivation. Plant and Soil. 220:247-260.

Giardina, C., y C. Rhoades. 2001. Clear cutting and burning affect nitrogen supply, phosphorus fractions and seedling growth in soils from a Wyoming lodgepole pine forest. Forest Ecology and Management 140:19-28.

Giovannini, G., S. Lucchesi, y M. Giachetti. 19990. Effects of heating on some chemical parameters related to soil fertility and plant growth. Soil Sci. 149(6):255-261.

Goya, J.F., C. Pérez, J.L. Frangi, y R. Fernández. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. Ecología Austral 13:139-150.

Goya, J.F., J.L. Frangi, G. Denegri, y F. Larroca. 2009. Simulación del impacto de diferentes regimenes de cosecha sobre el capital de nutrientes e indicadores económicos en plantaciones de *E. grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. AUGMDomus 1:1-17.

Gray, D.M., y J. Dighton. 2006. Mineralization of forest litter nutrients by heat and combustion. Soil Biol. Biochem. 38:1469-1477.

Hedley, M.J., J. Stewart y B. Chauhan. 1982. Changes in Inorganic and Organic Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations.Soil Sci. Soc. Am. J. 46:970-97

Hepper, E., A. Urioste, V. Belmonte, y D. Buschiazzo. 2008. Temperaturas de quema y propiedades físicas y químicas de suelos de la región semiárida pampeana central. Ci. Suelo (Argentina) 26(1):29-34.

Kolwole, G.O., H. Tijani-Eniola, y G. Tian. 2004. Phosphorus fractions in fallow systems of West Africa: Effect of residue management. Plant and Soil. 263:113-120.

Martiarena, R. 2008. Cuantificación y evaluación de la cantidad del P exportado en plantaciones de *Pinus taeda* conducido con diferentes intensidades de raleo y alternativas de sistemas de cosecha. Tesis de Maestria UNAM. 76 p.

Martiarena, R., A. Von Wallis, y O. Knebel. 2009. Pérdida de nutrientes durante la cosecha y el establecimiento forestal, en un rodal de *Pinus taeda* en Misiones, Argentina. Revista Forestal Venezolana, 53(2):165-173.

Neary, D.G., K.C. Ryan, y L.F. DeBano (eds.). 2005. (revised 2008). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 4. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 p.

Picone, L., I. Capozzi, E. Zamuner, E. Echeverría, y H. Sainz Rozas. 2007. Transformaciones de fósforo en un Molisol bajo sistemas de labranza contrastantes. Ci. Suelo (Argentina) 25(2):99-107.

Raison, R.J., P.K. Khanna, y P.V. Woods. 1985. Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. Can J Forest Res. 15:132–140.

Romanya, J., P.K. Khanna, y R.J. Raison. 1994. Effects of flash burning on soil phosphorus fractions and sorption and desorption of phosphorus. Forest Ecology and Management 65:89-103.

Serrasolas, I., J. Romayá, y P. Khanna. 2008. Effects of heating and autoclaving on sorption and desorption of phosphorus in some forest soil. Biol Fertil Soil. 44:1063-1072.

Tiessen, H., J.W. Stewart, y C.V. Cole. 1984. Pathway of phosphorus transformation in soil of differing pedogenesis Soil Sci. Soc. Am. J. 48:853-858.

Turrion, M.B., F. Lafuente, M.J. Aroca, O. López, R. Mulas, y C. Ruipérez. 2010. Characterization of soil phosphorus in a fire-affected forest Cambisol by chemical extractions and 31P-NMR spectroscopy analysis. Science of the Total Environment 408:3342–3348.

Zubillaga, M.S., y L. Giuffré. 1999. Soil phosphorus mobilization in different taxonomic orders. Journal Plant Nutrition and Soil Science 162(2):201-205.

FÓSFORO EXTRACTABLE EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LAS REGIONES PAMPEANA Y EXTRAPAMPEANA DE ARGENTINA

Hernán Sainz Rozas[1,2], Hernán E. Echeverría[1] y Hernán Angelini[1]

Introducción

Las recomendaciones de fertilización fosfatada de los cultivos en la región pampeana argentina se basan en el rendimiento objetivo y la concentración de fósforo (P) extractable en los primeros 20 cm de suelo (Echeverría y García, 1998). En Molisoles de la región pampeana, con pH sub-ácido a neutro, el método de extracción propuesto por Bray y Kurtz (Bray I; Bray y Kurtz, 1945) es el más difundido para determinar la disponibilidad de P (García et al., 2007). La calibración en Argentina mostró que la concentración de P-Bray I en los primeros 20 cm, correlacionó positivamente con la respuesta a P de los principales cultivos de la región pampeana, con umbrales críticos que variaron de 15-18, 15-16 y 12-13 mg kg^{-1} para trigo, maíz y soja, respectivamente (Zamuner et al., 2006; García et al., 1997; Echeverría et al., 2002).

Los suelos de la región pampeana argentina presentaban en condición prístina niveles muy bajos (< 10 mg kg^{-1}) de P extractable en superficie en el este y sudeste de Buenos Aires, entre Ríos y Corrientes, niveles medios (10-20 mg kg^{-1}) en el este de Santa Fe, el sudeste de Córdoba y una franja norte-sur en el centro de Buenos Aires, y niveles altos (> 20 mg P kg^{-1}) hacia el oeste de Santa Fe, centro y sur de Córdoba y noreste de la Pampa (Darwich, 1983). La continua remoción en los granos y la escasa reposición del P extraído (García y González Sanjuan, 2010), han resultado en la disminución del P extractable, y algunas áreas han pasado de rangos de valores promedio altos (> 20 mg kg^{-1}) a medios (10-20 mg kg^{-1}) o de rangos medios a bajos (< 10 mg kg^{-1}) (Montoya et al., 1999; García, 2001). Sin embargo, no se cuenta con información actualizada de la disponibilidad de P-Bray I en suelos de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina.

Considerando la importancia de este nutriente para los cultivos se plantearon como objetivos: i) determinar la distribución de la concentración de P-Bray I en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina a través de la confección de mapas; y ii) comparar estos valores con los resultados de un relevamiento realizado hace 25 años.

Materiales y métodos

Se recopiló información de reconocidos laboratorios privados y pertenecientes a Estaciones Experimentales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) que aplican el protocolo de determinación de P-Bray I, indicado en la norma IRAM-SAGPyA 29570-1 (en revisión), la que se basa en la metodología de extracción propuesta por Bray y Kurtz (1945) con determinación colorimétrica del fosfato.

Las muestras correspondieron al estrato superficial de 0-20 cm y fueron extraídas durante las campañas 2005 y 2006 de suelos con capacidad de uso agrícola. La superficie relevada abarcó la mayor parte de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba y Entre Ríos, y algunos departamentos de La Pampa, Corrientes, Salta, Santiago del Estero y Tucumán. Se analizaron 34 328 muestras, proviniendo el mayor número de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba (**Tabla 1**). Las muestras con valores de pH superiores a 7.5 fueron eliminadas del análisis debido a que la metodología Bray subestima el P extractable en suelos con pH alcalinos.

Se determinó el promedio, mediana, desvío estándar, valor mínimo, máximo y los percentiles a nivel de departamento, región y provincia. Para generar los mapas se utilizó el programa ESRI ArcMap (2009) con cartografía base correspondiente a la división política del país. Se generó un punto, latitud y longitud correspondiente al centro de cada partido o departamento, el cual se relacionó con el valor de mediana. El método de interpolación utilizado para realizar el mapa de P-Bray I fue el Kriging Ordinario (KO), el que calcula los valores predichos según las ecuaciones descriptas por Schloeder et al. (2001).

La comparación de la predicción del KO se realizó mediante el análisis de los valores predichos versus observados, los que se obtuvieron por validación cruzada, que consiste en retirar o remover un valor observado, estimarlo con los valores mas cercanos, para luego comparar el valor estimado con el removido (Villatoro et al., 2008). También se calculó la eficiencia de predicción (EP), que estima que tan efectiva es la misma respecto del uso del promedio general de los datos (Schloeder et al., 2001). Un valor cercano a 100 indica predicción perfecta, mientras que valores bajos o negativos indican pobre estructura espacial (Kravchenco, 2003). La EP fue calculada según la siguiente ecuación:

$$EP = 100 \times \left\{ 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} [Z(X_i) - Z_{pred}]^2}{\sum_{i=1}^{n} [Z(X_i) - Z_{prom}]^2} \right) \right\}$$

[1] **Unidad Integrada Balcarce EEA INTA - FCA UNMDP, C.C. 276, (7620) Balcarce, Argentina. Correo electrónico: fertibalc@balcarce.inta.gov.ar**

[2] **CONICET**

Donde "n" es el número de observaciones, "$Z(X_i)$" es cada observación, "Z_{pred}" es la observación predicha por el modelo y "Z_{prom}" es el promedio general de los datos.

Por otra parte el KO calcula el error estándar del valor predicho (*EEVP*) mediante la siguiente ecuación:

$$EEVP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (VO - VP)_i^2}{n}}$$

Donde "*VO*" y "*VP*" son los valores observados y predichos, respectivamente, y "*n*" corresponde a la cantidad de puntos que el modelo ha tenido en cuenta para el cálculo del *VP* en esa posición.

Para responder al primer objetivo, se agruparon las medianas de P-Bray I en los siguientes rangos: 0-10; 10.1-15; 15.1-20; 20.1-25 y de 25.1-100 mg kg^{-1} de suelo, valores considerados como muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, respectivamente. Este rango de valores permitió discriminar con más detalle los valores próximos a los umbrales de respuesta de los cultivos. Para responder al segundo objetivo, se agruparon los valores promedio de P-Bray I en los siguientes rangos: 0-10; 10.1-20 y de 20.1-100 mg kg^{-1} de suelo, valores considerados bajo, medio y alto, respectivamente, según Darwich (1983).

Se estimó el área ocupada para cada rango de P-Bray I considerando 28 Mha como superficie sembrada para la campaña 2006-07 (Ramírez y Porstman, 2009) y se calculó la dosis promedio de P para cada rango de concentración según Echeverría y García (1998), para que el P no limite la producción de los cultivos.

Resultados y discusión

El análisis de la distribución de valores de mediana de departamento y/o partido mostró desviación moderada de la normalidad ($P < 0.08$), por lo que el mapa se realizó con el valor de mediana sin transformar, dado que el KO es robusto para desviaciones moderadas de la normalidad (White et al., 1997). La relación entre valores predichos y observados fue significativa ($P < 0.05$) con un coeficiente de determinación aceptable y pendiente no diferente de uno ($VO = 0.98 \times VP$; $r^2 = 0.66$, n = 171). Los mayores errores de predicción del KO se determinaron en la zona norte de la provincia de Santa Fe, norte de Santiago del Estero y en algunas zonas de Salta (**Figura 1**), lo que puede ser atribuido a la baja cantidad de partidos relevados en dichas zonas (**Tabla 1**). No obstante, el valor de *EP* fue 66%, el cual es considerado aceptable para la aplicación de métodos de interpolación (Villatoro et al., 2008).

Los valores más bajos de P-Bray I se determinaron en la provincia de Buenos Aires, este de La Pampa, sur de Santa Fe, sudeste de Córdoba y Entre Ríos, áreas que presentaron valores en el rango de muy bajo a bajo (**Figura 2**). Los valores de P-Bray I registrados para el este de La Pampa son similares a los reportados por Montoya et al. (1999) en un muestreo realizado en 1996. Si se asume que los umbrales críticos de P-Bray I para soja y/o girasol, maíz y trigo son de 12-13, 15-16 y 18-20 mg kg^{-1}, respectivamente (García et al., 2007), estos resultados sugieren que el nivel actual de P-Bray I en los suelos de esta vasta región podría ser limitante para la producción de los cultivos. Esta situación se agravaría en algunas sub-regiones de la región pampeana como el sur, oeste y norte de Buenos Aires, donde el 75% de los

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del P extractable (Bray y Kurtz, 1945) del horizonte superficial del suelo (0-20 cm) en provincias de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina.

Provincia	n	Promedio	DE	Mínimo	Máximo	Percentil 0.25	Percentil 0.50	Percentil 0.75
		mg kg^{-1}						
Buenos Aires	22 025	13.3	10.8	1.0	132.0	6.9	10.4	16.0
La Pampa	1 221	16.8	10.9	1.6	95.5	9.2	14.3	21.2
Santa Fe	4 711	24.1	19.6	1.8	178.3	10.8	17.5	32.7
Córdoba	3 916	21.5	14.6	2.5	166.1	11.3	17.5	27.6
Santiago del Estero	219	29.3	17.1	5.7	125.0	19.6	26.4	33.5
Entre Ríos	1 190	11.8	13.2	1.4	98.2	4.6	7.8	13.4
Salta	406	26.8	16.0	3.5	110.6	16.8	24.2	33.7
Tucumán	640	30.2	25.6	3.3	194.8	14.9	22.9	34.5

n = número de muestras; DE = desvío estándar.
Fuentes: Laboratorio Tecnoagro, Laboratorio Suelofertil (ACA Pergamino), Laboratorio ISETA de Nueve de Julio, Laboratorio Tecnosuelo NOA, Laboratorio EEA INTA Oliveros, Laboratorio EEA INTA Marcos Juárez, Laboratorio EEA INTA Balcarce, EEA INTA Gral. Villegas y Laboratorio EEA INTA Anguil.

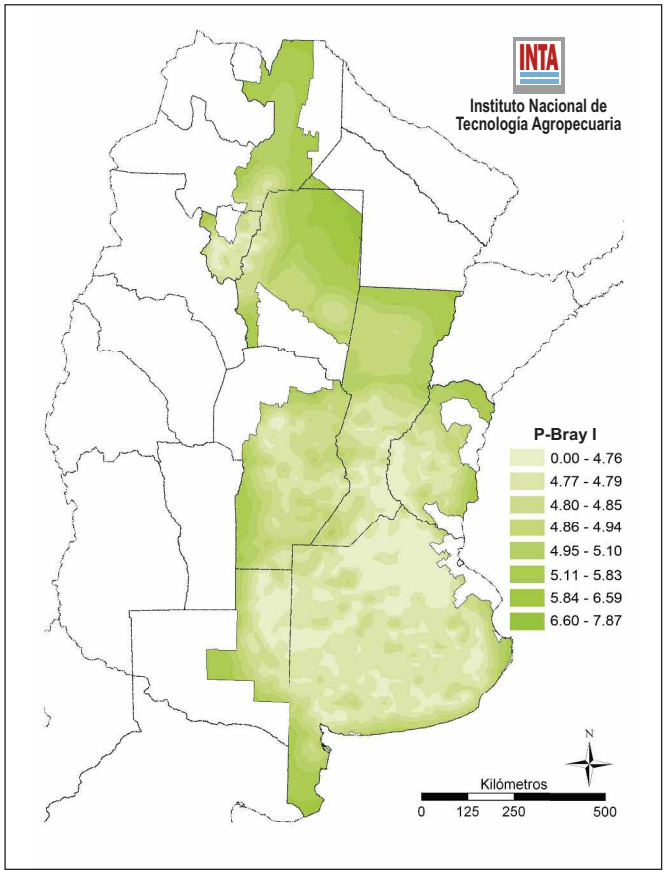


Figura 1. Rangos del error estándar del valor estimado de P-Bray I (mg kg^{-1}) por el método Kriging (error de predicción) en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina.

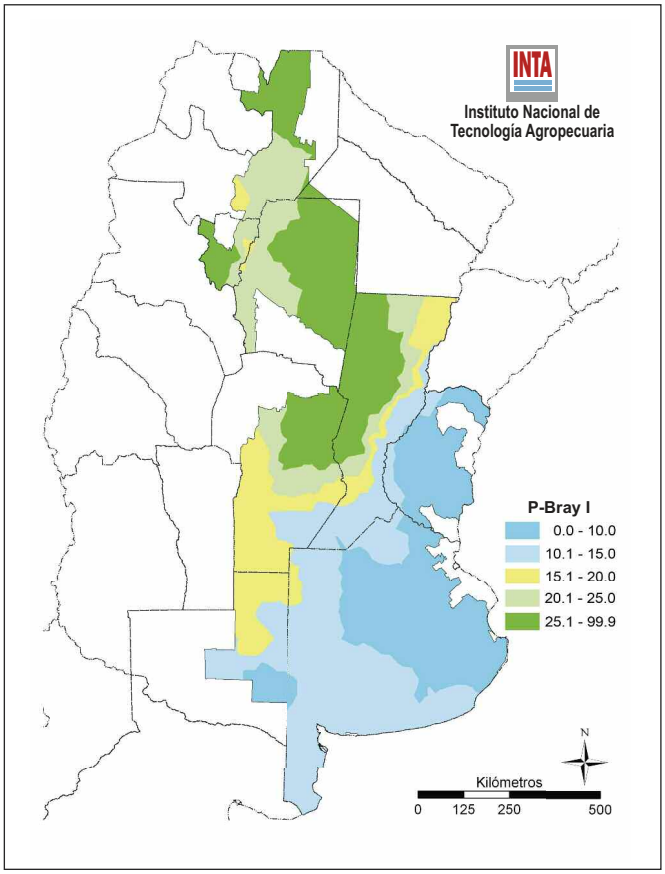


Figura 2. Rangos de valores de mediana de concentración (mg kg^{-1}) de P-Bray I (Bray y Kurtz, 1945) del horizonte superficial (0-20 cm) en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana. Interpolación realizada con el método de la inversa de la distancia ponderada y con Kriging Ordinario (a y b).

lotes relevados presentaron valores de P-Bray I menores a 16.8 mg kg^{-1} (**Tabla 2**), valor cercano al umbral de respuesta a la fertilización de la mayoría de los cultivos.

