

Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica



IAH 26 - Junio 2017

En este número

- Métodos de diagnóstico nutricional
- Umbral de P para alfalfa en Entre Ríos
- Cultivos de cobertura en región pampeana
- Efectividad de cales granuladas en suelos ácidos
- Nutrición con Mg y S en papa

Archivo Agronómico #16

- Fertilizantes y calibración de fertilizadoras

IAH 26 - Junio 2017

Versión Cono Sur

Director: Dr. Fernando O. García
International Plant Nutrition Institute
Programa Cono Sur de Latinoamérica
Correo electrónico: fgarcia@ipni.net

Propietario:

International Plant Nutrition Institute (IPNI)
CUIT: 30-70175611-4
ISSN 2222-016X
No. de Registro de Propiedad Intelectual: 5307180

Oficina para el Cono Sur de Latinoamérica
Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso
Buenos Aires - Argentina
Telf/Fax.: 54 11 4798 9939
Correo electrónico: lpisauri@ipni.net
<http://Lacs.ipni.net>

Oficina para el Norte de Latinoamérica
Casilla Postal 17 17 980
Quito - Ecuador
Telf.: 593 2 2463 175 • Fax: 593 2 2464 104
Correo electrónico: aormaza@ipni.net
<http://nla.ipni.net>

Oficina para México y Centroamérica
3500 Parkway Lane, Suite 550
Peachtree Corners, Georgia 30092-2844 - EE.UU
Telf.: 1 770 825 8079 • Fax: 1 770 448 0439
Correo electrónico: atasistro@ipni.net
<http://mca.ipni.net>

Contenido

Métodos de diagnóstico nutricional en cultivos extensivos en Argentina	3
Adrián Correndo y Fernando García	
Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos (Argentina)	13
Juan M. Pautasso y Pedro A. Barbagelata	
¿Son convenientes los cultivos de cobertura en la región pampeana? Un análisis de la información existente	17
Roberto Álvarez, Haydee S. Steinbach y Josefina L. De Paepe	
Efectividad de cales granuladas en el manejo de dos suelos ácidos	21
Juan Hirzel, Roberto Lecannelier, Emilio Cuevas y Francisco Rodríguez	
La Importancia de la nutrición con magnesio y azufre en el cultivo de la papa	30
Francisco Jiménez Uribe	
Cursos y Simposios	34
Publicaciones Disponibles	35

Archivo Agronómico # 16

Características físicas de los fertilizantes y calibración de fertilizadoras

Walter Carciochi, y Santiago Tourn

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.

Misión del IPNI

La misión del IPNI es desarrollar y promover información científica sobre el manejo responsable de la nutrición de las plantas para el beneficio de la humanidad.

IPNI es una organización global con iniciativas enfocadas en la creciente necesidad mundial de alimentos, forrajes, combustibles, y fibras. Los programas de investigación y educación del IPNI desarrollan y promueven el Manejo Responsable de los Nutrientes a través de los 4 Requisitos (4R): aplicar la fuente y la dosis correcta en el momento y la forma correctos.



<http://www.ipni.net>

Métodos de diagnóstico nutricional en cultivos extensivos en Argentina*

Adrián Correndo y Fernando García

- *El diagnóstico adecuado del estado nutricional de los cultivos es clave para mejorar la eficiencia de uso de los recursos en los sistemas productivos.*
- *El manejo responsable de los nutrientes implica el uso de principios científicos para decidir la correcta combinación de la fuente de nutrientes, la dosis, el momento y la forma de aplicación.*
- *Este artículo propone: i) una descripción general del desarrollo y calibración de análisis de suelos como herramienta de diagnóstico en Argentina; y ii) una discusión acerca de los desafíos y oportunidades de otras metodologías de diagnóstico.*

Introducción

En un contexto de producción agropecuaria cada vez más demandante, diagnosticar correctamente el estado nutricional de los cultivos es condición necesaria para mejorar la eficiencia de utilización de los recursos e insumos involucrados en el sistema productivo. Así, el concepto central del Manejo Responsable de Nutrientes es realizar, para cada situación específica, un diagnóstico nutricional que permita la aplicación de la “fuente” correcta de nutrientes en la “dosis” correcta, en el “momento” correcto y en la “forma” correcta. Estos cuatro “requisitos” (4Rs) son necesarios para un manejo responsable de la nutrición, que contribuya de manera sostenible a la productividad de los cultivos y los sistemas contemplando el equilibrio entre los aspectos ambientales, económicos y sociales (**Figura 1**).

Existen principios científicos específicos que guían el desarrollo de las prácticas que determinan fuente, dosis, momento y forma correctos. Algunos ejemplos de los principios y prácticas claves se muestran en la **Tabla 1**. Globalmente, los principios son los mismos, pero la forma en que se ponen en práctica a nivel local varía en función de las condiciones específicas de suelo, cultivo, climáticas, del tiempo, económicas y sociales. Los agricultores y los asesores de cultivos deberán asegurarse de que las prácticas que se seleccionan y aplican a nivel local, estén de acuerdo con estos principios.

El suelo es la principal fuente de nutrientes para las plantas y su oferta se estima usualmente a través del análisis de suelos de las formas “disponibles” o “extractables” de los nutrientes. Los análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad, son extracciones químicas y/o bioquímicas rápidas que intentan estimar la disponibilidad de nutrientes (Sims, 2000; Havlin et al., 2005). La cantidad de nutriente que se extrae es solo una proporción de la cantidad total de nutriente en el suelo. La cantidad de nutriente extraída tampoco es igual a la cantidad de nutriente absorbida por el cultivo pero se relaciona estrechamente con esta. Por lo tanto,

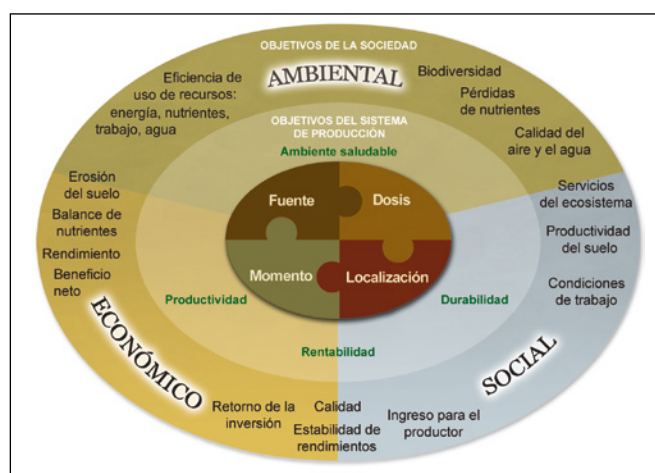


Figura 1. Esquema conceptual del Manejo de Nutrientes 4Rs considerando las dimensiones ambiental, económica y social. Adaptado de Bruulsema et al. (2008).

el análisis de suelo es solo un “índice de disponibilidad” de nutrientes para el cultivo. Frecuentemente se utiliza el término “disponible”, pero se debe entender que la fracción determinada usualmente representa solo una fracción que está en rápido equilibrio con la solución del suelo, y puede ser absorbida por las plantas.