En un relevamiento realizado en 1980, se reportaron niveles de 10-20 y mayores a 20 mg kg^{-1} de P-Bray I hacia el oeste y norte de la región pampeana e inferiores a 10 mg kg^{-1} para el sudeste y noreste de Buenos Aires y para la provincia de Entre Ríos (Darwich, 1983). Estos resultados difieren de los actuales (**Figura 3**), dado que la mayor parte de los suelos del oeste de Buenos Aires, este de La Pampa, sur y sudeste de Córdoba han disminuido notoriamente su concentración respecto del muestreo realizado en 1980, pasando de concentración alta (> 20 mg kg^{-1}) al rango de concentración media (10-20 mg kg^{-1}). Esta disminución se explicaría por el mayor uso agrícola de los suelos y por la baja reposición del nutriente, la cual en promedio representa tan solo entre 40-60% del P exportado (García y González Sanjuan, 2010). Esta caída también sería explicada por un aumento en la frecuencia del cultivo de soja en la rotación, debido al elevado requerimiento e índice de cosecha de esta especie (García, 2001). Además, los suelos del oeste de la región pampeana se caracterizan por presentar bajos contenidos de MO y textura gruesa, características que se asocian a un escaso poder de buffer de P (Tiessen et al., 1984).

En suelos de la región pampeana de Argentina, se determinó que la mineralización del P orgánico contribuyó positiva y significativamente al P extractable (Zubillaga y Giuffré, 1998). Por lo tanto, ante balances negativos de P, las mayores caídas en los niveles de P-Bray I podrían ocurrir en suelos con textura más gruesa y con menores contenidos de MO. Sin embargo, en los suelos del sur y sudeste bonaerense, la concentración de P-Bray I se ha mantenido o ha pasado de niveles bajos a medios de P-Bray I (**Figura 3**), lo que puede ser atribuido a la amplia adopción de la práctica de fertilización y al uso de dosis de P más elevadas respecto de otras áreas con mayores niveles de P nativo (Echeverría y García, 1998).

De la superficie total cultivada en 2006-07 se estimó que el 54.4% presentó valores muy bajos a bajos y el resto valores medios a altos (**Tabla 3**). Según esta estimación solo el 31% de los suelos destinados a la actividad agrícola no requerirían el aporte de P por fertilización, mientras que el resto de la superficie sembrada requeriría dosis de enriquecimiento y/o mantenimiento (**Tabla 3**). Por lo tanto, para cubrir los requerimientos de P de los cultivos y aumentar gradualmente los contenidos de P-Bray I se deberían aplicar aproximadamente 424 220 t de P (2.12 x 106 t de 0-46-0) (**Tabla 3**), valor superior a las 207 000 t de P consumidos en el 2006 según García y

Tabla 2. Estadísticos descriptivos del P extractable (Bray y Kurtz, 1945) del horizonte superficial del suelo (0-20 cm) en algunas subregiones de la región pampeana de Argentina.

Sub-Región	n	Promedio	DE	Mínimo	Máximo	Percentil 0.25	Percentil 0.50	Percentil 0.75
		mg kg^{-1}						
Sur-Sur Este de Buenos Aires[1]	4 540	12.9	9.4	1.3	121.6	7.2	10.3	15.5
Oeste de Buenos Aires[2]	7 519	13.6	9.3	1.5	108.1	7.7	11.4	16.8
Nor-Noreste de Buenos Aires[3]	8 445	13.6	12.7	1.0	132.0	6.5	9.9	15.8
Sur de Santa Fe[4]	4 293	22.9	17.6	1.8	158.0	10.5	16.8	30.0
Sur de Córdoba[5]	2 641	19.2	12.9	2.5	166.1	10.5	15.6	23.9

n = número de muestras; DE = desvío estándar.
Partidos en cada subregión: [1]Azul, Bahía Blanca, Balcarce, B. Juárez, Cnel. Dorrego, Cnel. Príngles; Cnel. Suárez, A. Gonzáles Chávez, Gral. Alvarado, Gral. Lamadrid, Gral. Pueyrredón, Laprida, Lobería, Mar Chiquita, Necochea, Olavarría, Púan, San Cayetano, Tandil, Tornquist, Tres Arroyos; [2]A. Alsina, Bolivar, C. Casares, C. Tejedor, Daireaux, Guaminí, Gral. Villegas, H. Irigoyen, 25 de Mayo, 9 de Julio, Rivadavia, Trenque Lauquen, Pellegrini; [3]Baradero, B. Mitre, Bragado, Cañuelas, Cap. Sarmiento, C. de Areco, Chacabuco, Chivilcoy, Colon, 25 de Mayo, Gral. Viamonte, Gral. Arenales, Junin, L.N. Alem, Lincoln, Lujan, Mercedes, Monte, Pergamino, Pilar, Ramallo, Rojas, Roque Pérez, Saladillo, Salto, S.A. de Giles, S.A. de Areco, San Nicolás, San pedro, San Vicente, Suipacha, Zárate; [4]Caseros, Gral López, Gral. Belgrano, Castellanos, Constitución, Rosario, San Lorenzo, Iriondo, San Jerónimo, San Martín, San Justo, Las Colonias, [5]Gral. San Martín, Juaréz Cellman, Marcos Juárez, Roque Saenz Peña, Rio Cuarto, Unión.

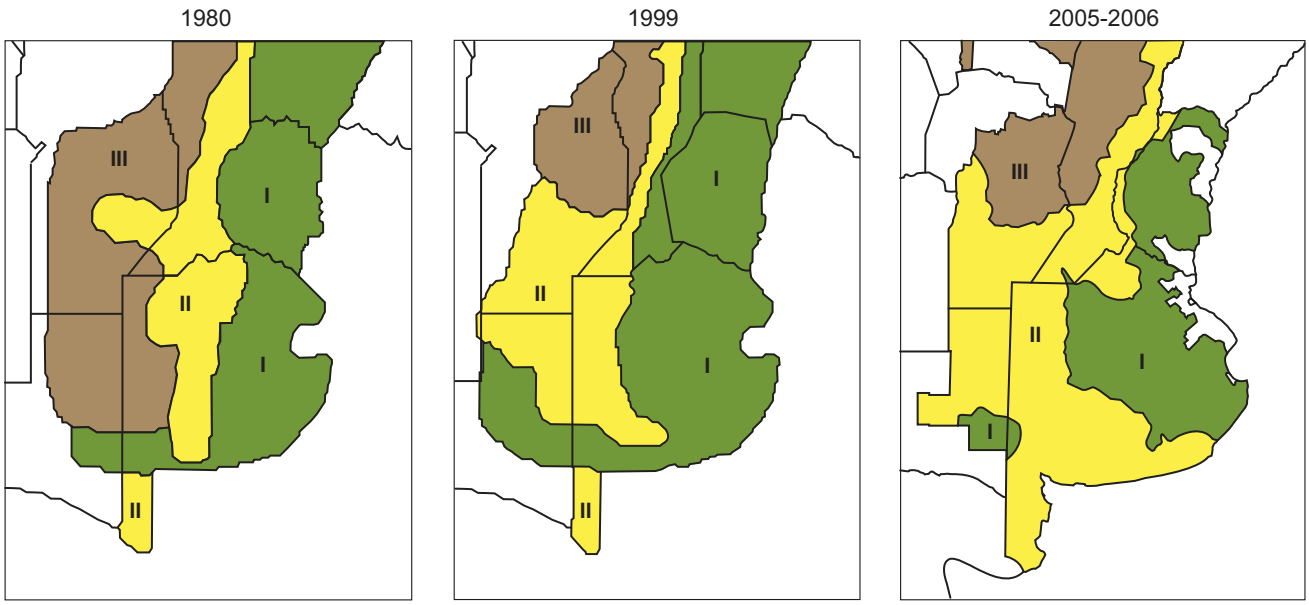


Figura 3. Rangos de concentración de P-Bray I (Bray y Kurtz, 1945) en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana argentina en 1980 (Darwich, 1983) y en 1999 (Darwich 1999, citado por García et al., 2007) y rangos de concentración de P-Bray I en el muestreo realizado en 2005-06 (interpolado con el método Kriging).

Ciampitti (2007). Estos resultados sugieren que para algunas zonas y cultivos sería necesario incrementar las dosis de P a fin de lograr una adecuada nutrición de los cultivos. No obstante, las mismas deben surgir de una adecuada evaluación del P extractable, condición indispensable para un uso racional de los fertilizantes.

Conclusiones

- La mayor parte de los suelos del oeste, norte y sur de la región pampeana presentan rangos de P-Bray I de muy bajos a bajos, por lo que este nutriente podría ser limitante para la producción de los cultivos. Por el contrario, la mayoría de los suelos de la región extrapampeana presentan contenidos de P extractable altos o muy altos.
- La disminución de los contenidos de P-Bray I en los últimos 25 años ha sido más importante hacia el oeste y norte que al sur de la región pampeana.

Tabla 3. Área estimada para cada rango de concentración de P extractable (Bray y Kurtz, 1945) y dosis de P estimadas (promedio para la mayoría de los cultivos) según Echeverría y García (1998) para que el P no limite la producción de los cultivos.

Rango de P-Bray I	Valoración agronómica	---------- Superficie relevada* ----------		Dosis de P	Cantidad de P a aplicar**
mg kg^{-1}	-	%	Mha	kg ha^{-1}	t
0-10	Muy Bajo	28.3	7 916	30	237 480
10.1-15	Bajo	26.1	7 911	20	146 220
15.1-20	Medio	14.5	4 052	10	40 520
20.1-25	Alto	8.7	2 425	-	-
> 25	Muy Alto	22.5	6 297	-	-

* **Producto del área sembrada estimada en 2006-07 (28 Mha) reportada por Ramírez y Porstman (2009) y del porcentaje ocupado por cada rango.**
** **Producto de área por dosis de P ha^{-1}.**

Agradecimientos

A los que aportaron información sobre los análisis de suelos: José Lamelas y Luis Berasategui (Tecnoagro), Roberto Rotondaro (Suelofertil), Graciela Cordone (INTA Casilda), Carlos Galarza (INTA Marcos Juárez), Alfredo Bono (INTA Anguil), Juan Galantini (UNS), Luis Ventimiglia (INTA 9 de Julio), Sebastián Gambaudo (INTA Rafaela), Mirian Barraco (INTA Gral. Villegas) y Laboratorio Tecnosuelo del NOA. A la responsable del Laboratorio de Geomática de INTA Balcarce Karina Zelaya.

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto INTA AERN 295561 y AGR 319/10 de la UNMP.

Bibliografía

Bray, R.H., y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil. Soil Sci 59:360-361.

Darwich, N.A. 1983. Niveles de fósforo asimilable en los suelos pampeanos. IDIA enero-abril: 1-5.

Echeverría, H.E., G.N. Ferraris, G. Gerster, F.H. Gutiérrez Boem, y F. Salvagiotti. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja: respuesta a la fertilización en la región pampeana. Resultados de la red de ensayos del proyecto Fertilizar – INTA Campaña 2000/2001 y 2001/2002. Fertilizar – INTA. www.fertilizar.org.ar

Echeverría, H.E., y F.O. García. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico 149. Est. Exp. Agrop. INTA Balcarce. 18 p.

García, F.O. 2001. Balance de fósforo en los suelos de la región pampeana. Informaciones Agronómicas del Cono Sur 9:1-3.

García, F.O., y I.A. Ciampitti. 2007. Requerimientos nutricionales y balances de nutrientes. Agromercado Temático. Año 27. Bs. As., Argentina. pp. 2-6.

García, F.O., K.P. Fabrizzi, M. Ruffo, y P. Scarabicchi. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. VI Congreso Nacional de Maíz. Pergamino, Buenos Aires. Tomo III: 137-143.

García, F.O., y M.F. González Sanjuan. 2010. Balances de nutrientes en Argentina ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos? Informaciones Agronómicas del Cono Sur 48:1-5.

García, F.O., L.I. Picone, y A. Berardo. 2007. Fósforo. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, pp. 99-121.

Kravchenco, A. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. Soil Science Society of American J. 67:1564-1571.

Montoya, J., A. Bono, A. Suárez, N.A. Darwich, y F. Babinec. 1999. Cambios en el contenido de fósforo asimilable en los suelos del este de la provincia de La Pampa, Argentina. Ciencia del Suelo. 17:45-48.

Ramírez, L., y J.C. Porstman. 2009. Evolución de la frontera agrícola. Campañas 80/81-06/07. [Online]. Revista Agromensajes de la Facultad. http://www.fcagr.unr.edu.ar

Schloeder, C.A., N.E. Zimmerman, y M.J. Jacobs. 2001. Comparison of methods for interpolating soils properties using limited data. Soil Sci. Soc. Am. J. 65:470-479.

Tiessen, H., J.W.B. Stewart, y C.V. Cole. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:853-858.

Villatoro, M., C. Enríquez, y F. Sancho. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. Agronomía Costarricense 32:95-105.

White, J.G., R.M. Welch, y W.A. Norvell. 1997. Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographic information systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:185-194.

Zamuner, E.C., L.I. Picone, y H.E. Echeverría. 2006. Comparison of phosphorus fertilization diagnostic methods for wheat under no-tillage. Soil and Tillage Research 89:70-77.

Zubillaga, M., y L. Giuffré. 1998. Pathways of native and fertilizer phosphorus in Argentine soils. Nutr. Cycl. Agroecosys. 51:101-105.

EFECTOS A LARGO PLAZO DE LA FERTILIZACIÓN EN EL SUDESTE BONAERENSE Y COMPARACIÓN CON LA REGIÓN PAMPEANA CENTRAL

Guillermo A. Divito[1], Hernán R. Sainz Rozas[1,2,3], Hernán E. Echeverría[1,2], Guillermo A. Studdert[1] y Nicolás Wyngaard[1]

Introducción

Diversos trabajos han puesto de manifiesto que la importancia de la fertilización de los cultivos está dada no sólo a través de efectos directos, como mejoras en el rendimiento y/o en la calidad de los productos de cosecha, sino también a partir de cambios que se manifiestan a mediano y largo plazo en el suelo. En este sentido, distintos organismos e instituciones han aportado valiosa información sobre el efecto a largo plazo de una adecuada nutrición de cultivos, en especial a partir de ensayos ubicados en la Pampa Ondulada y Pampa Interior Plana (García et al., 2010; Irizar, 2010). La primera región comprende el noreste de la provincia de Buenos Aires y centro-sur de Santa Fe, y se caracteriza por presentar suelos Argiudoles típicos, con altos tenores de limo y arcilla hacia el norte de Buenos Aires, mientras que hacia el este de Santa Fe aumenta el contenido de arcilla y predominan Argiudoles vérticos. La Pampa Interior Plana, por su parte, presenta Hapludoles típicos hacia el sur de Santa Fe y noroeste de Buenos Aires y Hapludoles y Haplustoles énticos hacia el este de la provincia de Córdoba (Hall et al., 1992; **Figura 1**). El contenido de materia orgánica (MO) de los suelos de ambas unidades varía entre 2.0 y 3.5%.

El efecto de la fertilización sobre las propiedades del suelo está fuertemente condicionado por las características del mismo, del ambiente y de la secuencia de cultivos (Álvarez, 2005). Los suelos predominantes en el sudeste bonaerense (sector oriental de la Pampa Austral; **Figura 1**) son Argiudoles típicos y Paleudoles petrocálcicos con textura franca y un mayor contenido de MO respecto de la región central del país. Esto último les otorga una alta capacidad de resistir cambios promovidos por prácticas antrópicas (Seybold et al., 1999). Para dicha región, Studdert y Echeverría (2000) reportaron que la fertilización de los cultivos con nitrógeno (N) logró reducir las tasas de caída en el contenido de MO. Asimismo, Fabrizzi et al. (2003) informaron que dicha práctica permitió aumentar el contenido de MO de un suelo degradado producto de la larga historia agrícola, mientras que no observaron cambios en dicha propiedad en un suelo sin signos de degradación.

En general, el efecto de la aplicación de N sobre las propiedades del suelo es de mayor magnitud que el observado para otros nutrientes, debido a que normalmente es el nutriente más limitante. El azufre (S), por su parte, es un nutriente cuya disponibilidad en los suelos de la región pampeana ha mermado debido a caídas en el contenido de MO, principal reservorio edáfico de S, al incremento en la superficie cultivada bajo siembra directa (SD), que reduce la mineralización de la MO, y al aumento en la demanda de los cultivos por mayor potencial de rendimiento (Echeverría, 2005). Las deficiencias de S son mayores en el norte de la región pampeana, donde los procesos mencionados se han desarrollado con mayor intensidad.

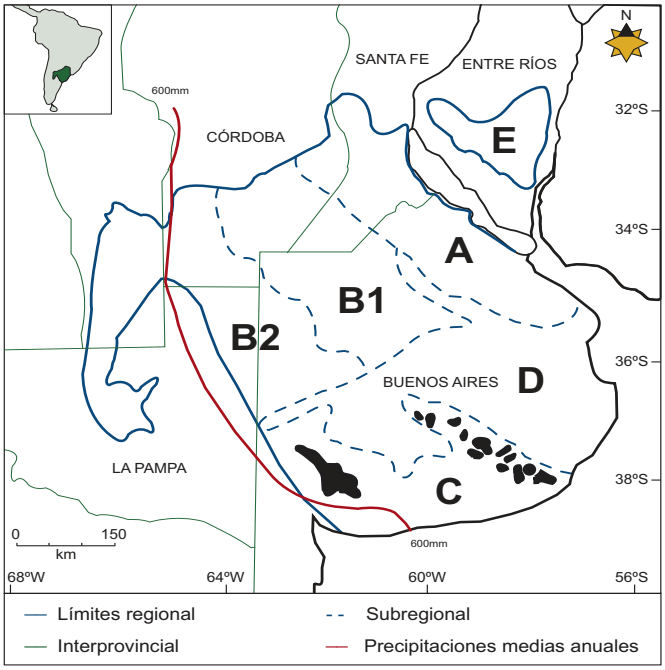


Figura 1. Subdivisión de la Región Pampeana. A. Pampa Ondulada; B. Pampa Interior (B1. Plana, B2. Occidental); C. Pampa Austral; D. Pampa Inundable; E. Pampa Mesopotámica. Fuente: Adaptado de Hall et al. (1992).

El primer objetivo del presente trabajo es difundir los resultados de un ensayo de larga duración del sudeste bonaerense donde se evaluó el efecto de la aplicación de N y S a los cultivos de una rotación. Un segundo objetivo es comparar dichos resultados con los obtenidos en la región pampeana central de Argentina, en base a los resultados presentados por Irizar (2010) para la localidad de Pergamino y por García et al. (2010) en distintos sitios correspondientes a la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe (en adelante denominada Red CREA).

Materiales y métodos

El ensayo de larga duración se realizó entre los años 2001 y 2008 en la EEA INTA Balcarce (37°45' latitud sur y

1 Facultad de Ciencias Agrarias, UNMDP, C.C. 276, (7620) Balcarce, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: guillermodivito@yahoo.com.ar
2 E.E.A. INTA, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
3 CONICET

Tabla 1. Dosis de nutrientes (kg ha^{-1}) aplicados a cada cultivo de la rotación.

Trat.	--- 2001/02---		--- 2002/03 ---		--- 2003/04 ---		--- 2004/05 ---		--- 2005/06 ---		--- 2006/07 ---		--- 2007/08 ---	
	---- Maíz ----		---- Soja ----		- Trigo/Soja -		- Trigo/Soja -		---- Maíz ----		---- Soja ----		- Trigo/Soja -	
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
N0 S1	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15
N1 S0	70	0	0	0	70	0	70	0	116	0	0	0	70	0
N1 S1	70	15	0	15	70	15	70	15	116	15	0	15	70	15
N2 S0	140	0	0	0	140	0	140	0	176	0	0	0	140	0
N2 S1	140	15	0	15	140	15	140	15	176	15	0	15	140	15

58°18' longitud oeste), sobre un complejo Paleudol petrocálcico y Argiudol típico, con pendiente menor al 2% y textura franca (23% arcilla, 36% limo, 41% arena). El sitio experimental se mantuvo durante los 25 años previos al ensayo en rotación de cultivos agrícolas, bajo labranza convencional (LC), que incluyó arado de rejas y rastra de discos. Al inicio del ensayo, el contenido de carbono orgánico (CO) en 0-20 cm fue 25.4 g kg^{-1}, el pH 5.53 y el P-Bray 29 mg kg^{-1} (H. Sainz Rozas y H. Echeverría, com. pers.).

El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con arreglo factorial y cuatro repeticiones, bajo una rotación que incluyó maíz, soja y trigo/soja de segunda. Se evaluaron dos factores: la aplicación de N (tres dosis: N0, N1 y N2) y de S (dos dosis: S0 y S1) (**Tabla 1**). La combinación N0-S0 no se incluyó en el ensayo. La fertilización se realizó al voleo a la siembra de los cultivos con urea (46-0-0) y sulfato de calcio (Ca SO_4; 16% S, 20% Ca). Además, se aplicó superfosfato triple de Ca (0-46-0; 20% P, 14% Ca) como fuente de fósforo (P) con el objetivo de evitar deficiencias.

Los residuos de biomasa aérea se estimaron según el índice de cosecha (0.45, 0.40 y 0.45 para maíz, soja y trigo, respectivamente) y la biomasa de raíces más rizodeposiciones en el estrato 0-20 cm se calcularon según lo descripto por Domínguez y Studdert (2006), como una proporción de la biomasa aérea total (0.32, 0.32 y 0.43 para maíz, soja y trigo, respectivamente). Se asumió que la concentración de C en el material vegetal fue de 43%. El trigo sembrado en 2007 sufrió los efectos de helada en floración por lo que se consideró, para el cálculo del aporte de C, un rendimiento de 4000 kg ha^{-1} en todos los tratamientos.

En 2008, previo a la siembra del maíz, se tomaron muestras de suelo de 0-5, 5-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad, se secaron en estufa a 30 °C y pasaron por tamiz de 2 mm. El fraccionamiento físico de la MO fue realizado según Cambardella y Elliott (1992). La determinación de C orgánico (CO) se realizó según Schlichting et al. (1995) y de N orgánico (NO) mediante combustión de las muestras y determinación con un analizador TruSpec CN (LECO, 2011). El CO y NO particulado (COP y NOP respectivamente) se obtuvo por diferencia entre el CO y NO y la fracción asociada al limo + arcilla (COA y NOA). Para la determinación del N mineralizado en anaerobiosis (Nan), se incubaron 10 g de suelo durante 7 días a 40°C en condiciones anaeróbicas (muestras saturadas con agua destilada). Posteriormente, se cuantificó por microdestilación el N-NH_4^+ formado durante la incubación.

La determinación del contenido de S-SO_4^{2-} intercambiable y en solución se realizó mediante la extracción con $Ca(H_2PO_4)_2$ y posterior análisis turbidimétrico con cloruro de bario (BaCl) y Tween 80 (Johnson, 1987). El contenido de N-NO_3^- se analizó por colorimetría (Keeney y Nelson, 1982). El pH del suelo se determinó en relación 1:2.5 (suelo-agua).

Se realizaron análisis de varianza con PROC GLM del Statistical Analysis System (SAS Institute, 1985). Como la combinación N0S0 no se incluyó en el ensayo, el efecto de las dosis de N se determinó considerando sólo los tratamientos que recibieron aporte de S (N0S1, N1S1 y N2S2). Por su parte, el efecto de la aplicación de S se determinó contrastando los promedios de N1 y N2 para los tratamientos sin (promedio de S0N1 y S0N2) y con aporte de S (promedio de S1N1 y S1N2).

Para establecer comparaciones respecto de lo observado en la Pampa Ondulada y en la Pampa Interior Plana, se discuten los resultados correspondientes a la Red CREA reportados por García et al. (2010) y los obtenidos por Irizar (2010) a partir del Ensayo de Larga Duración ubicado en la EEA INTA Pergamino. Los ensayos de la Red CREA comprenden 11 sitios distribuidos en el sudeste de la provincia de Córdoba, Sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires. Los mismos se establecieron en el año 2000 y se evaluaron distintos planteos de fertilización en dos rotaciones bajo SD: maíz-trigo/soja de segunda (M-T/S) y maíz-soja-trigo/soja de segunda (M-S-T/S). Del ensayo de Pergamino, se emplearon los datos pertenecientes a la rotación M-T/S iniciada en 1983, también bajo SD.

Resultados y discusión

Rendimiento de los cultivos

Los cultivos de gramíneas manifestaron un incremento en el rendimiento en grano en respuesta a la fertilización

Tabla 2. Rendimientos de los cultivos fertilizados con N (N0, N1 y N2) y S (S0 y S1) para el período 2001-2008.

	2001/02	2002/03	------ 2003/04 ------		------ 2004/05 ------		2005/06	2006/07	------ 2007/08 ------	
Variable	Maíz	Soja	Trigo	Soja 2da	Trigo	Soja 2da	Maíz	Soja	Trigo	Soja 2da
	kg ha^{-1}									
N0	6725 b	3064 a	4234 b	2359 a	2661 b	1723 a	9084 b	3729 a	4000 *	1807 a
N1	9001 a	2864 a	5467 b	784 b	4378 a	971 b	10 254 ab	3608 a	4000	1551 a
N2	9586 a	2979 a	6930 a	753 b	4477 a	883 b	10 571 ab	3550 a	4000	1678 a
S0	8323 A	3043 A	5532 A	768 A	3876 B	851 A	10 220 A	3423 A	4000	1615 A
S1	9294 A	2921 A	6198 A	768 A	4427 A	927 A	10 412 A	3579 A	4000	1615 A

Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Minúsculas para N y mayúsculas para S.
*** Valor estimado para el trigo de 2007, en reemplazo del cultivo perdido por helada.**

nitrogenada. En promedio, la respuesta del cultivo de maíz fue de 23.3% (1723 kg ha^{-1}) y 29.4% (2174 kg ha^{-1}), mientras que la de trigo fue de 46.8% (1975 kg ha^{-1}) y 65.9% (2976 kg ha^{-1}) para N1 y N2, respectivamente (**Tabla 2**). La soja de primera implantada sobre parcelas con distinto historial de fertilización nitrogenada no manifestó diferencias en el rendimiento en los años 2002 y 2006. Contrariamente, en la soja de segunda implantada en 2004 y 2005 se determinaron disminuciones en el rendimiento en las parcelas sembradas sobre cultivos de trigo fertilizados con N, lo que podría obedecer a un mayor consumo de agua de éste último (Caviglia y Sadras, 2001). La aplicación de S, exceptuando la soja implantada en 2002, generó incrementos en el rendimiento de los cultivos (8.5% en promedio), aunque el mismo sólo resultó estadísticamente significativo en el trigo sembrado en 2004 (**Tabla 2**).

Estos resultados se diferencian de lo observado en la región pampeana central. Así, en el caso del maíz se pudo determinar que, si bien los rendimientos promedio presentados por Irizar (2010) para Pergamino (7108 kg ha^{-1} para el tratamiento fertilizado con N) fueron inferiores a los de Balcarce, los determinados en la Red CREA (11 403 kg ha^{-1} en promedio para las rotaciones M-T/S y M-S-T/S) fueron mayores y con respuestas levemente superiores a la aplicación de N (2653 kg ha^{-1}). Contrariamente, se observó que el rendimiento y la respuesta a la fertilización nitrogenada resultó superior para el trigo en el sudeste bonaerense, ya que el rendimiento promedio de la Red CREA fue de 2930 kg ha^{-1} y la respuesta a N fue 735 kg ha^{-1} (promedio para M-T/S y M-S-T/S). En soja, también se determinaron diferencias entre regiones, habiéndose reportado mayores rendimientos en la zona central, tanto para cultivos de primera (4304 kg ha^{-1} para los ensayos de la Red CREA) como de segunda (3162 y 2398 kg ha^{-1} para la Red CREA y Pergamino, respectivamente). Es de destacar que los resultados presentados por Irizar (2010) también muestran una tendencia a mayor rendimiento de la soja de segunda sembrada sobre parcelas no fertilizadas con N (480 kg ha^{-1}) en relación a las fertilizadas.

Las diferencias en el rendimiento de los cultivos obedecen principalmente a las condiciones climáticas de cada región. En el caso de los cultivos de verano, su rendimiento es mayor en el norte de la región pampeana debido a la mayor abundancia de precipitaciones en dicha estación respecto del sudeste bonaerense (Hall et al., 1992). Contrariamente, la productividad de los cultivos de invierno es mayor en el sudeste debido a la baja frecuencia de déficits hídricos (Reussi Calvo y Echeverría, 2006) y al mayor cociente fototermal (Q) (Magrin et al., 1993)

Para S, la escasa respuesta de los cultivos a la fertilización que se observó en el sudeste bonaerense coincide con lo esperado, puesto que la deficiencia del nutriente en la región no es generalizada (Reussi Calvo, 2009; Pagani et al., 2009; Divito et al., 2010). Contrariamente, en la región centro del país, se han determinado respuestas de mayor magnitud, siendo la soja de segunda y el maíz los cultivos que mayor incremento en rendimiento manifiestan (García et al., 2010). Estas diferencias entre regiones obedecerían principalmente al menor contenido de MO de los suelos de la zona norte.

Aporte de carbono

Para ambientes templados, se considera que la producción de residuos de cultivos y su manejo son los factores más importantes en la dinámica de la MO (Stevenson y Cole, 1999). En este sentido, el aporte de C estimado a través de las biomasas aérea y radical y de los exudados radicales siguió la misma tendencia que el rendimiento, con incrementos en la medida que la dosis de N y S fue mayor. Para el Sudeste Bonaerense, se ha reportado que la aplicación de N genera aumentos en la cantidad de C que ingresa al suelo en una rotación (Domínguez et al., 2005), pero para S sólo se han informado mayores aportes de C para cultivos en particular, como maíz (Pagani et al., 2009) y trigo (Reussi Calvo, 2009). De este modo, lo estimado en el presente trabajo pone de manifiesto que la adecuada provisión de este último nutriente, que manifiesta deficiencias moderadas en la zona, podría tener un impacto positivo sobre la variación del C edáfico. Esto adquiere

especial importancia en el norte de la región pampeana, donde las deficiencias de S son más pronunciadas y, por ende, la adecuada provisión del nutriente tendría un impacto mayor sobre el balance de C del sistema.

Carbono orgánico del suelo

Luego de 7 años de iniciado el ensayo en Balcarce, la fertilización con N y S a los cultivos que integraron la rotación, no produjo diferencias en el contenido de CO ni en ninguna de sus fracciones, COP y COA, a pesar de la distinta cantidad de C que ingresó al suelo a través de los residuos. El COP es considerado la fracción más lábil del CO y, por ende, la más susceptible a expresar los efectos de las distintas prácticas de manejo (Janzen et al., 1998). A pesar de ello, COP sólo manifestó una leve tendencia a aumentar en el estrato 0-5 cm conforme se incrementó la dosis de N y S (3% y 13% para N1 y N2 respecto a N0 y 8% para S1 respecto a S0). Similares resultados fueron obtenidos en la región por Domínguez et al. (2009). Sin embargo, Fabrizzi et al. (2003) reportaron que, según la condición inicial del suelo, hubo respuestas contrastantes en el cambio del contenido de CO debido al aporte de N. Así, en suelos no degradados provenientes de una pastura y manejados bajo SD, la aplicación de 150 kg N ha^{-1} $año^{-1}$ no generó diferencias en CO respecto a una condición sin fertilizar. Contrariamente, en un suelo degradado bajo LC, la aplicación de 120 kg N ha^{-1} $año^{-1}$ generó aumentos en el contenido de CO en el estrato 0-7.5 cm respecto del testigo.

Para Pergamino, Irizar (2010) reportó que no existieron diferencias en el CO ni en sus fracciones entre tratamientos fertilizados con distintas dosis de N. En los ensayos de la Red CREA, sólo se observó una tendencia de incremento en el contenido de CO en la mayoría de los sitios comparando los tratamientos testigo y NPS (García et al., 2010), mientras que en el COP, se determinaron por igual tendencias de aumento y disminución en aproximadamente la mitad de los ensayos. Sólo presentaron cambios significativos dos sitios de la Red: aumento en La Marta (sur de la provincia de Córdoba) y disminuciones en San Alfredo (sur de la provincia de Santa Fe).

Una de las explicaciones propuestas para la ausencia de incrementos en el contenido de CO en el sudeste bonaerense, es la escasa diferencia entre tratamientos en el aporte de C por residuos en relación al alto contenido de CO del suelo. En la región central del país, el contenido de CO del suelo es sensiblemente menor al del sudeste bonaerense, lo que a priori daría indicios de una mayor probabilidad de incrementos del mismo en respuesta a la fertilización. Sin embargo, los resultados obtenidos en dicha región no han demostrado esta tendencia. Para el caso del N, Irizar (2010) lo atribuye a la alta capacidad de los suelos de proveer el nutriente a los cultivos y, por ende, la escasa diferencia que se registra en el aporte de C entre tratamientos fertilizados y no fertilizados.

pH

La aplicación de dosis crecientes de N generó, luego de 7 años, menores valores en el pH del suelo en el estrato 0-5 cm. Contrariamente, a 5-20 cm, no se evidenciaron diferencias de pH entre dosis de dicho nutriente (**Tabla 3**).