El análisis de suelos continúa siendo probablemente el enfoque más utilizado a nivel mundial, pero otras metodologías o enfoques tales como otros indicadores de suelo, muestreos geo-referenciados, análisis de planta, requerimientos de nutrientes, sensores remotos, y modelos de simulación aportan alternativas complementarias y/o superadoras para mejorar los diagnósticos de fertilidad (Janssen et al., 1990; Satorre et al., 2005; Melchiori, 2012; Shanahan et al., 2008, Correndo y García, 2012).

En este trabajo se presenta i) una descripción del desarrollo e implementación de programas de análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad, y ii) una discusión acerca de los desafíos y oportunidades de otras metodologías de diagnóstico.

* Adaptado del artículo presentado en el XXIV Congreso Aapresid “Resiliar”, 3-5 de Agosto de 2016, Rosario, Santa Fe, Argentina International Plant Nutrition Institute, IPNI Latinoamérica Cono Sur Autor de contacto. Correo electrónico:acorrendo@ipni.net

Tabla 1. Ejemplos de principios científicos y prácticas asociadas al manejo de nutrientes. Adaptado del IPNI (2013).

	Los Cuatro Requisitos (4Rs)			
	Fuente	Dosis	Momento	Forma
Principios Científicos	<ul style="list-style-type: none"> - Asegurar una oferta balanceada de nutrientes - Adaptarse a las propiedades del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar la oferta de nutrientes de todas las fuentes - Evaluar la demanda del cultivo 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar las dinámicas de absorción del cultivo y de abastecimiento del suelo - Determinar momentos de riesgo de pérdidas 	<ul style="list-style-type: none"> - Reconocer los patrones de distribución de raíces - Manejar la variabilidad espacial
Elección de Prácticas	<ul style="list-style-type: none"> - Fertilizante comercial - Abono animal - Compost - Residuos de cultivos 	<ul style="list-style-type: none"> - Analizar los nutrientes del suelo - Realizar cálculos económicos - Balancear la remoción del cultivo 	<ul style="list-style-type: none"> - Previo a la siembra - A la siembra - En floración - En fructificación 	<ul style="list-style-type: none"> - Al voleo - En bandas, chorreado, inyectado - Aplicación en dosis variable

Análisis de suelos

Los objetivos del análisis de suelos con fines de diagnóstico son: 1) proveer un índice de disponibilidad de nutriente en el suelo, 2) predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización o enmienda, y 3) proveer la base para el desarrollo de recomendaciones de fertilización (Gutiérrez Boem et al., 2005; Havlin et al., 2005). Claramente, el análisis de suelo constituye una de las mejores prácticas de manejo (MPM) para el uso de fertilizantes y otros abonos, ya sea para los fines de producción como de protección ambiental.

Desarrollo e implementación de programas de análisis de suelo

El desarrollo del análisis de suelos como diagnóstico requiere de una inversión significativa en recursos técnicos, económicos y de tiempo. Por esta razón, a nivel mundial los estudios de correlación y calibración, que fueron numerosos en distintos países entre las décadas de 1950 y 1970, se han reducido notablemente en las últimas décadas (Fixen, 2005). Normalmente, se establecen redes de ensayos a campo en suelos con niveles contrastantes de disponibilidad del nutriente bajo estudio. La implementación de programas de diagnóstico de fertilidad, basados en el análisis de suelo, involucran seis etapas principales: i) Muestreo, ii) Análisis de laboratorio, iii) Correlación, iv) Calibración, v) Interpretación, y vi) Recomendaciones. Esta serie de pasos debe seguir estrictamente las indicaciones definidas durante el desarrollo del programa ya que suelen presentarse numerosas fuentes de variabilidad y de errores potenciales en cada uno (Walsh y Beaton, 1973; Peck et al., 1977; Brown et al., 1987; Sims, 2000; Álvarez et al., 2005, y Havlin et al., 2005):

i) **Muestreo.** En las etapas de desarrollo se definen momento, frecuencia, profundidad y otras consideraciones que contribuyen a atenuar los efectos de variabilidad espacial y temporal. La representatividad de la muestra es fundamental para que el programa sea exitoso. Es

importante remarcar el concepto de que no existe análisis y/o recomendación que mejore la representatividad y calidad de la muestra analizada. Los lotes, zonas de manejo o grillas generalmente presentan marcada variabilidad espacial a nivel micro y macro. El concepto de área homogénea de manejo toma especial relevancia a la hora del muestreo. Para este punto, disponer de fotos aéreas y mapas de suelo y/o de rendimiento, puede ser de suma utilidad a la hora de diferenciar mejor entre áreas. Es clara pues la insistencia en un cuidadoso y detallado proceso de toma de muestras a campo. Recomendaciones detalladas para un correcto muestreo de suelos pueden consultarse en Carretero et al. (2016).

ii) **Análisis de laboratorio.** Esta etapa es frecuentemente identificada como la principal fuente de variación en los resultados de un análisis de suelos y esto no debiera ser así. Las diferencias que se observan entre resultados de análisis de una misma muestra entre distintos laboratorios se deben a varias causas: 1) representatividad de la muestra -¿fue bien homogenizada antes de dividirse y enviarse a distintos laboratorios?-, 2) diferencias de extractantes utilizados, 3) metodologías de análisis diferentes (relación suelo: extractante, tiempo de agitado, tiempo de reposo, instrumental, etc.), y 4) calidad analítica del laboratorio. En este sentido, los programas de interlaboratorio contribuyen de manera decisiva a mejorar la calidad analítica y de los resultados (Marban y Ratto, 2005; González et al., 2007; Cosentino et al., 2011). En el caso de Argentina, diversas instituciones y laboratorios, coordinados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP), conforman el SAMLA que es una red de adhesión voluntaria que nuclea a laboratorios dedicados al análisis de suelos, aguas, vegetales y enmiendas orgánicas, cuyo objetivo es mejorar la calidad de los análisis con el fin de hacer los resultados más confiables y comparables entre sí, normalizando las distintas técnicas para determinaciones tanto físicas como químicas y unificando criterios en todo lo relativo a la expresión e interpretación de los resultados analíticos (MAGyP, 2010). Por otra parte, el

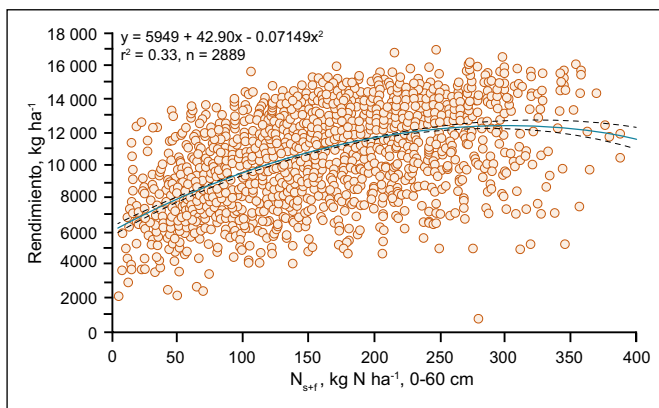


Figura 2. Rendimiento de maíz en función de la disponibilidad de N (como N en el suelo -0-60 cm- a la siembra del cultivo + N de fertilizante). Datos de 545 ensayos distribuidos en la región pampeana (Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos, La Pampa y San Luis) en el periodo 1994-2014. Regresión significativa ($p < 0.0001$). Adaptado de Correndo (2016).