La urea, al hidrolizarse y producir nitrato (NO_3^-) acidifica el suelo produciendo 2 moles de H^+ por mol (Bolan et al., 1991). Si el NO_3^- es absorbido por las plantas se neutraliza el efecto acidificante del fertilizante, por el contrario, si permanece en el suelo o es removido del mismo por lavado se genera una disminución en el pH (Bolan et al., 1991). En el sudeste bonaerense, el N que no es absorbido por los cultivos tiene una alta probabilidad de sufrir pérdidas por lavado (Echeverría y Sainz Rozas, 2006), las cuáles explicarían mayoritaria-mente la acidificación ocurrida.

El yeso agrícola (sulfato de calcio di-hidratado) es una sal neutra que no modifica el pH del suelo aunque indirectamente, a través del ión Ca^{2+}, puede generar aumentos en el pH de suelos levemente ácidos (Wong y Swift, 2003). Sin embargo, la baja dosis de yeso empleada en el presente ensayo (94 kg ha^{-1} $año^{-1}$) sería la causa de que no se hayan determinado diferencias en el pH entre tratamientos.

En los ensayos pertenecientes a la Red CREA, los sitios bajo rotación M-T/S manifestaron mayores diferencias en pH entre tratamientos respecto de la rotación M-S-T/S, como la evaluada en el presente trabajo. Los autores atribuyen estos resultados al uso más intensivo de N en la primera, producto de la aplicación anual al trigo y maíz durante 8 años. Así, se determinó que el tratamiento que recibió N, P, y S disminuyó 0.5 y 0.2 unidades respecto del testigo para M-T/S y M-S-T/S, respectivamente. Estos resultados se evidenciaron en el estrato 0-20 cm por lo que, basados en la mayor acidificación superficial observada en el sudeste bonaerense, podría suponerse que la misma también fue más pronunciada en 0-5 cm.

Tabla 3. Valores promedio de pH y CV a 0-5 y 5-20 cm de profundidad de los tratamientos según la dosis de N y S aplicada.

Trat.	pH 0-5 cm		CV, %	pH 5-20 cm		CV, %
N0	5.8	a	6.0	5.8	a	7.5
N1	5.5	b	4.0	5.8	a	1.9
N2	5.3	c	3.1	5.7	a	0.6
S0	5.4	A	3.6	5.8	A	1.4
S1	5.4	A	3.7	5.8	A	1.5
N * S	ns			ns		

Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Minúsculas y mayúsculas para dosis de N y S, respectivamente.

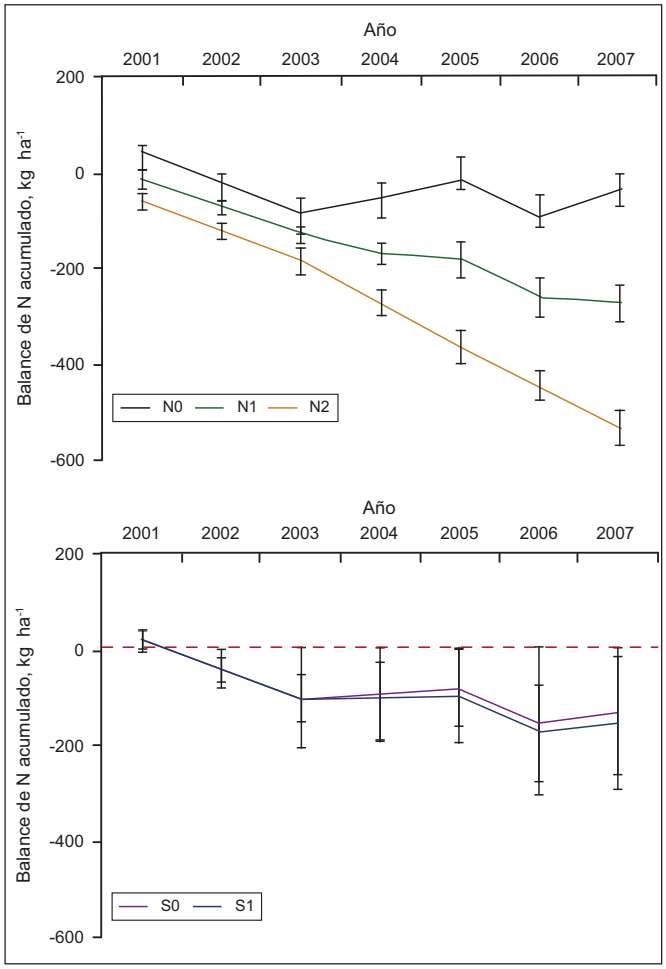


Figura 2. Balance acumulado del N edáfico según la dosis de N y S aplicada. Las líneas verticales indican el desvío estándar de la media.

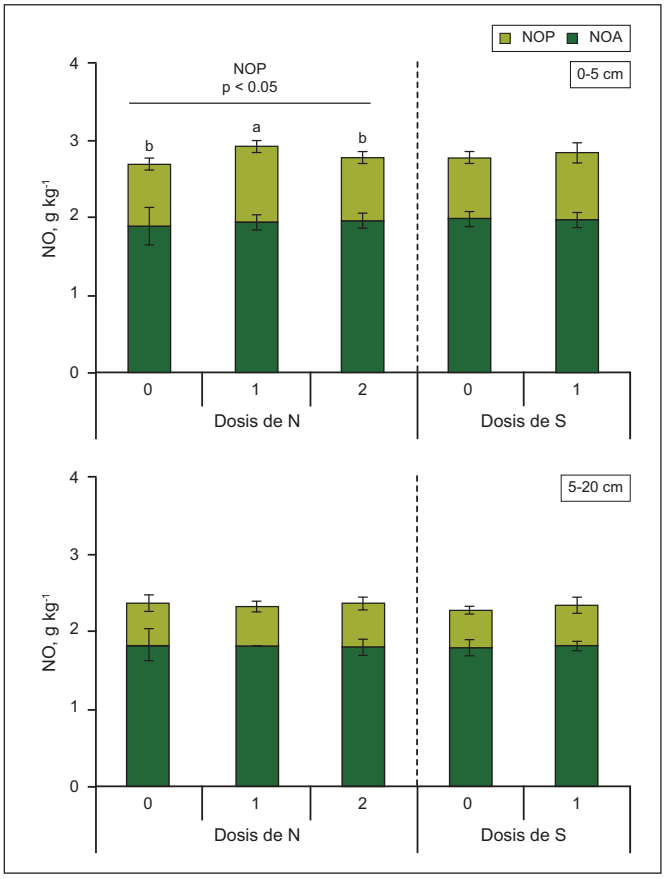


Figura 3. Contenido de nitrógeno orgánico particulado (NOP), asociado (NOA) y total (NO) en 0-5 cm (superior) y 5-20 cm (inferior) de profundidad según la dosis de N y S aplicada. Líneas verticales indican desvío estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para el NOP (p < 0.05).

En Pergamino, y luego de 25 años, la fertilización nitrogenada produjo acidificación del estrato 0-5 cm (5.53 y 6.22 para fertilizado y no fertilizado, respectivamente). Además, dicha diferencia se mantuvo en el espesor de 5-10 cm, registrándose valores de 5.73 y 6.07 para tratamientos con y sin N, respectivamente.

El alto contenido de MO confiere a los suelos del sudeste bonaerense una alta capacidad de resistir procesos de acidificación (Wong y Swift, 2003). De este modo, los suelos de dicha región presentarían una mayor tolerancia a la acidificación producto de la aplicación de altas dosis de N respecto de los de la Pampa Ondulada y de la Pampa Interior Plana. Si bien los ensayos comparados presentan diferencias en cuanto a tipo de rotación, dosis de N y duración, es factible establecer que la acidificación fue mayor en la región norte debido a la mayor magnitud de los cambios superficiales (0-5 cm) y/o a que éstos ocurrieron en un estrato más profundo (0-20 cm).

Nitrógeno orgánico del suelo

El balance de N edáfico, diferencia entre la cantidad de N que ingresó al suelo a través del fertilizante y las salidas en los granos, varió inversamente con la dosis de N pero no hubo relación con la dosis de S (**Figura 2**). Así, aunque el balance anual acumulado fue negativo en todos los casos, en la medida que se redujo la cantidad de N aplicada, la magnitud del déficit se incrementó (**Figura 2**).

El NO y el NOA no difirieron entre tratamientos que recibieron distintas dosis de N, tanto en 0-5 como en 5-20 cm (**Figura 3**). Contrariamente, para la profundidad de 0-5 cm, el N en la fracción particulada (NOP) resultó mayor en el suelo que recibió la dosis intermedia de N, aunque en 5-20 cm no se observaron dichas diferencias. Por su parte, la aplicación de S no generó diferencias en el contenido de N en ninguna de las fracciones de la MO, para ninguna de las profundidades.

En términos generales, estos resultados son coincidentes con lo informado por Domínguez et al. (2009) y Diovisalvi et al. (2008) para suelos de la misma región, y por Irizar (2010) para Pergamino. En este sentido, considerando las diferencias entre tratamientos en el balance del N edáfico, la ausencia de diferencias en el contenido de NO podría deberse a que el efecto de dicha variación es pequeño en relación al alto contenido de NO del suelo (efecto similar a lo observado para CO) y/o a que parte del N aplicado en los tratamientos fertilizados salió del sistema, principalmente por lavado.

Nitrógeno mineralizado en anaerobiosis

La aplicación de la dosis más elevada de N generó un menor potencial de mineralización de dicho nutriente en el

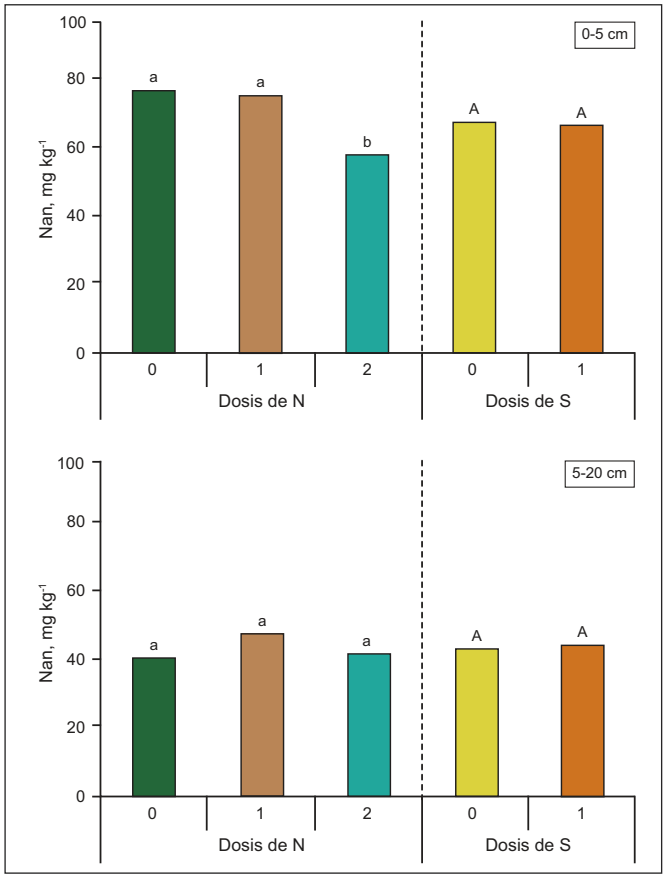


Figura 4. Nitrógeno anaeróbico (Nan, mg kg^{-1}) en 0-5 cm (superior) y 5-20 cm (inferior) de profundidad según la dosis de N y S aplicada. Letras distintas indican diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$). Minúsculas para N y mayúsculas para S.

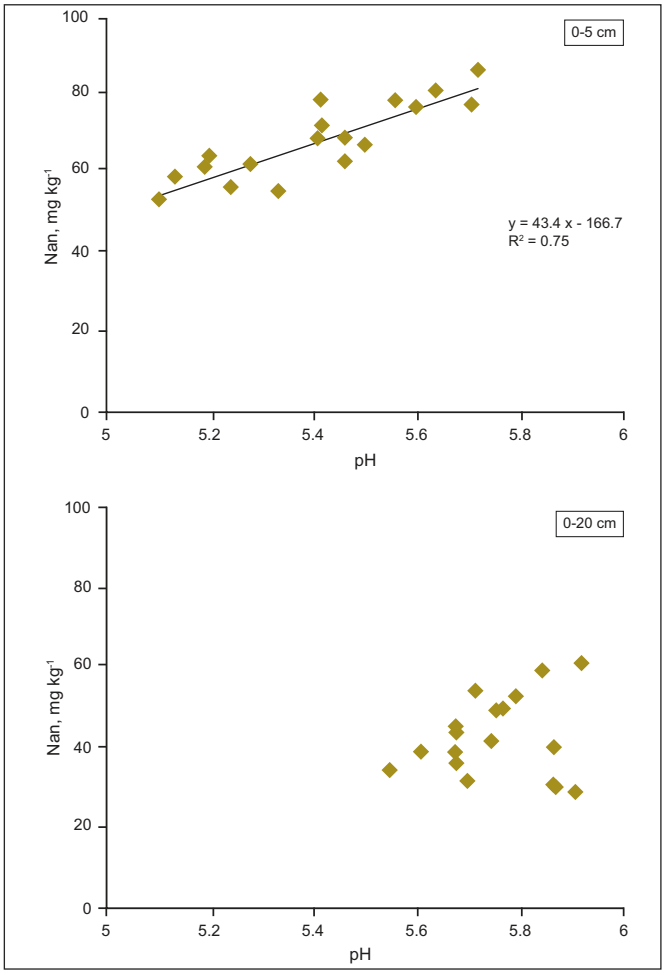


Figura 5. Relación del nitrógeno anaeróbico (Nan) con el pH del suelo en el estrato 0-5 y 5-20 cm.

estrato 0-5 cm, respecto de las otras dos dosis (**Figura 4**). En 5-20 cm, no se detectaron cambios significativos en función de las dosis de N. El Nan no se modificó como consecuencia de la aplicación de S en ninguna de las profundidades (**Figura 4**). Estos resultados coinciden con los reportados para suelos de la región por Domínguez et al. (2009) y Genovese et al. (2009) para el estrato 0-20 cm. Contrariamente, de forma general en la Red CREA, los tratamientos no difirieron en el valor de Nan.

En general, tanto para suelos de distintas regiones agrícolas del mundo (Westerhof et al., 1998), como para la región sudeste bonaerense en particular (Fabrizzi et al., 2003), se han obtenido estrechas asociaciones entre el Nan y el contenido de CO, NO y, en especial, con fracciones de mayor labilidad como el COP y NOP. Sin embargo, en el ensayo realizado en Balcarce sólo se observó una leve asociación ($R^2 = 0.20$) del Nan con el NOP del estrato 0-5 cm. Esta ausencia de relación entre las variables analizadas obedecería al estrecho gradiente determinado en cada una de ellas.

Para el estrato superficial del suelo (0-5 cm) se observó una alta asociación entre el Nan y el pH aunque la misma no fue evidente en los 5-20 cm (**Figura 5**). El pH es considerado uno de los principales condicionantes del ciclado de C y N debido a que controla la diversidad, la biomasa y la actividad de los microorganismos del suelo. En este sentido, si bien el proceso de mineralización puede llevarse adelante en un rango de pH amplio, los valores óptimos oscilan entre 6.0 y 8.0 (Paul, 2007).

En Pergamino, Irizar (2010) determinó que el menor valor de pH superficial en los tratamientos fertilizados estuvo en relación con la disminución del C de la biomasa microbiana y sugirieron que la misma podría estar indicando un menor potencial de mineralización. Estos resultados han sido observados en situaciones similares a nivel mundial (Liebig et al., 2002) y advierten sobre los posibles efectos negativos de la acidificación por uso de altas dosis de N. Sin embargo, datos surgidos de la Red CREA aportan evidencias contrarias a las antes expuestas. Así, para el ensayo ubicado en Teodelina (sur de la provincia de Santa Fe), Conforto et al. (2010) determinaron que la aplicación de N, P y S durante 8 años incrementó la cantidad de unidades formadoras de colonia (UFC) de hongos y bacterias, y la actividad de dichos microorganismos respecto de tratamientos sin fertilizar, a pesar de que el pH del suelo resultó menor (5.6 y 6.2 en 0-20 cm para los tratamientos fertilizado y testigo, respectivamente). Los autores atribuyeron estos resultados a la mayor producción de los cultivos fertilizados, que sirvió de sustrato para la actividad microbiana. La aplicación de S, por su parte, generó un

leve aumento en las UFC de hongos y bacterias (Conforto et al., 2010).