PROINSA es un programa de interlaboratorios para suelos agropecuarios, también coordinado por el MAGyP, que tiene la finalidad de determinar el desempeño de cada laboratorio participante mediante la comparación de sus resultados con los de todos los demás participantes. La continuidad y profundización de este tipo de programas contribuirá a la mejora de la calidad analítica de los laboratorios (Cosentino et al., 2011).

iii y iv) Correlación y calibración. El alcance del análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad es limitado por la variabilidad observada en las relaciones entre el rendimiento o la respuesta de los cultivos y el nivel de nutriente “disponible” en el suelo. En general, los niveles de un nutriente en suelo explican un 40-60% del rendimiento o respuesta del cultivo. Este escenario ocurre debido a que el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo dependen de numerosos factores más allá de la disponibilidad de un único nutriente (ej.: radiación, temperatura, otros nutrientes, agua, etc.).

A modo de ejemplo, las investigaciones en Argentina han permitido generar calibraciones basadas en la disponibilidad de nitrógeno (N) (como el contenido de N-nitratos en el suelo a 0-60 cm previo o a la siembra + N del fertilizante), facilitando la formulación de interpretaciones y recomendaciones (González Montaner et al., 1991; Ruiz et al., 2001; Álvarez et al., 2003; Barbieri et al., 2008; García et al., 2010). Sin embargo, como se muestra en la **Figura 2** para el caso de maíz, a pesar de explicar una buena parte de la variación del rendimiento del cultivo, la variabilidad que presentan estas relaciones debe ser considerada. La misma puede adjudicarse, entre otros factores, al aporte de N mineralizado durante el ciclo del cultivo, pérdidas del N disponible a la siembra, diferencias en potencial de rendimiento, condiciones climáticas, otros nutrientes o propiedades de suelo limitantes, y otros factores de manejo (plagas, malezas, enfermedades).

El diagnóstico de la fertilidad fosfatada de los suelos para cultivos extensivos en Argentina se basa en el análisis “en pre-siembra” que determina el nivel de P Bray-1 a 0-20 cm (Barbagelata, 2011). Normalmente, los niveles críticos se estiman bajo un criterio productivo, procurando lograr el 90% del rendimiento relativo al máximo sin deficiencia de P (**Figura 3A**). Asimismo, la decisión de fertilización depende, en gran medida, de aspectos económicos y financieros, donde las relaciones insumo:producto determinan una potencial rentabilidad de la práctica. Por ej. en el caso del trigo, las relaciones de precios históricas indican que se necesitan, en promedio, 20.9 kg de trigo para pagar 1 kg de P. Dicha relación presenta una variación histórica en torno al 33%, y en el 50% de los casos se ubica entre 16.5 y 23.4 kg de trigo por kg de P. Al considerar esta variación histórica como criterio económico para la determinación del umbral, se estima un rango crítico aproximado entre 13 y 18 ppm para obtener respuestas rentables a la fertilización con dosis promedio de 22 kg de P (**Figura 3B**).

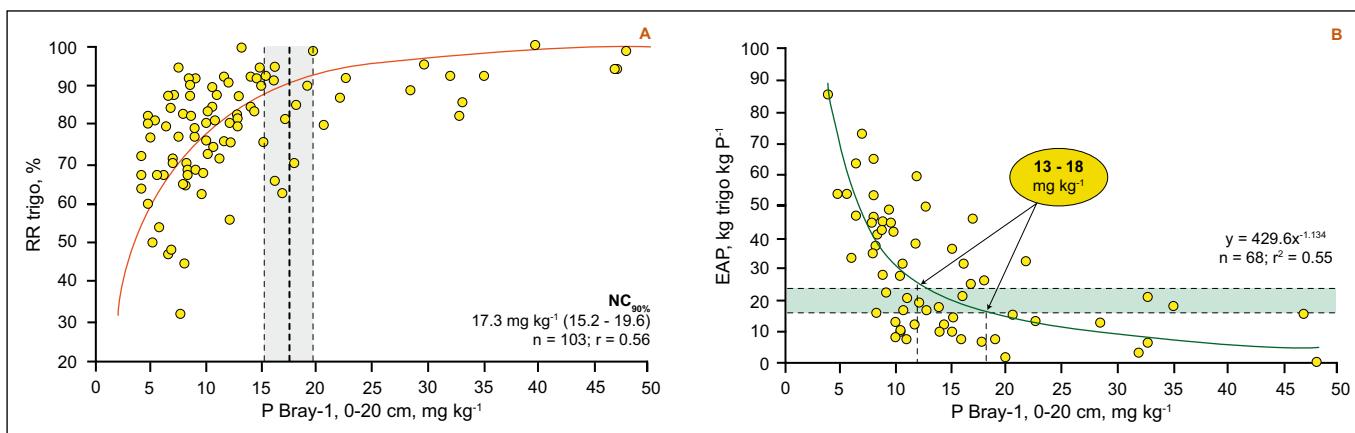


Figura 3. Estimación de nivel crítico de P extractable Bray-1 para trigo utilizando rendimiento relativo (RR, A) y eficiencia agronómica de la respuesta a P (EAP, B). En A, la franja vertical gris indica el intervalo de confianza (95%) para el nivel crítico según el método ALCC modificado (Correndo et al., 2017). Para lograr el 90% de RR es necesario tener entre 15.2 y 19.6 mg kg⁻¹. En B, la franja horizontal verde indica el percentil central (P25-P75) de la relación histórica de precios de P en trigo (16 a 23 kg trigo kg P⁻¹). Según la función ajustada y la relación de precios, el umbral de P Bray-1 que determina respuestas económicas varía entre 13 y 18 mg kg⁻¹. Datos correspondientes a 103 ensayos de fertilización fosfatada en la región pampeana (1998-2014) de distintos autores. Fuente: Correndo y García (2016).

El caso de azufre (S) debe ser examinado con mayor detalle ya sea en lo que hace a metodología de análisis como a los estudios de correlación y calibración, los cuales no han sido muy exitosos para definir niveles críticos hasta la fecha en Argentina y en otros países (García et al., 2010). Si bien en los últimos años se ha avanzado en el desarrollo y evaluación de métodos de diagnóstico de la disponibilidad de S, el actual desafío es generar más conocimiento sobre metodologías alternativas/complementarias que permitan un diagnóstico más preciso, simple y de bajo costo (Carciocchi et al., 2015).

v y vi) Interpretación de resultados y recomendaciones.

La interpretación y subsecuente recomendación de fertilización, puede ser mejorada utilizando metodologías y herramientas complementarias al análisis de suelo. Siguiendo con el ejemplo de la relación disponibilidad de N con rendimiento de maíz de la **Figura 2**, evaluaciones de la condición de sitio como tipo de suelo, historia del lote, potencial de rendimiento, genética empleada, condiciones climáticas, profundidad de napa freática, entre otras, pueden contribuir a una mejor interpretación de los resultados. Otras variables de suelo o planta pueden ser determinadas para ajustar la interpretación, en este caso se podrían mencionar la evaluación de N-nitratos en suelo o de nitratos en jugo de base de tallos al estado V5-6, la determinación del índice de verdor a través del clorofilometro Minolta SPAD 502, y la evaluación del N mineralizado (Rice y Havlin, 1994; Melchiori, 2007; Sainz Rozas et al., 2000 y 2008; Reussi Calvo et al., 2013a, b).