Nitratos y sulfatos

La aplicación de dosis de N a los cultivos de gramíneas, no generó cambios en el contenido de N-NO_3^- ni de S-SO_4^{-2} en el estrato 0-60 cm (**Tabla 4**). Por su parte, la fertilización con S tampoco generó diferencias en la disponibilidad de N-NO_3^- en dicha profundidad. Sin embargo, se pudo determinar una mayor cantidad de S-SO_4^{2-} en los tratamientos fertilizados con S durante el período de ensayo. Estos resultados advierten sobre posibles diferencias en la residualidad de N y S. En el caso del N, los resultados obtenidos coinciden parcialmente con los observados en la Red CREA, donde tampoco se observaron efectos residuales en los primeros 5 años de la rotación M-T/S. Los mismos fueron evidentes a partir del año 2005, alcanzándose diferencias entre tratamientos de hasta 50 kg N-NO_3^- ha^{-1} en 0-60 cm. Resulta relevante que dichas diferencias se registraron aún cuando los balances de N fueron negativos en todos los tratamientos, como sucedió en el presente ensayo. Contrariamente, en la rotación M-S-T/S de la Red CREA no se evidenciaron efectos residuales, probablemente por un balance más negativo de N y por la menor frecuencia de aplicación del nutriente (García et al., 2010).

La cantidad de N-NO_3^- residual depende, primeramente, del balance de N de los cultivos. Tal como se mencionó, las salidas de N a través de los granos superaron a los ingresos vía fertilizante durante el período de ensayo para todos los tratamientos siendo más negativa la variación en la medida que la dosis de N fue menor (**Figura 2**). Sin embargo, estas diferencias en la variación del N no se reflejaron en cambios en la disponibilidad de N-NO_3^- pre-siembra. En este sentido, las pérdidas del N edáfico explicarían la similitud en la disponibilidad del nutriente entre tratamientos. En la región Sudeste Bonaerense, el lavado de NO_3^- es el mecanismo más importante de salidas de N del sistema (Echeverría y Sainz Rozas, 2005).

La mayor disponibilidad de S-SO_4^{2-} que se determinó en el tratamiento fertilizado ya había sido observada en el mismo ensayo en 2004 y 2006 (Divito et al., 2010). Una de las razones que explicarían la mayor residualidad del S-SO_4^{2-} respecto al N-NO_3^- es la capacidad del primero de establecer uniones covalentes con las partículas coloidales del suelo, lo que le confiere mayor resistencia a la lixiviación. Además, el SO_4^{2-} puede formar precipitados con Ca^{2+}, que en el sudeste bonaerense se han observado como co-precipitados junto al $CaCO_3$ (San Martín y Echeverría, 1995).

En la Red CREA, las diferencias entre tratamientos en la disponibilidad de S-SO_4^{2-} comenzaron a hacerse evidentes en 2003. Al igual que para N-NO_3^-, las mismas fueron mayores en la rotación M-T/S. García et al. (2010) plantean que las diferencias entre tratamientos en la disponibilidad de S previo a la siembra del maíz y trigo sólo representaron una pequeña proporción de las diferencias determinadas en el balance de S del sistema. Esto indica que la fracción restante pudo haber sido inmovilizada en la MO, retenida en formas inorgánicas y/o haber salido del sistema, principalmente por lixiviación.

Tabla 4. Contenido de nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-) y azufre de sulfatos (S-SO_4^{2-}) en 0-60 cm según la dosis de N y S aplicada.

Trat.	------ N-NO_3^- ------		------ S-SO_4^{2-} ------	
	kg ha^{-1}	CV, %	kg ha^{-1}	CV, %
N0	89.6 a	9.4	21.0 a	7.8
N1	88.6 a	9.5	19.2 a	28.6
N2	81.6 a	7.8	18.6 a	16.5
S0	80.2 A	22.0	15.2 B	33.2
S1	85.1 A	19.2	18.9 A	43.7
N * S	ns		ns	

CV = coeficiente de variación. Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$).

Consideraciones finales y conclusiones

La aplicación de N a los cultivos generó respuestas moderadas en la cantidad de C retornado al suelo, tanto en el sudeste bonaerense como en el norte de la región pampeana. Esto generó que los contenidos de CO y NO del suelo no se modificaran significativamente. Por el contrario, la fertilización nitrogenada generó un menor pH del suelo respecto de tratamientos sin fertilizar en ambas regiones. Esto advierte sobre la necesidad de implementar prácticas para monitorear y eventualmente corregir problemas de acidez. En especial, se destaca la relación directa entre en pH y el Nan que se evidenció en Balcarce.

En el sudeste bonaerense no se determinó residualidad de N-NO_3^-, de manera similar a lo observado en la Red CREA en la rotación M-S-T/S, aunque difiere de lo reportado en M-T/S. La falta de residualidad obedecería a la ocurrencia de pérdidas por lixiviación y pone en evidencia la necesidad de ajustar las dosis de N aplicadas, para evitar consecuencias negativas para el ambiente. Por su parte, la aplicación de S no generó modificaciones en la mayoría de las propiedades del suelo, aunque se determinó residualidad de S-SO_4^{2-}. Estos resultados confirman lo obtenido en otros ensayos, y deberían ser considerados a la hora de definir estrategias de fertilización con el nutriente.

En resumen, los resultados obtenidos en el sudeste bonaerense no difirieron en gran medida respecto de lo observado en la Pampa Ondulada ni en la Pampa Interior Plana, a pesar del menor contenido de MO en los suelos de esas regiones y, por ende, la menor resiliencia que presentan. Sin embargo, el efecto que la fertilización de cultivos genera en el suelo debería continuar bajo estudio.

Bibliografía

Álvarez, R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. Soil Use Manage. 21:38–52.

Bolan, N.S., M.J. Hedley, y R.E. White. 1991. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. Plant Soil. 134:53–63.

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.

Caviglia, O.P., y V.O. Sadras. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water and radiation-use efficiency of wheat. Field Crops Res. 69:259-266.

Conforto, E.C., G. Figoni, A. Rovea, M. Boxler, C. Oddino, J. García, G. March, J. Meriles, y S. Vargas Gil. 2010. Evaluación del efecto de la fertilización sobre las comunidades microbianas edáficas. Actas 22° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario, Argentina. En CD.

Diovisalvi, N.V., G.A. Studdert, G.F. Domínguez, y M.J. Eiza. 2008. Fracciones de carbono y nitrógeno orgánicos y nitrógeno anaeróbico bajo agricultura continúa con dos sistemas de labranza. Ci. Suelo, 26(1):1-11.

Divito, G.A., N. Wyngaard, H.R. Sainz Rozas, y H.E. Echeverría. 2010. Residualidad de la aplicación de azufre en un ensayo de larga duración del sudeste bonaerense y su efecto sobre el maíz. Actas 22° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario Argentina. En CD.

Domínguez, G.F., y G.A. Studdert. 2006. Balance de carbono en un Molisol bajo labranza convencional. Actas 20° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, Argentina. En CD.

Domínguez, G.F., G.A. Studdert, y H.E. Echeverría. 2005. Propiedades del suelo: efecto de las prácticas de manejo. *En*: HE. Echeverría; FO. García (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 207-253.

Domínguez, G.F., N.V. Diovisalvi, G.A. Studdert, y M.G. Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the southeastern Pampas. Soil Till. Res. 102:93–100.

Echeverría, H.E. 2005. Azufre. *En*: H.E. Echeverría & F.O. García (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 139-160.

Echeverría, H.E., y H.R. Sainz Rozas. 2005. Nitrógeno. *En*: H.E. Echeverría & F.O. García (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 69-97.

Fabrizzi, K.P., A. Morón, y F.O. García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded mollisols in Argentina. Soil Sci. Soc. Am. J. 67:1831–1841.

García, F.O., M. Boxler, J. Minteguiaga, L. Firpo, I.A. Ciampitti, A.A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N.I. Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. Ed. AACREA. 64 p.

Genovese, M.F., H.E. Echeverría, G.A. Studdert, y H.R. Sainz Rozas. 2009. Nitrógeno de amino-azúcares en suelo: calibración y relación con el nitrógeno incubado anaeróbico. Ci. Suelo 27(2):225-236.

Hall, A.J., C.M. Rebella, C.M. Ghersa, y J.P. Culot. 1992. Field-crop systems of the Pampas. pp. 413-450. *In* C. J. Pearson (ed),. Ecosystems of the world. Field Crop Ecosystems. Elsevier Scientific, Amsterdam-London-New York-Tokyo.

Irizar, A.B. 2010. Cambios en las reservas de materia orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas: efecto de la secuencia de cultivo, del sistema de labranza y de la fertilización nitrogenada. Tesis presentada para optar al título de Magister. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 108 p.

Janzen, H.H., C.A. Campbell, R.C. Izaurralde, B.H. Ellert, N. Juma, W.B. Mcgill, y R.P. Zentner. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. Soil Till. Res. 47:181-195.

Johnson, G.V. 1987. Sulfate: Sampling testing, and calibration. *In*: Brown J.R. (Ed.). Soil testing: Sampling correlation, calibration and interpretation. SSSA Spec. Publ. 21. SSSA, Madison, WI. pp. 89-96.

Keeney D.R. y D.W. Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. *In*: AL Page (Ed.) Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties Agron. Monog 9 ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, EE.UU. pp. 643-698.

LECO. 2011. Organic aplication notes. [En línea] (www.leco.com) [Consulta: 29/04/11].

Liebig, M.A., G.E. Varvel, J.W. Doran, y B.J. Wienhold. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 596–601.

Magrin, G.O., A.J. Hall, C.H. Baldy, y M.O. Grondona. 1993. Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. Agr Forest Meteorol. 67:29-41.

Pagani, A., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas. 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes en la provincia de Buenos Aires. Ci. Suelo 27(1):21-29.

Paul, E.A. 2007. Soil microbiology, ecology, and biochemistry: Academic Press. Amsterdam, Boston. 3ª. Edicion. 532 p.

Reussi Calvo, N.I., y H.E. Echeverría. 2006. Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo: balance hídrico para el sur bonaerense. Ci Suelo 24(2):115-122.

Reussi Calvo, N.I. 2009. Deficiencias de azufre en trigo: indicadores de disponibilidad en material vegetal. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Agrarias. UNMdP. Balcarce, Argentina. 127 p.

San Martín, N., y H.E. Echeverría. 1995. Determinación del contenido de sulfato en suelos del sudeste bonaerense. Ci. Suelo 13:95-97.

SAS Institute. 1985. SAS user´s guide. SAS Institute, Inc., Cary, NC. 1030 p.

Schlichting, E., H.P. Blume, y K. Stahr. 1995. Bodenkundliches Praktikum. Pareys Studientexte 81, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 295 p.

Seybold C.A., J.E. Herrick y J.J. Brejda. 1999. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. Soil Science 164:224-234.

Stevenson, F.J., y M.A. Cole. 1999. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. 2a ed. John Wiley & Sons, Inc., USA. 448 p.

Studdert, G.A., y H.E. Echeverria. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:1496–1503.

Westerhof, R., L. Vilela, M. Ayarza, y W. Zech. 1998. Land use effects on labile N extracted with permanganate and the nitrogen management index in the Cerrado region of Brazil. Biol. Fertil. Soils 27:353–357.

Wong, M.T.F., y R.S. Swift. 2003. Role of organic matter in alleviating soil acidity. *In*: Rengel, Z. (Ed.). Handbook of Soil Acidity. Marcel Dekker. New York. USA. pp. 337-358.

TENDENCIAS EN EL CONSUMO DE FERTILIZANTES EN PUERTO RICO

David Sotomayor Ramírez[1], Julio Barragán[1], Jeffrey Caraballo[1], Gilberto Lozada-Ramírez[2] y Raúl Jaramillo[3]

Introducción

La producción global de granos ha crecido un poco más del doble desde 1960 y continúa incrementándose (Godfray et al., 2010). Este incremento puede atribuirse a una expansión del 12% en el área cultivada, al uso de variedades de alto rendimiento, fertilizantes químicos y plaguicidas, al uso de tecnologías de mecanización, y al riego expandido (Foley et al., 2005). Los reportes difieren en cuanto a la habilidad del sector agrícola para producir suficiente comida y como esta se afectará al incrementar la competencia por la tierra, la energía y el agua en los próximos 40 años. La tasa de crecimiento anual de la población mundial se estima en el 1% y se espera que lleguemos a los nueve millardos de personas a mediados del siglo XXI (US Census Bureau, 2011). Adicionalmente se espera que muchos en la población en incremento sean más pudientes y por tanto generen una demanda adicional de alimentos. En términos generales, las fluctuaciones en los precios de alimentos pueden ser más frecuentes, la demanda por tierra para la producción de biocombustibles podría incrementarse, mientras que el área total para la agricultura permanecería relativamente estable (Foley et al., 2005; Fedoroff et al., 2010; Godfray et al., 2010).

El igualar la oferta y la demanda de alimentos ha sido un importante desafío en el equilibrio mundial de alimentos. El hecho de que actualmente cerca de 985 millones de personas están mal nutridas, constituye una evidencia clara de esta afirmación (Godfray et al., 2010), por lo que se necesitan prácticas agrícolas que sean económica, social y ambientalmente justas (sostenibles). En este sentido, la producción agrícola moderna debe esforzarse en maximizar los rendimientos y la calidad de los cultivos, mientras se minimizan los costos de producción. Esto no necesariamente se ha logrado, aunque con los avances tecnológicos (incluyendo la fertilización) se han asegurado grandes incrementos en la producción de alimentos por unidad de área, también se ha impactado negativamente el medioambiente (Parry, 1998; Sharpley et al., 1999; Rabalais et al., 2001; Postel, 2005; Snyder, 2008). Entre 30 y 50% de los rendimientos de cultivos alrededor del mundo se puede atribuir al uso de fertilizantes comerciales; dicha contribución puede ser del 80 al 90% en los suelos altamente meteorizados de los trópicos (Stewart et al., 2005).

Puerto Rico constituye un interesante caso desde el punto de vista agronómico y de manejo de nutrientes. Después de la década del 1950 la isla experimentó un cambio dramático, moviéndose desde una economía basada en la agricultura hacia una industrial. Este proceso involucró la migración de la población hacia las ciudades y un abandono gradual de las tierras agrícolas (Rudel et al., 2000; López et al., 2001; Martinuzzi et al., 2006). Actualmente, Puerto Rico tiene una de las mayores tasas de capacidad de carga (personas por acre) en comparación con otras áreas del mundo (Eswaran et al., 1999), estimada en 1.7 (a base del área total y 8.5 a base de la tierra agrícola). Se estima que solamente cerca del 15% del consumo de alimento se produce localmente (Comas, 2009). Para el 2009, el ingreso bruto agrícola era el 1.19% del producto interno bruto (PIB) (estimado en US$ 68.84 x 10^9) (DAPR, 2011; INDEXMUNDI, 2011). Un incremento en los bienes agrícolas producidos localmente aportaría una mayor proporción al PIB, contribuiría a satisfacer parcialmente la dieta nacional y podría tener un rol en incrementar y fortalecer la base económica agrícola. El uso sostenible de fertilizantes es un aspecto importante de tal desarrollo. El objetivo de este trabajo es examinar las tendencias en el consumo de fertilizantes a escala global y local, y describir las causas de dichas tendencias en Puerto Rico.

Materiales y métodos

Los datos de consumo de fertilizante se obtuvieron de la base de datos (FAOSTAT, 2011) de la organización para los alimentos y la agricultura de las Naciones Unidas (FAO). Dicha información se expresa *en base de nutrientes (N, P_2O_5, y K_2O)*. El consumo total de fertilizantes se calculó ya sea como la suma de N, P_2O_5, K_2O, o cuando fue posible se obtuvieron directamente de la base de datos. El consumo de fertilizantes de Puerto Rico se obtuvo del DAPR (2008) y se expresó en base a los fertilizantes y no en base a los nutrientes como se hizo por la FAO. Los datos de la FAO se consiguieron por región y por país. Se realizaron análisis de regresión sobre la base de datos completa y sobre datos para períodos específicos de tiempo utilizando INFOSTAT o SigmaPlot 11.0 (Systat Software Inc., San José, CA). Las tendencias en el consumo de fertilizantes se establecieron basado en la pendiente de la regresión lineal entre el consumo de

[1] **Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Colegio de Ciencias Agrícolas, Mayagüez, Puerto Rico. Correo electrónico: david.sotomayor@upr.edu.**
[2] **Pan American Fertilizer Corp. Guánica, Puerto Rico.**
[3] **International Plant Nutrition Institute (IPNI). Oficina para el Norte de Latinoamérica. Quito, Ecuador. Correo electrónico: rjaramillo@ipni.net**

fertilizantes y el tiempo. La información del uso de la tierra en Puerto Rico se consiguió de la base de datos NASS (USDA-NASS, 2011a) o de la base de datos para el uso de la tierra de la FAO (FAOSTAT, 2011).

Utilizamos las áreas cosechadas y los niveles de producción de las cosechas: forraje, banano, piña, yuca, malanga, naranja, papaya y hortalizas según lo reportado por el censo de la USDA (USDA-NASS, 2011b). Los rendimientos relativos se calcularon de acuerdo a la relación entre los rendimientos sobre los rendimientos máximos potenciales. El rendimiento máximo potencial se obtuvo de la evaluación de expertos especialistas de la UPRM-AES y fueron expresados en una base porcentual.

Resultados y discusión

Tendencias mundiales: El consumo de fertilizantes de N, P y K mostró un continuo incremento desde 1960 hasta 1988 (FAOSTAT, 2011) (**Figura 1**). Desde 1988 hasta 1993, el consumo de fertilizantes declinó, y desde 1993 hasta 2008 el consumo de fertilizantes N, P_2O_5, K_2O y el total de fertilizantes se incrementó en tasas anuales de 1.65, 1.85, 2.03 y 1.76%, respectivamente. En el 2008, los fertilizantes nitrogenados representaron la mayor parte (60%) de todos los fertilizantes consumidos, seguidos por los fosfatos y los potásicos. El énfasis en los nitrogenados ha contribuido a desbalances nutricionales, especialmente en los países en desarrollo (Vitousek et al., 2009; Barbazán et al., 2009; Fixen et al., 2010). El consumo global de fertilizantes en el 2008 fue de 161.8 Mt de fertilizante, dividido en 99.2, 39.6 y 26.0 Mt para N, P_2O_5 y K_2O respectivamente.

Consumo de fertilizantes por región desde 1991 hasta el 2008: El consumo de fertilizantes en América y en Asia se incrementó desde 1991 al 2008, mientras que el consumo de fertilizantes en Europa declinó marcadamente desde 1990 hasta 1994 y se mantuvo estable hasta el 2008 (**Figura 2a**). El consumo de fertilizante en Oceanía se incrementó desde 1990 hasta el 2005, y después declinó por tres años consecutivos. Las tasas de consumo de fertilizantes no han cambiado (no existe una pendiente significativa en la regresión) para América del Norte y América Central (**Figura 2b**). Desde 1990 hasta el 2008, el consumo de fertilizantes en América del Sur se ha incrementado en una tasa de 0.62 Mt año^{-1} y en el Caribe esta ha declinado con una tasa de 25 686 t año^{-1} (**Figura 2c**). En el 2008, los 10 países más consumidores de fertilizante en el mundo fueron: China, India, Estados Unidos, Brasil, Indonesia, Pakistán, Francia, Canadá, Polonia y Egipto (FAOSTAT, 2011).

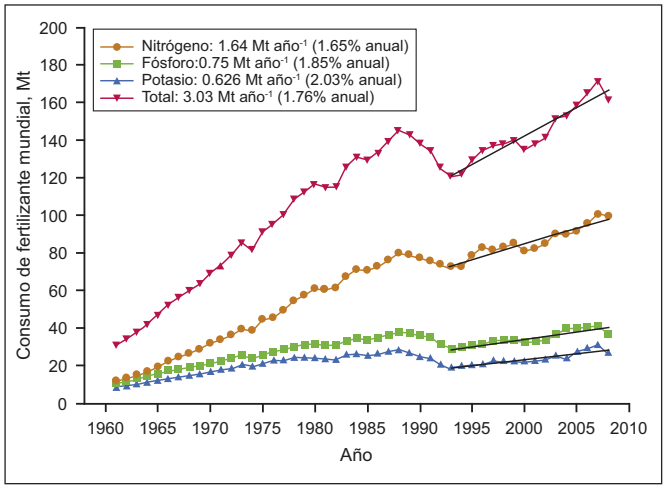


Figura 1. Tendencias históricas en el consumo de fertilizante mundial hasta el año 2008 (FAOSTAT, 2011). Las unidades son Mt de nutrientes (N, P_2O_5 y K_2O) y las rectas de regresión son las tasas de incremento para el periodo de 1993 al 2008.

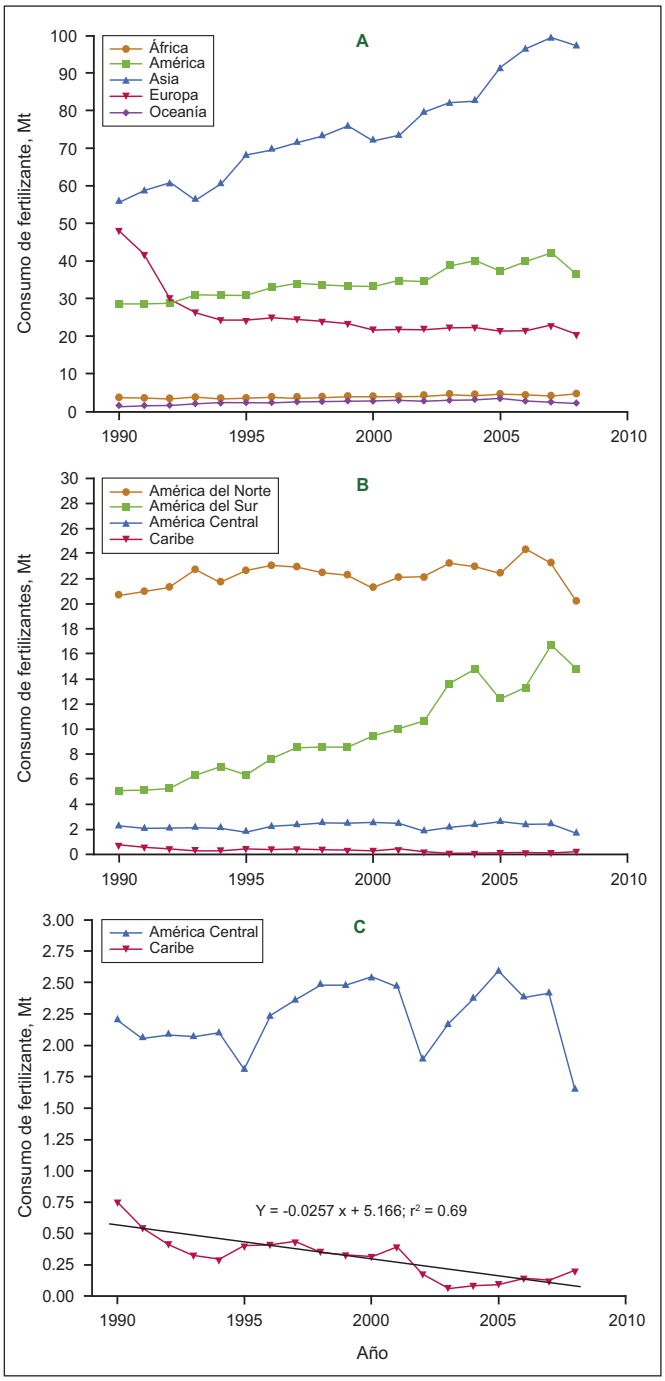


Figura 2. Consumo histórico de fertilizantes *(en base de nutrientes)* entre 1990 al 2008 a nivel global (A), para las Américas (B) y para el Caribe y América Central (C) (FAO, 2011).

Tabla 1. Consumo global de fertilizante *(en base de nutrientes)* dividido por regiones para el 2002 y el 2008 (FAO, 2011).

Región	----------2002--------		----------2008-------	
	Total fertilizantes	Total	Total fertilizantes	Total
	Mt	%	Mt	%
Mundo	**144.2**	**100**	**161.8**	**100**
África	4.1	2.8	4.8	3.0
Asia	79.9	55.4	97.3	60.1
Europa	22.2	15.4	20.7	12.8
Oceanía	3.2	2.2	2.3	1.4
Total Américas	34.8	24.1	36.7	22.7
Norte	*22.10*	*15.30*	*20.10*	*12.50*
Central	*1.90*	*1.31*	*1.60*	*1.02*
Caribe	*0.18*	*0.13*	*0.21*	*0.13*
Del Sur	*10.60*	*7.37*	*14.70*	*9.10*

En el 2008, la mayor parte del consumo de fertilizantes se dio en Asia seguido por Norteamérica con un 60.1 y 12.5% del total global, respectivamente. El consumo de fertilizante en el 2008 en comparación con el del 2002 se incrementó en 4.7% y declinó en un 1.4% para Asia y Norteamérica, respectivamente (**Tabla 1**). India y China fueron los mayores consumidores de fertilizantes en Asia con 50.8 y 24.3 Mt, lo que representa 31.5 y 15% del total del consumo mundial respectivamente.

En América, los Estados Unidos tuvieron la mayor proporción en uso de fertilizante, seguido por Brasil, Canadá, Argentina, México y Colombia (**Tabla 2**). La cantidad total de fertilizante consumido en el Caribe tal como se ha listado para la región en total fue de 208 596 t o el 0.13% del total del fertilizante global. En contraste, cuando el total del fertilizante consumido para todos los países del Caribe se suma por individuos, se encuentra un total de 298 300 t. Esta discrepancia puede deberse al hecho de que las estadísticas específicas para el caso de la República Dominicana no fueron disponibles y para este país se utilizó datos de consumo del 2002. Los 298 300 t de fertilizante utilizados en las islas del Caribe (excepto Guyana y Surinam), representan el 0.82 y el 0.18% de lo consumido en América y por el mundo, respectivamente. Cuba y la República Dominicana consumieron aproximadamente el 78% del total del Caribe, con un restante de 66 900 t distribuidas entre otras islas caribeñas. El consumo de fertilizantes para Puerto Rico no aparece en la base de datos de la FAO, y por tanto no se incluye en el análisis anterior.

Tendencias actuales en el consumo global de fertilizante 2008-2012: La demanda global de fertilizante para N, P y K se espera que crezca en cerca del 2.5, 2.8 y 2.7%, respectivamente hasta el 2012 (FAO, 2008). El consumo global de fertilizante se espera que crezca al 2.7% por año entre 2008 a 2012. El consumo de fertilizantes en el este de Europa, Asia, América Latina y el África tendrían crecimientos anuales por encima del 3%; Europa Central, América del Norte y Oceanía tendrían crecimientos anuales menores al 2%; América del Norte crecería al 1.2% anual. En el 2006, la fracción de fertilizantes utilizados en América del Norte fue del 15.48% del total y se espera que reduzca al 13% en el 2012 (FAO, 2008). La expectativa es que el consumo de fertilizantes en América del Norte dependerá en mayor medida de las importaciones de otras regiones (Huang, 2007).

Se espera que el consumo total anual de fertilizante en Latinomérica se incremente un 5% entre el 2008 y el 2012 hasta alcanzar un 10.7% del consumo global. El total de fertilizante consumido en las dos regiones de mayor consumo de Asia, el sur y el este, se espera que esté en 4 y 2.7%, respectivamente. Las dos regiones combinadas se espera que representen el 17 y 38.8% del consumo total de fertilizante. Es de esperar que cualquier cambio en el consumo de fertilizante en el sur y este de Asia afectará la situación de la oferta y demanda en todos los otros países (FAO, 2008).

Tendencias del consumo de fertilizante en Puerto Rico: En 1962, 232 952 t (256 273 ton) de fertilizante (en su forma comercial y no como nutrientes) se consumieron en Puerto Rico (**Figura 3**). En el 2008, el consumo de fertilizantes había descendido un 16% de aquello de 1962 a sólo 34 494 t (37 947 ton). No está claro por qué ocurrió la dramática caída en los reportes de fertilizante entre 1966 hasta 1969. Considerando la tendencia en todos los datos se puede notar que mientras el consumo a escala global se ha incrementado y el consumo de fertilizantes en la mayoría de países aumentó, este ha

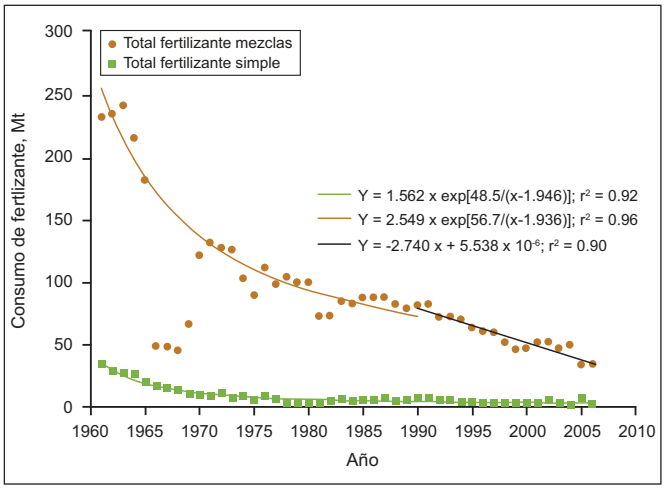


Figura 3. Tendencias históricas para el consumo de fertilizante (Mt) en Puerto Rico, expresado como fertilizantes simples y como fertilizantes compuestos y en mezclas (DAPR, 2006).

Tabla 2. Consumo de fertilizante *(en base de nutrientes)* para los países de América en el 2008 (FAO, 2011).

Región	País	Consumo de fertilizante t	Fracción del total mundial %
América del Norte	Estados Unidos	17 600 000	10.9
	Canadá	2 600 000	1.6
	México	1 100 000	0.7
América Central	Costa Rica	141 500	0.1
	Guatemala	121 900	0.1
	Honduras	109 700	0.1
	El Salvador	81 100	0.1
	Nicaragua	61 300	0.0
	Panamá	19 300	0.0
	Belice	3 500	0.0
América del Sur	Brasil	10 100 000	6.2
	Argentina	1 200 000	0.8
	Colombia	901 100	0.6
	Chile	744 900	0.5
	Venezuela	628 800	0.4
	Perú	297 700	0.2
	Paraguay	280 700	0.2
	Ecuador	264 700	0.2
	Bolivia	19 600	0.0
	Guyana*	23 900	0.0
	Surinam*	25 800	0.0
	Uruguay	194 096	0.0
Caribe	Antigua y Barbuda*	13	0.0
	Barbados*	1 800	0.0
	Belice*	3 500	0.0
	Dominica*	222	0.0
	Jamaica*	6 400	0.0
	Saint Kitts y Nevis	53	0.0
	Trinidad y Tobago	58 400	0.0
	Bahamas		
	Cuba	141 700	0.1
	República Dominicana**	89 700	0.1
	Granada		
	St. Lucia		
	St. Vincent y Granadinas		
	Haití		

* **Países miembros del CARICOM**
** **Las estadísticas para la República Dominicana son estimados del 2002**

Excluyendo los cuatro años de datos anómalos (1966-1969), se eligió un modelo de crecimiento exponencial para describir la tendencia en el consumo de fertilizantes de 1966 hasta 1989. A partir del 1990 y hasta el 2006, el consumo de fertilizantes en Puerto Rico decreció de manera lineal ($P < 0.05$) en una tasa de -2740 t año^{-1} (o un decremento anual del 3.77%).

La proporción total de fertilizantes vendidos en fórmulas mixtas, era del 87% en 1962 y del 89% en el 2002. En general un valor estable se ha mantenido sobre el período con un valor promedio del 90% (± 2, intervalo de confianza del 95%), esto a pesar de que a nivel mundial las formulaciones han declinado en su uso y más nutrientes se manejan como fertilizantes simples. Por ejemplo en los Estados Unidos, la proporción de mezclas era del 63% en 1960 y en el 2007 fue del 34% (USDA-ERS, 2011).

Cerca del 33% del área terrestre en Puerto Rico está dominada por Oxisoles y Ultisoles (Beinroth et al., 2003), suelos que pueden mantener una alta productividad agrícola cuando se manejan adecuadamente pero que tienen reservas limitadas de nutrientes para el crecimiento de cultivos. Se ha observado respuestas al N y al P en múltiples de éstos suelos (Grove, 1979; Lathwell, 1979), sin embargo las aplicaciones de P a través de los años puede crear suelos que ya no responden a la fertilización fosfórica debido a la acumulación de este elemento y la consecuente disponibilidad al cultivo (Lathwell, 1979; CAST, 2000; Syers et al., 2008). Investigación realizada por la Estación Experimental de la Universidad de Puerto Rico ha demostrado los efectos positivos de utilizar formulaciones completas para la producción intensiva en estos suelos altamente meteorizados (por ejemplo Vicente-Chandler et al., 1983; Irizarry et al., 1981; Irizarry y Rivera, 1985). Sin embargo, el uso de herramientas mejoradas para las recomendaciones de P y K (tales

como el análisis de suelos y foliares y el presupuesto nutricional) ha sugerido cantidades reducidas de formulaciones completas en algunos sistemas de producción agrícola alrededor del mundo, especialmente en suelos y sistemas con historial de aplicación de fertilizantes o residuos orgániccos y en suelos donde las reservas de P y K han aumentado (Cox, 1992; Dodd y Mallarino, 2005; Syers et al., 2008; IPNI, 2011). Existe un gran potencial para utilizar fertilizantes simples solubles, especialmente en áreas de Puerto Rico que tienen sistemas de riego por goteo en los cuales los nutrientes pueden ser aplicados vía fertigación y en los que los nutrientes P y K se encuentran sobre los límites críticos (Sotomayor-Ramírez y Martínez, 2006; Sotomayor-Ramírez, 2010).