En el caso de S, los ambientes más frecuentemente deficientes incluyen una o varias de las siguientes condiciones (Ferraris et al., 2004; Reussi Calvo y Echeverría, 2009): i) suelos degradados, con muchos años de agricultura continua (especialmente soja), ii) con historia de cultivos de alta producción con fertilización nitrogenada y fosfatada; iii) suelos arenosos de bajo contenido de materia orgánica; y/o iv) suelos sin aporte de sulfatos por parte de napas freáticas superficiales o aguas de riego.

La variación temporal afecta, en particular, a los nutrientes más asociados con la materia orgánica, como es el caso de N y S, y puede ser abordada a través del uso de modelos de simulación del crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo que incluyan simulaciones de la dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-planta (Hoogenboom et al., 2003; Mercau, 2010).

Para P, la recomendación con criterio de suficiencia o de construcción y mantenimiento es una alternativa a decidir por el productor y su asesor. La utilización de un criterio u otro, o de situaciones intermedias, depende en gran medida de la situación de cada productor, el sistema de manejo, la disponibilidad de capital, la relación de precios granos/fertilizante y la tenencia de la tierra, entre otros aspectos. En cualquier caso, el conocimiento de las correlaciones, calibraciones y la interpretación del análisis de suelo (Berardo y Grattone, 2000; Melchiori et al., 2002; García et al., 2005) (**Figura 3**) contribuirá a

una toma de decisión más adecuada para optimizar la eficiencia de uso del nutriente y de otros recursos. A modo de ejemplo, el laboratorio de Suelos de la Universidad del Estado de Kansas ofrece en sus recomendaciones las dos alternativas para que productores y asesores tomen la decisión en cada caso en particular (Leikam et al., 2003). Las alternativas intermedias son validas y probablemente son las más utilizadas en la actualidad (Mallarino, 2012).

Herramientas complementarias

Análisis de plantas

Esta metodología es una técnica que determina el contenido de los nutrientes en tejidos vegetales de plantas de un cultivo muestreado en un momento o etapa de desarrollo determinados (Munson y Nelson, 1986; Campbell, 2000). Esta herramienta se basa en los mismos principios que el análisis de suelos, asumiendo que la concentración de nutrientes en la planta está directamente relacionada con la habilidad del suelo para proporcionarlos y, a su vez, con la productividad de las plantas. Las utilidades de esta metodología pueden ser tales como: i) verificar síntomas de deficiencias nutricionales; ii) identificar deficiencias asintomáticas (“hambre oculta”); iii) indicar interacciones entre nutrientes; iv) localizar zonas del lote que se comportan en forma diferente; y v) evaluar el manejo nutricional de los cultivos.

En el aspecto práctico de esta técnica, la misma comprende una secuencia de procedimientos con igual importancia: muestreo, análisis químico e interpretación.

i) **Muestreo.** Es importante considerar que el análisis de planta exige un rigor de muestreo mayor que el del análisis de suelos, debido a que la especie, edad, tipo de tejido (planta entera, vainas, hojas completas, láminas, etc.), momento de muestreo, y el nutriente en cuestión, son variables que afectan la interpretación de los resultados. Así, por ejemplo, intervienen diferentes factores fisiológicos como la movilidad de los nutrientes dentro de la planta: algunos son móviles (como N, potasio -K- y P), mientras que otros se acumulan a medida que los tejidos maduran y no se remobilizan hacia nuevos tejidos (como calcio -Ca- y hierro -Fe-).

Como regla general debemos tomar muestras correspondientes a tejidos similares y en el mismo estado fisiológico a los definidos por la referencia con la cual se compararan los resultados del análisis, es decir siguiendo las instrucciones correspondientes al método de interpretación que se utilizará.

ii) **Análisis químico.** El análisis químico de tejido vegetal tiene como objetivo determinar el contenido de nutrientes, para comparar con los de plantas sin deficiencias nutricionales y, conjuntamente con los resultados del análisis de suelo, recomendar mejores prescripciones de fertilización. Una vez que las muestras representativas han sido recolectadas del campo, se envían al laboratorio para proceder al análisis químico. Los resultados de los análisis de macronutrientes se expresan, generalmente

en g kg⁻¹ de materia seca o en unidades de porcentaje relativas al peso seco, en tanto que los micronutrientes se expresan en mg kg⁻¹ (equivalente a ppm), también en relación al peso seco.

iii) **Interpretación.** Existen varias alternativas para la interpretación de los resultados de los análisis vegetales. De manera general, se establecen diferentes categorías de contenido de nutrientes en tejido vegetal (**Figura 4**).

El diagnóstico basado en el nivel crítico es uno de los criterios más difundidos de interpretación del análisis de plantas y requiere que la concentración de nutrientes sea comparada con valores estándares para un determinado nutrimento, estado fenológico y órgano establecido (Bates, 1971). Las calibraciones de niveles críticos consideran como tal a la concentración mínima del nutriente con la que se logra 90-95% del rendimiento máximo. Una de las desventajas del criterio de niveles críticos radica en que estos valores pueden variar entre un 25% o más en función de diferentes condiciones (estado fenológico, órgano muestreado).

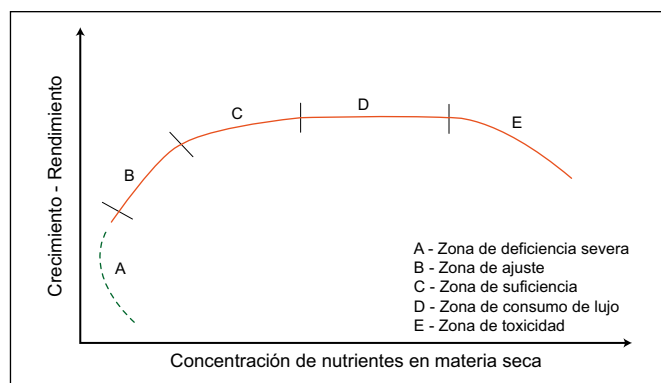


Figura 4. Relación general entre el crecimiento y/o rendimiento y el contenido de nutrientes en tejido vegetal. Adaptado de Jones (1998).

Una alternativa al nivel crítico es el criterio de “rangos de suficiencia”, que es el más popular y se pretende que los valores foliares no sean inferiores a un nivel considerado como crítico o se sitúen dentro de un rango de suficiencia (**Tabla 2**). La alternativa de utilizar “rangos” en lugar de niveles críticos se basa en que estos últimos no son valores estrictos de inflexión, y los rangos otorgan ventajas sobre todo en la identificación de deficiencias asintomáticas, que muchas veces pueden encontrarse por encima del nivel crítico (Campbell y Plank, 2000a).

Los análisis que detectan valores en los rangos de bajo a deficiente, pueden estar asociados a síntomas visibles de deficiencias y/o rendimientos reducidos. Por el contrario, resultados en los rangos altos o de exceso, se asocian a consumos de lujo o a situaciones de toxicidad que conducen potencialmente a bajos rendimientos o mala calidad de los productos cosechados (Melgar et al., 2011). Los rangos de suficiencia indicados en la Tabla 2, deben ser considerados como orientativos ya que agrupan información de diversos autores y no son específicos para distintas regiones y condiciones de cultivos. La información local, en cuanto a rangos críticos de concentración, será siempre de mayor valor en la evaluación del diagnóstico nutricional de las plantas (Correndo y García, 2012; Divito et al., 2016).

En algunos países, incluyendo Brasil, Canadá, China, EE.UU. e India, asesores públicos y privados han adoptado el Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS) como parte de sus técnicas de diagnóstico en áreas seleccionadas. El DRIS se basa en utilizar cocientes relativos de las concentraciones de los nutrientes. Las normas para estas razones o cocientes se establecen comparando el análisis foliar completo de un cultivo de alto rendimiento con uno de bajo rendimiento. Debido a

Tabla 2. Rangos de suficiencia de nutrientes en planta para trigo, maíz, soja. Consultar partes de planta a muestrear y más cultivos en Correndo y García (2012).

Nutriente Momento de muestreo	Trigo		Maíz		Soja
	Emergencia -Macollaje	Encañazón -Floración	V3-V4	Floración	Floración
N (%)	4.0-5.0	1.75-3.3	3.0-5.0	2.7-4.0	3.25-5.5
P (%)	0.2-0.5	0.2-0.5	0.3-0.8	0.20-0.50	0.26-0.60
K (%)	2.5-5.0	1.5-3.0	2-5.0	1.7-3.0	1.5-2.5
S (%)	0.15-0.65	0.4	0.15-0.4	0.10-0.60	0.20-0.60
Ca (%)	0.2-1.0	0.21-1.4	0.25-1.6	0.20-1.00	0.2-2.0
Mg (%)	0.14-1.0	0.16-1.0	0.3-0.8	0.15-1.00	0.25-1.00
B (ppm)	1.5-40	5-20	5-25	4-25	20-60
Cu (ppm)	4.5-15	5-50	5-25	5-25	4-30
Fe (ppm)	30-200	21-200	30-300	11-300	21-350
Mn (ppm)	20-150	16-200	20-160	15-200	20-100
Mo (ppm)	0.1-2.0	0.4-5.0	0.1-2.0	0.15-0.20	0.5-1.0
Zn (ppm)	18-70	20-70	20-50	15-100	15-80

que se usan razones o cocientes, el efecto de dilución por el crecimiento de la materia seca tiene menor efecto en la interpretación y la época de muestreo puede ser más flexible (Sumner, 1977).

En un comienzo se sugirió que las normas DRIS establecidas en una localidad geográfica podrían aplicarse en otras regiones. Sin embargo, el resultado de numerosas investigaciones en maíz, trigo, soja, alfalfa y papa han indicado que las normas desarrolladas local o regionalmente producen resultados más precisos en el diagnóstico de deficiencias (Munson y Nelson, 1990; Jones, 1993). Aunque muchos investigadores han demostrado que DRIS produce diagnósticos más precisos de deficiencias de elementos nutritivos que los procedimientos convencionales, la complejidad de la metodología ha limitado su uso. Se han propuesto varias modificaciones a la metodología que pueden simplificar su uso e interpretación. Algunas de estas modificaciones incluyen cálculos simplificados de funciones intermedias, modificación de la selección de parámetros, y un criterio modificado para predecir la respuesta a la aplicación adicional de fertilizantes (IPNI, 2013).

Parcelas de omisión

En caso que no sea posible realizar análisis de suelo o de plantas, se puede estimar la capacidad del suelo de suministrar nutrientes utilizando la técnica del elemento faltante. Esto se hace utilizando parcelas pequeñas o franjas en las cuales cada uno de los nutrientes evaluados se omite en una parcela pero todos los demás nutrientes se aplican en niveles adecuados. Por otra parte, una parcela recibe todos los nutrientes y otra parcela se deja sin aplicación alguna. Si no se observa disminución de rendimiento cuando se omite un nutriente comparado con la parcela con "todos los nutrientes", se asume que el suelo está suministrando niveles adecuados del nutriente omitido (IPNI, 2013).

Diferenciación de ambientes productivos

Las tecnologías de agricultura de precisión han comenzado a utilizarse con creciente intensidad por parte de los agricultores. La incorporación de equipamientos como el GPS, monitores de rendimiento, sensores remotos y computadoras de a bordo, entre otros, genera gran cantidad de información para procesar. Esto produjo la emergencia de grupos de trabajo que han desarrollado servicios de análisis de información y brindan asesoramiento en el uso de las nuevas tecnologías, en especial aquellas destinadas a la definición de ambientes productivos (Fridgen et al, 2004; Khosla et al., 2010). Ahora bien, la diferenciación de zonas de manejo a escalas cada vez más detalladas es una herramienta de gran valor, pero su capacidad de optimizar los sistemas

de producción es, indefectiblemente, dependiente de la calidad de la información utilizada y generada. Partiendo de esta base, el proceso de ambientación de un establecimiento o lote se basa en cuatro etapas (Bermúdez, 2011):

1) **Planteo de hipótesis donde existen diferentes ambientes productivos.** Esta etapa se realiza en gabinete y el objetivo es hacer una delimitación y creación de un mapa preliminar de los posibles ambientes productivos. Éste se construye mediante la integración y gestión de información geo-referenciada disponible, tal como mapas de rendimiento, topografía, conductividad eléctrica, cartas de suelo, altimetría, imágenes satelitales, mapa de profundidad de tosca, profundidad de la napa, imágenes de índice verde, etc. Cabe aclarar que las capas de información utilizadas para ambientar un campo en una determinada zona geográfica pueden ser (y de hecho lo son) distintas para ambientar otros campos con distinta ubicación geográfica ya que no toda la variabilidad se explica y distribuye de la misma manera.

2) **Validación a campo.** Se caracterizan las variables según la definición de ambientes que corresponda para esa zona, mediante muestreos de suelo dirigidos y ubicando puntos al azar dentro del ambiente. También se ajustan los límites determinados en la etapa 1.

3) **Obtención del mapa definitivo de ambientes.** Con la información obtenida de los muestreos y caracterizaciones realizadas a campo se rectifican, en caso de ser necesario, los límites o la clasificación asignada para esa área.

4) **Retro-alimentación.** A medida que se aumenta el número de campañas de cultivos para un determinado lote y con la acumulación de nuevas capas de información (nuevos mapas de rendimientos) se realimenta el mapa de ambientes aumentando la precisión en la información obtenida.