Algunas preguntas clave aparecen para elucidar la tendencia de la reducción en el consumo de fertilizantes en Puerto Rico: se debe esto a la reducción en el área o a menores tasas de aplicación en la tierra existente? Qué tan importante es el precio del fertilizante en la decisión de la aplicación de fertilizantes y sus dosis.

Consumo de fertilizantes en Puerto Rico y su relación al área

Dos bases de datos para los estimados del área de tierra bajo producción agrícola para Puerto Rico están disponibles, el publicado por la USDA-NASS (2011a) y FAOSTAT (2011). Estos dos valores no necesariamente concuerdan, debido a una distinta clasificación del uso del suelo y otros criterios distintos de clasificación. Además, USDA-NASS tiene información para ciertos años, mientras que todos los años desde 1961 están cubiertos por la base de la FAO. Nosotros hemos optado por utilizar la base de datos de la FAO, debido a su continuidad a través del tiempo y porque se puede comparar a Puerto Rico con otros países.

El total de área de suelo agrícola (definido como la tierra arable, cultivos permanentes y pasturas permanentes) ha venido reduciéndose históricamente (**Figura 4**). Análisis de regresión lineal para el período entre 1991 y 2008, muestran que la tasa de reducción del área de suelo agrícola fue de 11 155 ha año^{-1}. En el 2006 el área de suelo agrícola se estimó en 201 000 ha y en el 2008 fue de 187 000 ha. El área estimada bajo uso actual agrícola (tierra arable y cultivos permanentes) aparentemente se ha mantenido constante o se ha incrementado desde 1991 hasta el 2008, cuando un estimado de 97 000 ha se reportó. Históricamente la mayor proporción de suelo agrícola se ha dedicado a la caña de azúcar, la cual en 1950 ocupaba 140 000 ha. La producción agrícola ha estado históricamente a la merced de fenómenos naturales, el paso del huracán Hugo en 1989 contribuyó a la eliminación de una gran parte de la infraestructura asociada a una industria que ya se encontraba en decadencia. Para 1990 sólo cuatro ingenios se mantenían con un área de producción de 18 400 ha y para 1997 los dos ingenios azucareros restantes ocupaban solamente 4949 ha. Muchos de los campos de producción de caña fueron abandonados y otros fueron sembrados con cultivos alternativos, la mayoría se convirtieron en pasturas permanentes.

Nosotros proponemos que el descenso observado en el consumo de fertilizantes se debe principalmente al descenso del área agrícola. Un análisis de regresión lineal entre el área agrícola y el consumo de fertilizante muestra que por cada hectárea de suelo perdida, el consumo de fertilizante disminuyó 0.809 t (**Figura 5**). Las estadísticas del consumo de fertilizante por unidad de área no se encuentran disponibles para Puerto Rico. Por esto, si nosotros asumimos que toda el área se clasifica como suelo arable y cultivos permanentes, y que un 20% de lo que se clasificó como pasturas permanentes se fertilizó (USDA-NASS, 2011a), un estimado de la tasa de aplicación de fertilizante para él área de producción de cultivos se puede realizar (**Figura 6**). Desde 1961 hasta 2006, existe un decremento lineal en la tasa de aplicación de fertilizantes de -4.6 kg de

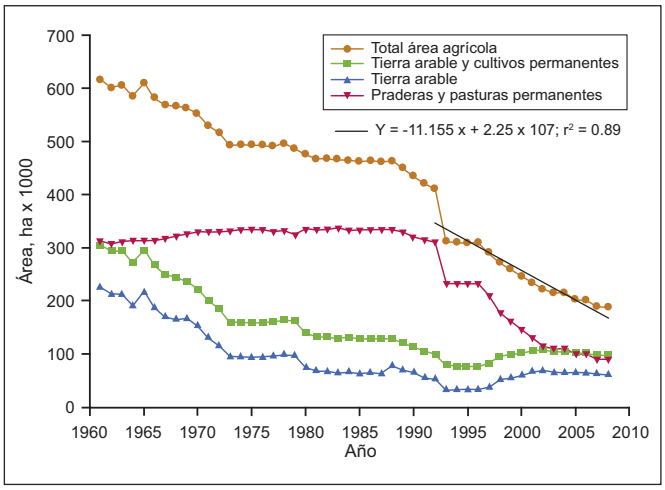


Figura 4. Tendencias en el área agrícola dividida de acuerdo al uso de la tierra en Puerto Rico entre 1960 y el 2008 (FAO, 2011).

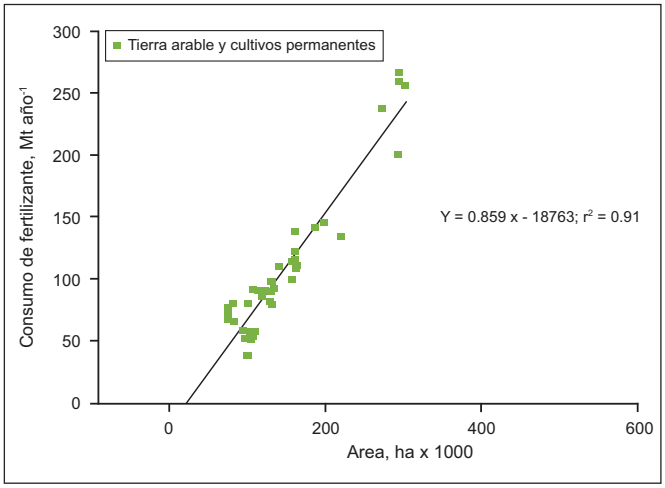


Figura 5. Relación entre el área agrícola y el consumo de fertilizante entre 1960 y el 2006 en Puerto Rico.

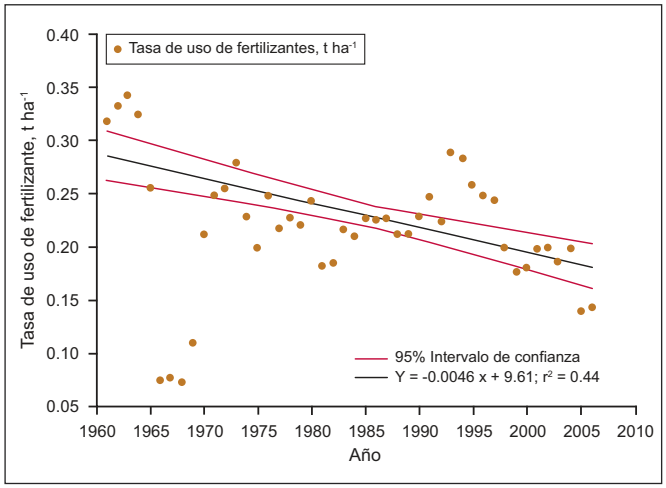


Figura 6. Tendencias en las tasas de aplicación de fertilizante para el área agrícola y los cultivos permanentes y para el 20% del área en pasturas permanentes de Puerto Rico. Los datos entre 1966 y 1969 no se incluyeron en el análisis.

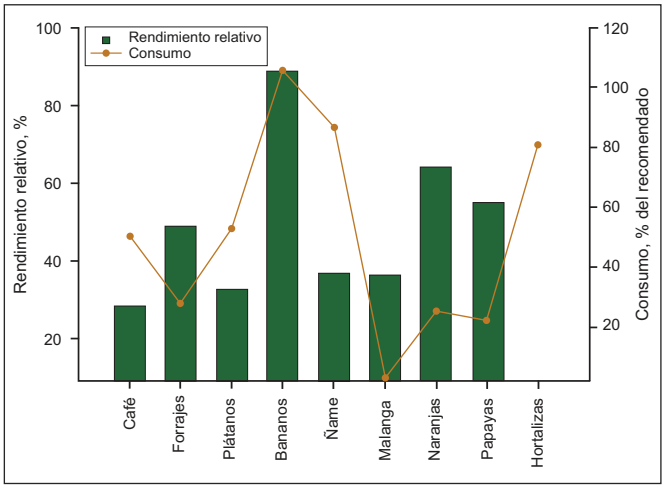


Figura 7. Rendimientos de cultivos seleccionados en relación a su consumo estimado de fertilizantes. Los rendimientos relativos de las hortalizas no pueden ser estimados debido a la gran diversidad de rendimientos reportados.

fertilizante ha^{-1} año^{-1}. En el 2006, nosotros estimamos que se aplicó un total de 0.29 t ha^{-1} en el área agrícola. A pesar de que ambos factores (pérdida de suelo agrícola y descenso en la tasa de aplicación) se encuentran fuertemente correlacionados al consumo de fertilizante, siendo por tanto razones importantes para la tendencia decreciente en el consumo de fertilizantes, el adicionar la variable dosis de fertilizante al modelo de regresión múltiple entre consumo de fertilizantes y área agrícola, no mejoró significativamente el coeficiente de regresión. Suponiendo que el material fertilizante contienen promedio 15% N, 5% P_2O_5, 10% K_2O, (G. Lozada, com. pers.) una tasa de aplicación de nutrientes de aproximadamente 44.15, y 29 kg ha^{-1} de N, P_2O_5 y K_2O, respectivamente, se aplicó en el 2006 a la tierra en cultivos comercial y pasturas bajo manejo intensivo. Se esperaría que ciertas cosechas, especialmente aquellos que tienen un alto retorno en la inversión de fertilizantes, tales como los vegetales y plátanos pudieran tener una mayor dosis de aplicación mientras que lo contrario ocurre para los cultivos de bajo valor como los dedicados a ensilaje o el café. Existe evidencia que sugiere que los agricultores no están utilizando herramientas diagnósticos tales como el análisis de suelo y tejido vegetal, para guiarse en la decisión de si se puede reducir o eliminar la aplicación de fertilizante P o K.

En el 2008, el valor del cultivo de café, plátano, banano y forraje representó el 88% del total de los cultivos agrícolas en Puerto Rico (USDA-NASSS, 2011b). Los rendimientos de la mayoría de los cultivos evaluados tenían rendimientos por debajo de su rendimiento potencial (estimado a base de información publicada y criterio de expertos) (**Figura 7**). Excluyendo el banano quien tiene rendimientos relativos de cerca del 88%, el resto de los productos evaluados produjeron muy por debajo de su potencial, con rendimientos relativos entre el 24% para el café y 64% para la naranja. Existe considerable incertidumbre en cuanto a estos estimados, debido a que no existe información histórica para cada sitio. Sin embargo, la información analizada sugiere que la producción agrícola (respecto del rendimiento) se encuentra por debajo de lo que debería ser, dada la tecnología, información y recursos disponibles. En términos de los estimados de consumo de fertilizante para productos específicos, tales como hortalizas, yuca y banana, todos fueron superiores al 80%, los cultivos de hortalizas y las bananas se sabe que son cultivos de alto valor debido a su alto precio de mercado y tienden a tener una relación muy alta entre el precio de cultivo y el del fertilizante. Con altos precios de venta del producto, el precio del fertilizante no es un factor importante en la decisión de las dosis de fertilización a utilizarse. Al contrario, cultivos tales como los forrajes utilizados para ensilaje y el café tiene una relación muy estrecha de precios entre cultivo y fertilizante local lo que influencia las tasas de aplicación del agricultor. Nuestro análisis preliminar sugiere que la mayoría de productos no se fertilizan adecuadamente.

Los estimados del rendimiento de cultivos en Puerto Rico puede estar relacionado a las tasas de uso de fertilización ($N+P_2O_5+K_2O$). La FAO reporta un uso de nutrientes para Puerto Rico de 92 kg ha^{-1} (FAOSTAT, 2011) nuestros estimados de consumo de fertilizante está en los 88 kg ha^{-1}, es decir sólo 4% de diferencia. Entre 1994-1995 el consumo de fertilizante en el mundo fue de 88 kg ha^{-1}, 90 kg ha^{-1} para Norteamérica, 216 kg ha^{-1} en el este de Asia, 77 kg ha^{-1} en el sureste de Asia, 10 kg ha^{-1} en el África subsahariana y 65 kg ha^{-1} en Latinoamérica (Bumb y Baanante, 1996). El consumo de fertilizante se ha intensificado a través del mundo ya que en el 2008 los promedios fueron de 129 kg ha^{-1} para el mundo, 146 kg ha^{-1} en Latinoamérica y el Caribe, 157

kg ha^{-1} y Norteamérica y 188 kg ha^{-1} en los países de la Unión Europea. Las tasas de uso de fertilizante para Puerto Rico en la actualidad están muy por debajo de todas estas regiones. El consumo de fertilizante en Puerto Rico se encuentra ubicado como 72 entre 149 países que han reportado estadísticas de consumo de fertilizante (FAOSTAT, 2011).

Conclusiones

El consumo de fertilizante en Puerto Rico ha disminuido y se encuentra en un valor históricamente más bajo. Los factores que ocasionaron este descenso en consumo son una disminución del área de suelo agrícola y en un menor grado una reducción en la tasa de aplicación de fertilizante. El conocimiento de estas tendencias y en un menor grado una reducción en la tasa de aplicación de fertilizantes. La producción agrícola sostenible debe estar acompañada de un manejo adecuado de los nutrientes y fertilizante, especialmente en áreas como Puerto Rico que posee una alta cantidad de habitantes por unidad de tierra. El suministro de fertilizantes P y K se puede modificar con relación a las recomendaciones, solamente si se utilizan herramientas de diagnóstico tales como análisis de suelo y planta y presupuestos. Sin embargo lo más importante tal vez es que los resultados de este artículo sugieren que el descenso del consumo de fertilizante para Puerto Rico es el síntoma de un mal mucho mayor: la pérdida gradual e incesante de la competitividad del sector agrícola de la Isla.

Bibliografía

Barbazán, M., A. del Pino, J. Bordoli, A. Califra, S. Mazzilli, y O. Ernst. 2009. La problemática del K en Uruguay: situación actual y perspectivas de corto y mediano plazo. II Simposio Nacional de Agricultura. pp.21-33.

Beinroth, F.H., R.J. Engel, J.L. Lugo, C.L. Santiago, S. Ríos, y G.R. Brannon. 2003. Updated taxonomic classification of the soils of Puerto Rico, 2002. University of Puerto Rico, Agricultural Experiment Station Bulletin 303. 73p.

Bumb, B.L., y C.A. Baanante. 1996. World trends in fertilizer use and projections to 2020. 2020 Vision Brief 38. International Food Policy Research Institute.

CAST (Council for Agricultural Science and Technology). 2000. Relevance of soil testing to agriculture and the environment. Issue Paper no. 15. June 2000. 12p.

Comas, M. 2009. Vulnerabilidad de las cadenas de suministros, el cambio climatico y el desarrollo de estrategias de adaptación: El caso de las cadenas de suministros de alimento de Puerto Rico. Tesis Doctoral. Universidad de Puerto Rico, Recinto de Rio Piedras, Escuela Graduada de Administration de Empresas. 235p.

Cox, F.R. 1992. Range in soil phosphorus critical levels with time. Soil Sci Soc. Am. J. 56:1504-1509.

DAPR (Departamento de Agricultura de Puerto Rico). 2008. Anuario estadístico. Estado Libre Asociado de Puerto Rico.

DAPR (Departamento de Agricultura de Puerto Rico). 2011. Anuario estadístico. Estado Libre Asociado de Puerto Rico.

Dodd, J.R. y A.P. Mallarino. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:1118-1128.

Eswaran, H., F. Beinroth, and P. Reich. 1999. Global land resources and population supporting capacity. Am. J. Alternative Agric. 14:129-136.

FAO. 2008. Current world fertilizer trends and outlook to 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome 2008. 34p.

FAOSTAT. 2011. FAO Statistics: http:\\faostat.fao.org/. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Verified 10 September 2011.

Fedoroff, N.V., D.S. Battisti, R.N. Beachy, P.J.M. Cooper, D.A. Fischoff, C.N. Hodges, V.C. Knauf, D. Lobell, B.J. Mazur, D. Molden, M.P. Reynolds, P.C. Ronald, M.W. Rosegrant, P.A. Sanchez, A. Vonshak, y J.K. Zhu. 2010. Radically rethinking agriculture for the 21st century. Science. 327:833-834.

Fixen, P.E., T. Bruulsema, T.L. Jensen, R. Mikkelsen, T.S. Murrell. S.B. Phillips, Q. Rund, y W.M. Stewart. 2010. The fertility of North American Soils, 2010. Better Crops. 94:6-8.

Foley, J.A., R. Defries, G.P. Asner, C. Barford, G. Bonan, S.R. Carpenter, F.S. Chapin, M.T. Coe, G.C. Daily, H.K. Gibbs, J.H. Helkowski, T. Holloway, E.A. Howard, C.J. Kucharik, C. Monfreda, J.A. Patz, I.C. Prentice, N. Ramankutty, y P.K. Snyder. 2005. Global consequences of land use. Science. 309:570-574.