Una vez definidos los ambientes de un lote o campo, la decisión de manejo diferencial para cada uno puede tener diferentes alternativas en función de los objetivos perseguidos o limitantes emergentes (**Figura 5**). La aplicación de dosis variable, resulta en esta instancia

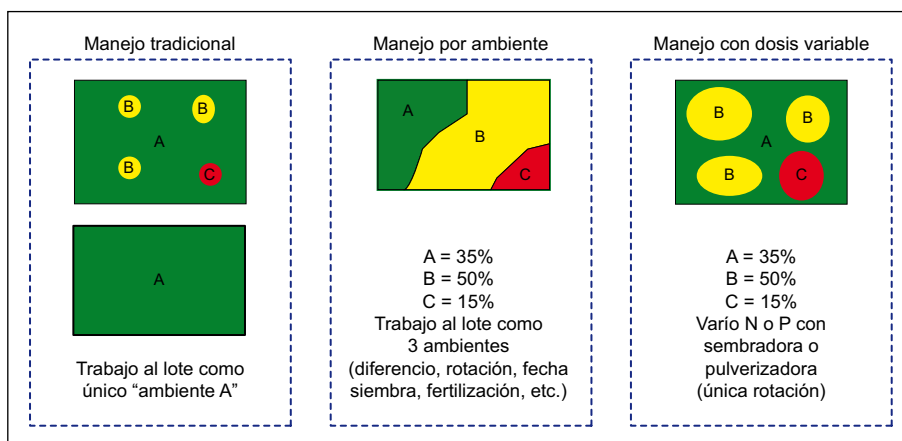


Figura 5. Diferentes alternativas de manejo dentro de un lote. Bermúdez (2011).

una oportunidad de mejorar la eficiencia en el uso del fertilizante, evitando tanto zonas de consumo de lujo como de deficiencia de nutrientes, ya sea por sobre o sub-estimación de las necesidades de los cultivos. Usando de ejemplo el P, la confección de un mapa de prescripción de fertilización podría realizarse a partir de mapas de rendimiento (esperado -ex ante-, logrado -ex post-) afectados por el contenido de P en el producto de cosecha (medido o estimado), si se trabaja bajo una estrategia de reposición. Si la estrategia es de construir y mantener, se hace necesario superponer a la anterior, una capa con las necesidades estimadas de fertilización para incrementar el análisis de suelo a un nivel objetivo.

La investigación, experimentación y adopción del manejo por ambientes esta en pleno desarrollo y se recomienda al lector consultar los trabajos locales recientes (Peralta y Costa, 2013; Peralta et al., 2013 a y b, 2015; Vázquez Amabile et al., 2013; Esposito, 2014; Cicore et al., 2015; Córdoba et al., 2016)

Sensores locales y remotos

Los sensores locales como el SPAD 502 permiten diagnosticar deficiencia de N y otros nutrientes y su utilidad ha sido verificada en distintos cultivos y condiciones (Sainz Rozas y Echeverría, 1998; Bergh et al., 2003; Gandrup et al., 2004; Pagani y Echeverría, 2012; Reussi Calvo et al., 2015; Diovisalvi et al., 2016; Divito et al., 2016).

Los sensores remotos sigue evolucionando como una valiosa herramienta agronómica que proporciona información a los científicos, consultores y productores acerca del estado de sus cultivos (Hatfield et al., 2008). El manejo variable basado en técnicas de este tipo puede ser una alternativa complementaria para mejorar la eficiencia de uso de N en modelos de producción de alta tecnología (Melchiori, 2010; Reussi Calvo et al., 2015). Numerosos antecedentes reportan la posibilidad de detectar deficiencias de N en los cultivos a partir de métodos basados en el uso de sensores remotos que miden la reflectancia del canopeo (Scharf et al., 2002; Shanahan et al., 2008; Holland y Schepers, 2010; Melchiori, 2011).

Los resultados de las experiencias en trigo y maíz conducidas hasta el presente en Argentina han permitido validar procedimientos, verificar relaciones y obtener modelos predictivos del rendimiento (Figura 6). La respuesta a la fertilización tardía sería factible en trigo y maíz, y si bien los rangos de respuesta medios serían similares para estrategias de aplicación con dosis uniformes, comparado con esquemas que incorporan re-fertilización variable basada en el uso de sensores remotos, las dosis totales podrían reducirse, mejorando la eficiencia de uso del nutriente. Aunque los resultados son alentadores, persisten dudas acerca de la posibilidad de generalizar modelos de recomendación y, por otra parte, tanto la complejidad de la técnica como el costo de equipamientos específicos, limitan la tasa de adopción de la tecnología (Melchiori, 2012).

Modelos de simulación

En un contexto de avance vertiginoso de la informática y la accesibilidad a la tecnología de la comunicación, los modelos de simulación se sitúan dentro de un paquete de herramientas que nos facilitan los procesos de aprendizaje y toma de decisiones (Passioura, 1996). Su matriz consta de modelos matemáticos que representan, de una manera simplificada, las relaciones entre partes de un sistema dado, y que son capaces de reproducir el funcionamiento del mismo.

El software disponible varía desde instrumentos enfocados sólo en una práctica o decisión hasta verdaderos sistemas de apoyo para la toma de decisiones que integran varios aspectos del manejo de cultivos (fecha de siembra, ciclos de cultivo, fertilización, protección, etc.). Por ejemplo, en Argentina existe una amplia utilización de CERES Trigo y Maíz, CROPGRO Soja, y OILCROP Girasol, todos ellos dentro de la carcasa DSSAT, que permite armar sus bases de datos con información básica normalmente disponible y simular los efectos de muchas de las tecnologías de manejo con mayor impacto en el rendimiento, contemplando la simulación diaria de la dinámica del agua, y los efectos de distintos ambientes edáficos, modificando el crecimiento de los cultivos y la dinámica del N en el suelo (Mercau, 2010).

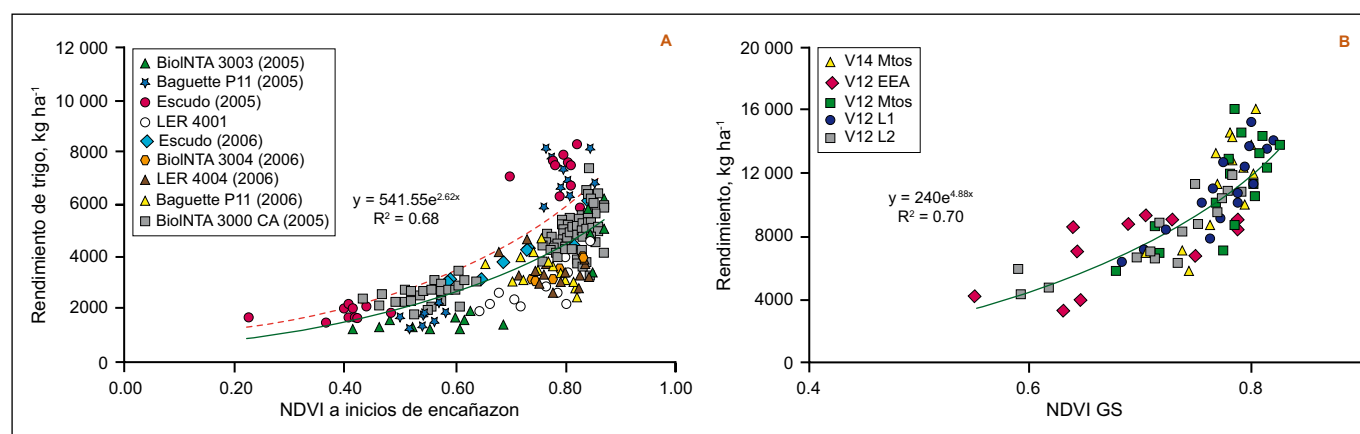


Figura 6. Predicción del rendimiento para trigo (izquierda) y maíz (derecha) en Paraná (Argentina) a partir del índice normalizado de diferencias de vegetación (NDVI) utilizando sensores remotos. Adaptado de Melchiori (2012).