Godfray, H.C.J., J.R. Beddington, I.R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J.F. Muir, J. Pretty, S. Robinson, S.M. Thomas, y C. Toulmin. 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science. 327:812-818.

Grove, T.L., 1979. Nitrogen fertility in Oxisols and Ultisols of the humid tropics. Cornell International Agriculture Bulletin 36. Cornell University, Ithaca, New York.

Huang, W.Y. 2007. Impact of rising natural gas prices on U.S. ammonia supply. A report from the Economic Research Service. USDA-ERS. WRS-0702. 18p.

IPNI (International Plant Nutrition Institute). 2011. Soil test levels in North America. IPNI, Norcross, GA. Disponible en: http://info.ipni.net/soiltestsummary.

INDEXMUNDI. 2011. Puerto Rico Producto Interno Bruto. Disponible en:http://www.indexmundi.com/es/puerto_rico/producto_interno_bruto_(pib).html. Verificado enero 2012.

Irizarry, H., y E. Rivera. 1985. Nutrient uptake and dry matter production by intensively managed yams grown in an Ultisol. J. Agric. Univ. P.R. 64:1-9.

Irizarry, H., F. Abruña, J. Rodríguez, y M. Díaz. 1981. Nutrient uptake by intensively managed plantains as related to stage of growth at two locations. J. Agric. Univ. P.R. 65:331-345.

Lathwell, D.J. 1979. Phosphorus response on Oxisols and Ultisols. New York State College of Agriculture and Life Sciences. Cornell International Agriculture Bulletin 33. 40p.

López, T. del M., T.M. Aide, y J.R. Thomlinson, 2001. Urban expansion and the loss of prime agricultural lands in Puerto Rico. Ambio. 30:49-54.

Martinuzzi, S., W.A. Gould, y O.M. Ramos-González. 2006. Land development, land use, and urban sprawl in Puerto Rico integrating remote sensing and population census data. Landscape and Urban Planning. Doi:10.1016/j.landurbplan.2006.02.014.

Parry, R. 1998. Agricultural phosphorus and water quality. Environmental Protection Agency perspective. J. Environ. Qual. 27:258-261.

Postel, S. 2005. Liquid Assests: The critical need to safeguard freshwater ecosystems. WorldWatch Paper 170. State of the World Library, 2005. 78p.

Rabalais, N.N., R.E. Turner, y W.J. Wiseman. 2001. Hypoxia in the Gulf of Mexico. J Environ. Qual. 30(2):320-329.

Rudel, T.K., M. Pérez-Lugo, H. Zichal. 2000. When fields revert to forest: Development and spontaneous reforestation in post-war Puerto Rico. Professional Geographer. 52:386-397.

Sharpley, A.N., T. Daniel, T. Sims, J. Lemunyon, R. Stevens and R. Parry. 1999. Agricultural phosphorus and eutrophication. USDA-ARS, Publication no. 149, USDA-ARS, Washington, D.C.

Snyder, C.S. 2008. Nutrients and hypoxia in the Gulf of Mexico – An update on progress, 2008. Better Crops. 92:16-22.

Sotomayor-Ramírez, D. 2010. Conceptos para mejorar recomendaciones de fertilización: Experiencias en Puerto Rico. Simposio Internacional: Importancia del manejo de suelo y fertilización con potasa para el desarrollo agrícola sustentable de América Latina y el Caribe. 10 al 13 de marzo de 2010, San Salvador, El Salvador. International Potash Institute, Asociación Salvadoreña de la Ciencia del Suelo.

Sotomayor-Ramírez, D., y G. Martínez. 2006. The status of phosphorus and other soil fertility parameters in soils of Puerto Rico. J. Agric. Univ. P.R. 90:145-157.

Stewart, W.M., D.W. Dibb, A.E. Johnston, and T.J. Smyth. 2005. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. Agron. J. 97:1-6.

Syers, J.K., A.E. Johnston, y D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.

US Census Bureau. 2011. International database; World population summary. U.S. Census Bureau, Population Division. Available at: http://www.census.gov/ipc/www/idb/worldpopinfo.php. Verified 6/7/2011.

USDA-ERS. 2011. Fertilizer use and price. USDA-Economic Research Service. http://www.ers.usda.gov/data/fertilizeruse/. Verified April 2011.

USDA-NASS (National Statistics Service). 2011a. Puerto Rico's Office for USDAs NASS. Available at: http://www.nass.usda.gov/Statistics_by_State/Puerto_Rico/index.asp. Verified 13 Sept. 2011.

USDA-NASS (National Statistics Service) 2011b. The Census of Agriculture. 2007 Census of Agriculture. Available at: http://www.agcensus.usda.gov/publications/2007/Full_Report/Census_by_State/Puerto_Rico/index.asp. Verified 13 Sept. 2011.

Vitousek, P.M., R. Naylor, T. Crews, M.B David, L.E. Drinkwater, E. Holland, P.J. Johnes, J. Katzenberger, L.A. Martinelli, P.A. Matson, G. Nziguheba, D. Ojima, C.A. Palm, G.P. Robertson, P.A. Sanchez, A.R. Townsend, y F.S. Zhang. 2009. Nutrient imbalances in agricultural development. Science. 324:1519-1520.

Vicente-Chandler, J., F. Abruña, R. Caro-Costas, y F. Silva. 1983. Producción intensiva de las forrajeras en Puerto Rico. UPRM-EEA, Río Piedras, Puerto Rico.

CURSOS Y SIMPOSIOS

1. IV Congreso Internacional sobre Banano

Organiza : Corbana
Lugar : San José, Costa Rica
Fecha : Febrero 20-24, 2012
Información : Corbana
Tel.: (506) 2240 2333
congresobanano@interamericana.co.cr
www.congresointernacionaldebanano.com

2. XVIII Conferencia Internacional de Girasol

Organiza : Asociación Argentina de Girasol
Lugar : Mar del Plata, Argentina
Fecha : Febreo 27-Marzo 01, 2012
Información : Asociación Argentina de Girasol
Tel.: (54) 11 4312 7105
www.asagir.org.ar

3. II Congreso Nacional de Ciencias Agrarias

Organiza : FCA - UNA
Lugar : Asunción, Paraguay
Fecha : Marzo 21-23, 2012
Información : FCA - UNA
Tel.: (021) 585 606/10
cnca2012@gmail.com
www.agr.una.py/congreso

4. II Simposio Regional IPNI Brasil Sobre Buenas Prácticas para el Uso Eficiente de Fertilizantes

Organiza : IPNI - Brasil
Lugar : Maringá, PR, Brasil
Fecha : Marzo 27-28, 2012
Información : IPNI - Brasil
Tel/fax.: (19) 3433 3254
elavorenti@ipni.net / rfiuza@ipni.net
www.ipni.org.br

5. III Conferencia Latinoamericana RSPO

Organiza : ANCUPA - SAMBITO
Lugar : Quito, Ecuador
Fecha : Marzo 27-30, 2012
Información : ANCUPA - SAMBITO
Tel.: (593) 2 296020 ext. 111
www.ancupa.com

6. XIX Congreso Latinoamericano - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo

Organiza : SLCS - AACS
Lugar : Mar del Plata, Argentina
Fecha : Abril 16-20, 2012
Información : SLCS - AACS
slcs2012@congresodesuelos.org.ar
www.congresodesuelos.org.ar

7. I Congreso Internacional de Biotecnología y biodiversidad y Noveno Foro Internacional del Banano

Organiza : CIBE - AEBE
Lugar : Guayaquil, Ecuador
Fecha : Mayo 28-31, 2012
Información : CIBE - AEBE
Tel.: (506) 2240 2333
www.cibe.espol.edu.ec/node/54

8. XIX Conferencia ISTRO y IV Reunión de la Sociedad Uruguaya de la Ciencia del Suelo

Organiza : ISTRO - SUCS
Lugar : Montevideo, Uruguay
Fecha : Septiembre 24-28, 2012
Información : ISTRO - SUCS
Istro2012@congresos-rohr.com
www.congresos-rohr.com

9. XVII Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite y Expopalma 2012

Organiza : Fedepalma - Cenipalma
Lugar : Cartagena de Indias, Colombia
Fecha : Septiembre 25-28, 2012
Información : Fedepalma - Cenipalma
acampo@fedepalma.org
Tel.: (571) 2 08 6300 - 4 83 7450
www.fedepalma.org

10. XX Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo

Organiza : IUSS
Lugar : Jeju, Corea
Fecha : Junio 8-13, 2014
Información : IUSS
Tel.: (44) 01224 498200
www.iuss.org

IPNI ANUNCIÓ A LOS GANADORES DE LOS PREMIOS IPNI-SCHOLAR AWARD 2011

La edición 2011 del premio Scholar Award auspiciado por IPNI, ya tiene sus ganadores. "Se observó un gran incremento en el número de aplicaciones este año y la competencia regional por el premio ha sido ardua", explicó el Dr. Terry L. Roberts, Presidente de IPNI. "El proceso de selección ha reunido una vez más a un grupo de los más destacados jóvenes científicos – este premio continúa poniendo en relieve un futuro prometedor para la investigación en nutrición vegetal alrededor del mundo, y es un esfuerzo del que estamos muy orgullosos de apoyar".

Este año, IPNI ha nombrado a 20 (veinte) estudiantes de posgrado en áreas relacionadas al manejo de la nutrición de cultivos y fertilidad de suelos, como los ganadores del Premio Académico. Gracias al apoyo de las compañías miembro de IPNI, cada uno de los ganadores recibirá como galardón la suma de USD 2 000 y una placa distintiva.

Los galardonados (becarios e institución), ordenadas alfabéticamente por región del Instituto, para esta edición 2011 han sido:

Africa:

- Grace Kanonge, University of Zimbabwe, Harare, Zimbabwe
- Boaz S. Waswa, Centre for Development Research (ZEF), Bonn, Germany

Australia/Nueva Zelanda:

- Brooke Ryan, University of Adelaide, Adelaide, Australia

China:

- Li Wang, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Beijing, China
- Chuan Limin, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Beijing, China
- Ying Xia, Wuhan Botanical Garden, Hubei, China

Europa del Este y Asia Central:

- Elena Pavlova, Omsk State Agrarian University, Omsk, Russia
- Dmitry V. Bozhkov, Soil Science and Land Resources Department, South Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Latinoamérica:

- Darío Sebastián Ceballos, Universidad de Buenos Aires, Campana, Argentina
- Diogo Mendes de Paiva, Universidade Federal de Vicosa, Vicosa, Brazil
- Maria Elena Cardenas, Universidad de Sonora, Pueblo Yaqui, México

Norteamérica:

- Ronald Navarrete-Ganchozo, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
- Tyler J. Nigon, University of Minnesota, South Saint Paul, Minnesota, USA
- Joshua N. Cobb, Cornell University, Brooktondale, New York, USA
- Jared Crain, Oklahoma State University, Woodward, Oklahoma, USA
- Cameron Pittelkow, University of California, Davis, California, USA

Sur de Asia:

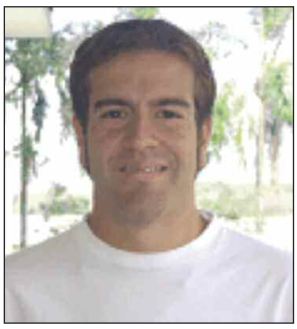
- Gopal Ramdas Mahajan, Indian Agricultural Research Institute, New Delhi, India
- Shahid Hussain, University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan
- Sumanta Kundu, Institute of Agricultural Sciences, Calcutta University, Kolkata, India

Sudeste de Asia:

- Fabien F. Tengoua, Universiti Putra Malaysia, Serdang, Malaysia

La nota de prensa completa con la información completa de los galardonados se encuentra disponible en el sitio principal de IPNI: http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf

Desde las oficinas regionales IPNI en Latinoamérica, agradecemos a todos los participantes de esta convocatoria y felicitamos especialmente a María Elena Cárdenas (Universidad de Sonora, Pueblo Yaqui, México), Diogo Mendes de Paiva (Universidade Federal de Vicosa, Brasil) y Darío S. Ceballos (Universidad de Buenos Aires, Argentina) por ser ganadores de esta edición 2011.



El **Ing. Agr. Darío Sebastián Ceballos** se encuentra completando sus estudios del Programa de Maestría en Recursos Naturales en la Universidad de Buenos Aires (UBA), en la ciudad de Campana, Argentina. Su tesis se titula "Cambio en el Uso de la Tierra y Nitrógeno vs. Fósforo: Limitación relativa en ciénagas y plantaciones de *Populus deltoides* en suelos drenados en el bajo delta del Río Paraná". Su trabajo de investigación está orientado a la comprensión de la dinámica de nutrientes en los ecosistemas de producción forestal vulnerables en la región del bajo delta del Río Paraná. Este trabajo podría proporcionar respuestas a cuestionamientos acerca de la posibilidad de crecimiento en la producción de fibra y alimentos en favor de las familias isleñas de la región sin cambios drásticos en sus culturas. Así, Darío espera continuar sus investigaciones enfocándose en aspectos de la nutrición en sistemas forestales y el cambio en el uso de la tierra.

Para mayor información acerca de IPNI Scholar Award: http://www.ipni.net/awards

PUBLICACIONES DISPONIBLES

Titulo de la Publicación	Costo (U$S)	Costo ($ arg.)
NUEVO. Simposio Fertilidad 2011. La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de Producción. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Mayo de 2011.	20.00	80.00
NUEVO. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. Resumen y discusión de los principales resultados obtenidos en la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe (Argentina).	8.00	30.00
Manual de Manejo del Cultivo de Soja. Aborda temáticas de fenología, manejo, nutrición y fertilidad, malezas, enfermedades y plagas del cultivo.	16.00	60.00
Simposio Fertilidad 2009. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Mayo de 2009.	16.00	60.00
Simposio Fertilidad 2007. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Mayo de 2007.	8.00	30.00
Como se Desarrolla una Planta de Soja. Edición en español de la guía fenológica y de manejo publicada por Iowa State University.Como se desarrolla una planta de maíz. Edición en español de la guía fenológica y de manejo publicada por Iowa State University.	4.00	15.00
Como se Desarrolla una Planta de Maíz. Edición en español de la guía fenológica y de manejo publicada por Iowa State University.	4.00	15.00
Síntomas de Deficiencias Nutricionales de Trigo, Maíz y Soja. Set de tres posters que muestran y describen los síntomas de deficiencia de nutrientes en los tres cultivos.	4.00	15.00
Simposio Fertilidad 2005. Nutrición, Producción y Ambiente. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Abril de 2005.	4.00	15.00
Simposio Fertilidad 2004. Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sustentable. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Abril de 2004.	4.00	15.00
Simposio El Fósforo en la Agricultura Argentina. Actas del Simposio efectuado en Rosario en Mayo de 2003.	4.00	15.00
Fertilidad 2002. Trabajos presentados en la Cuarta Jornada de Actualización Técnica para Profesionales realizada en Rosario (Argentina) en Mayo de 2002.	2.00	7.50
Fertilidad 2001. Trabajos presentados en la Tercera Jornada de Actualización Técnica para Profesionales realizada en Julio de 2001.	2.00	7.50
Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Publicación didáctica sobre el uso y el manejo de suelos y fertilizantes.	15.00	60.00
Fertilización del Algodón para Rendimientos Altos. Cubre en forma detallada los requerimientos nutricionales, análisis foliar y de suelos y fertilización del cultivo.	5.00	18.00
Balance para el Éxito. Trifolios con información de manejo nutricional de cultivos. Disponibles: Alfalfa, Trigo, Maíz, Soja, Sorgo granífero, Algodón. El precio es por cada uno.	0.50	2.00

Vea el catálogo completo de publicaciones del IPNI en http://lacs.ipni.net

Forma de pago de las publicaciones

Argentina

- Giro postal o telegráfico a través de Correo Argentino - Los datos para realizar su envío son los siguientes:
  Sra. Laura Nélida Pisauri - DNI: 17.278.707 • Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso, Buenos Aires, Argentina
  Agencia de correos de destino: Sucursal Acassuso, Buenos Aires, Argentina
- Depósito bancario a INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, Banco Galicia, Sucursal Olivos, Cta. Cte. Nº 3856/4 053/5
- Transferencia bancaria a INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, Banco Galicia, Sucursal Olivos, Cta. Cte. Nº 3856/4 053/5, CBU 0070053520000003856451 CUIT 30-70175611-4

Otros países

- Envío de dinero a través de Western Union - Los datos para realizar su envío son los siguientes:
  Sra. Laura Nélida Pisauri - DNI: 17.278.707 • Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso, Buenos Aires, Argentina
  Agencia de correos de destino: Sucursal Acassuso, Buenos Aires, Argentina

Solicitamos nos haga saber por teléfono, fax o correo electrónico, la opción elegida y nos envíe los datos para acreditar su pago (Nº de giro y fecha, datos de depósito o transferencia bancaria).

Para conocer los gastos de envio y cualquier otra consulta de publicaciones por favor enviar un correo electrónico a Lpisauri@ipni.net