Muchos sistemas e instrumentos de apoyo para la toma de decisiones están disponibles alrededor del mundo para sistemas de cultivo específicos, como por ejemplo:

i) **Nutrient Expert for Hybrid Maize.** (<http://seap.ipni.net/articles/SEAP0059-EN>).

ii) **Fertilizer Chooser.** (<http://seap.ipni.net/articles/SEAP0008-EN>); Seed Placed Fertilizer Decision Aid (<http://www.ipni.net/article/IPNI-3268>), entre otros.

Todos ellos tienen un gran potencial para mejorar las recomendaciones para la fuente, dosis, momento, y lugar de las aplicaciones de nutrientes. Quienes desarrollan estos sistemas necesitan asegurarse que atiendan todos los aspectos del manejo de nutrientes para las regiones de cultivos en las cuales serán utilizados (IPNI, 2013). En el ámbito local, contamos con algunas plataformas muy útiles que sirven de apoyo para la toma de decisiones:

iii) **Triguero, Maicero y Sojero.** Plataformas desarrolladas para los cultivos de trigo, maíz y soja, en base a modelos CERES y CROPGRO, por AACREA (Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola) y FAUBA (Facultad de Agronomía, UBA) para un gran número de localidades en la región pampeana argentina (<http://www.aacrea.org.ar/index.php/software/123-triguero>). La base de su funcionamiento consiste en la combinación de escenarios de cultivo, suelo, recarga hídrica, registros climáticos, y disponibilidad de N (en trigo y maíz), para simular el rendimiento. Los resultados se sintetizan en curvas de respuesta del rendimiento, promedio histórico y diferentes percentiles, a un determinado nivel de N disponible. Bajo este enfoque, se facilita el acceso de los productores a curvas de respuestas simuladas de una importante cobertura de ambientes y estrategias de manejo (Satorre et al., 2005; 2006).

Consideraciones finales

El desarrollo y adopción de determinadas metodologías de diagnóstico nutricional se encuentran estrechamente relacionados a las condiciones específicas de cada sistema de producción. El análisis de suelos es la herramienta más comúnmente utilizada con fines de diagnóstico, pero en determinadas situaciones es necesario complementarlo o utilizar otras alternativas. Las tecnologías actuales de imágenes satelitales, mapas de rendimiento, mapas de suelos y topográficos, son de gran utilidad para lograr una mejor definición de ambientes contrastantes. Obviamente, los costos y recursos que involucran el desarrollo e implementación de cada una de estas tecnologías pueden ser una limitante.

Por otro lado, más allá de contar con alternativas sofisticadas, no debemos perder el enfoque de un punto esencial: “Conocer la realidad con la que trabajamos”. En la medida que la información generada por una metodología es representativa de lo que realmente sucede con nuestros suelos y cultivos, a nivel productivo permite mejorar los diagnósticos y recomendaciones de nutrientes en términos de fuente, dosis, momento y forma de aplicación, con los consecuentes efectos positivos sobre los niveles superiores del sistema: ambiental, económico y social.

Bibliografía

- Álvarez, R., F. Gutiérrez Boem, y G. Rubio. 2005. Recomendación de fertilización. En R. Álvarez (Coord.). Fertilización de Cultivos de Granos y Pasturas. Diagnóstico y Recomendación en la región pampeana. Ed. Facultad de Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina. pp. 37-51.
- Álvarez, R., H. Steinbach, C. Álvarez, y S. Grigera. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas* 18:14-19. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Barbagelata, P.A. 2011. Fertilización fosfatada para trigo y maíz en siembra directa: diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización. En: García F.O. y A.A. Correndo (Coords.). *Actas del Simposio Fertilidad 2011: “La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción”*, 18-19 de Mayo de 2011, Rosario, Santa Fe, Argentina: 90-97.
- Barbieri, P.A., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas. 2008. Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. *Actas CD XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Luis. AACs.
- Bates, T.E. 1971. Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: A review. *Soil Science* 112:116-129.
- Berardo, A., y F. Grattone. 2000. Fertilización fosfatada requerida para alcanzar niveles objetivos de P-Bray en un argiudol. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, AACs. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Bergh R., M. Zamora, M. Seghezzo y E. Molfese. 2003. Fertilización Nitrogenada Foliar en Trigo en el Centro-sur de la Provincia de Buenos Aires. *Informaciones Agronómicas* 19:15-21. INPOFOS Cono Sur.
- Bermúdez, M. 2011. Cómo llevar a la práctica en gran escala el manejo sitio-específico de N y P. : 47-54. En: F.O. García y A.A. Correndo, (Eds.). *Actas Simposio Fertilidad 2011 : La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de Producción*. 18-19 de Mayo de 2011, Rosario, Argentina. IPNI Cono Sur y Fertilizar A.C. 276 p.
- Blackmer, A.M., y A.P. Mallarino. 1996. Cornstalk testing to evaluate nitrogen management. Publ. PM-1584. Department of Agronomy, Iowa State University, Ames, Iowa, USA. Disponible en: <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1584.pdf>
- Brown, J. 1987. Soil Testing: Sampling, correlation, calibration and interpretation. *SSSA Spec. Pub.* 21. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 144 p.
- Bruuselma ,T., C. Witt, F. Garcia, S. Li, T. N. Rao, F. Chen, y S. Ivanova. 2008. A Global Framework for Fertilizer BMPs. *Better Crops* 92(2):13-15. IPNI. Norcross, EE.UU.
- Carciocchi, W.D., G.A. Divito, N.I. Reussi Calvo, y H.E. Echeverría. 2015. ¿Qué sabemos del diagnóstico de azufre en los cultivos de la región pampeana argentina? Simposio Fertilidad 2015: Nutriendo los suelos para las generaciones del futuro. 18-19 de Mayo de 2015. Rosario, Santa Fe, Argentina. IPNI Cono Sur y Fertilizar AC: 125-132.
- Campbell, C.R. 2000. Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. N.C. Department of Agriculture and Consumer Services. Disponible en: <http://www.ncagr.gov/agronomi/saaesd/s394.htm>
- Campbell, C.R., y C.O. Plank. 2000a. Foundation for practical application of plant analysis. N.C. Department of Agriculture and Consumer Services. Disponible en: <http://www.ncagr.gov/agronomi/saaesd/sect1.htm#sect1d>
- Carretero, R., P.A. Marasas, E. Souza, y A. Rocha. 2016. Conceptos de utilidad para un correcto muestreo de suelos. *Archivo Agronómico* No. 15. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* No. 21. IPNI Cono Sur. Buenos Aires. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1256>.
- Cicore, P., H. Sánchez, N. Peralta, M. Castro-Franco, V. Aparicio, y J.L. Costa. 2015. Delimitación de ambientes edáficos en suelos de la pampa deprimida mediante La conductividad eléctrica aparente y la elevación. *Cienc. Suelo* 33(2):229-237.

- Córdoba, M., C. Bruno, J.L. Costa, N. Peralta, y M. Balzarini. 2016. Protocol for multivariate homogeneous zone delineation in precision agriculture. *Biosystems Engineering*. 143:95-107.
- Correndo, A.A. 2016. Revisión de la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. IV Taller de avances de líneas de investigación del ámbito público-privado en los cultivos de soja y maíz. 3 y 4 de Marzo de 2016. UI INTA-FCA Balcarce, UNMdP, Balcarce, Buenos Aires.
- Correndo, A.A., F. Salvagiotti, F.O. García, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2017. A modification of the arcsine-log calibration curve for analysing soil test value-relative yield relationships. *Crop & Pasture Science* 68 (3): 297-304. <https://doi.org/10.1071/CP16444>
- Correndo, A.A., y F.O. García. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. *Archivo Agronómico No. 14. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica No. 5. IPNI Cono Sur. Buenos Aires. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1155>*
- Correndo, A.A., y F.O. García. 2016. Trigo 2016. Pautas para el manejo nutricional del cultivo. IPNI Cono Sur. Disponible en: <http://Lacs.ipni.net>
- Cosentino, D., D. Russi, F. García, M. Taboada, D. Carreira, C. Puglisi, L. Castro, L. Santinoni, y M. García. 2011. Primeros resultados del Programa Nacional de Interlaboratorios de Suelos Agropecuarios: 151-154. En: F.O. García y A.A. Correndo, (Eds.). *Actas Simposio Fertilidad 2011: La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de Producción*. 18-19 de Mayo de 2011, Rosario, Argentina. IPNI Cono Sur y Fertilizar A.C. 276 p.
- Diovisalvi, N., N. Reussi Calvo, G. Divito, N. Izquierdo, H.E. Echeverría, y F. García. 2016. Can We Improve Nitrogen Management for Sunflower? *Better Crops* 100(2):10-12.
- Divito, G., H. Echeverría, F. Andrade y V. Sadaras. 2016. Diagnóstico del estatus azufrado del cultivo de soja: Utilidad de la determinación de S y N:S en hoja, planta y grano. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 22:2-8.
- Espósito, G. 2014. Agricultura según ambientes: Herramientas para su implementación. X Congreso Nacional de maíz. Resúmenes de Conferencias. Rosario (Santa Fe, Argentina): 27-28.
- Ferrari, M., H. Castellarán, H.R. Saiz Rozas, H.S. Vivas, R.J.M. Melchiori, y V. Gudelj. 2010. Evaluación de métodos de diagnóstico de fertilidad nitrogenada para el cultivo de trigo en la región pampeana. *Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. El Suelo: pilar de la agroindustria en la pampa argentina*, Rosario, Santa Fe, AACs. Cd-rom.
- Ferraris, G., F. Salvagiotti, P. Prystupa, y F. Gutiérrez Boem. 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. *Actas CD XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. AACs.*
- Fixen, P. 2005. Decision support systems in integrated crop nutrient management. *Proceedings* 569. The International Fertiliser Society. YORK, UNITED KINGDOM. 32 p.
- Fixen, P.E., y J. Grove. 1990. Testing soils for phosphorus. pp. 141-180. In: R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis*. 3a. edición. SSSA Book Number 3. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Fridgen, J.J., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, S.T. Drummond, W.J. Wiebold, y C.W. Fraisse. 2004. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agron. J.* 96:100-108.
- Gandrup, M.E., F.O. García, K.P. Fabrizzi, y H.E. Echeverría. 2004. Evolución de un índice de verdor en hoja para evaluar el status nitrogenado en trigo. *RIA* 33(3):105-121.
- García, F.O. e I.A. Ciampitti. 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: El enfoque tradicional. *Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Argentina. AACs. Cd-rom.
- García, F.O., L.I. Picone, y A. Berardo. 2005. Capítulo 5: Fósforo. En: *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Echeverría H.E. y García F.O. (Eds.). 99-121. INTA.
- García, F.O., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I.A. Ciampitti, A.A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N. 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. AACREA. 64 p.
- González Montaner, J., G. Maddonni, N. Mailland, y M. Porsborg. 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de decisión para la Subregión IV (Sudeste de la Provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo* 9(1-2):41-51.
- González, M., M. López, G. Moreno, R. Comese, y M. Madero. 2007. Comparación de los métodos de Bray & Kurtz nº I y Mehlich III en la determinación de la disponibilidad de fósforo en suelos con fertilizaciones continuas. *Ci. Suelo* 25(1):23-29.
- Gutiérrez Boem, F., G. Rubio, y R. Álvarez. 2005. Diagnóstico de la disponibilidad de nutrientes. En R. Álvarez (Coord.). *Fertilización de Cultivos de Granos y Pasturas. Diagnóstico y Recomendación en la región pampeana*. Ed. Facultad de Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina. pp. 27-36.
- Hatfield, J.L., A.A. Gitelson, J.S. Schepers, y C.L. Walthall. 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal* 100:117-131.
- Havlin, J., J. Beaton, S. Tisdale, y W. Nelson. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers*. Pearson Education Inc. Upper Saddle River, New Jersey, EE.UU. 7a. edición. 515 p.
- Holland, K.H., y J.S. Schepers. 2010. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. *Agronomy Journal* 102:1415-1424.
- Hoogenboom, G., J.W. Jones, C.H. Porter, P.W. Wilkens, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, y G.Y. Tsuji. (Eds). 2003. *Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0*. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, EE.UU.
- IPNI. 2013. 4R - Manual de Nutrición de Plantas: Un Manual Para Mejorar el Manejo de la Nutrición de Plantas. T.W. Bruulsema, P.E. Fixen, G.D. Sulewski, (eds.). 1ra Edición Acassuso. International Plant Nutrition Institute. 140 p.
- Janssen, B.H., F.C.T. Guiking, D. van der Eijk, E.M.A. Smaling, J. Wolf, y H. van Reuler. 1990. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46:299-318.
- Jones, Jr. J.B. 1998. *Plant Nutrition Manual*. CRC Press. Boca Raton. Florida. USA. 149 p.
- Jones, Jr. J.B. 1993. Modern interpretation systems for soil and plant analyses in the United States of America. *Australian Journal of Experimental. Agriculture*. 33(8):1039-1043.
- Khosla, R., Westfall, D.G., Reich, R.M., Mahal, J.S., & Gangloff, W.J. 2010. Spatial variation and site-specific management zones. In O. Margaret (Ed.), *Geostatistical applications in precision agriculture* (pp. 195-219). New York: Springer.
- Leikam, D., R. Lamond, y D. Mengel. 2003. *Soil Test Interpretations and Fertilizer Recommendations*. Department of Agronomy, Kansas State University. MF-2586. Manhattan, Kansas, EE.UU. Disponible en <http://www.agronomy.ksu.edu/SOILTESTING/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1813>
- MAGyP. 2010. Disponible en http://www.minagri.gov.ar/SAGPyA/agricultura/agua_y_suelos/01=SAMLA/01-institucional/index.php?PHPSESSID=e154f48eff5ec48f024a537531c6acc5
- Mallarino, A.P. 2012. Nutrient management for increased crop productivity and reduced environmental impacts. *Actas XIX Congreso Latinoamericano - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: "Latinoamérica unida protegiendo a sus suelos"*. 16-20 de Abril de 2012. Mar del Plata, Argentina. AACs-SLCS. Cd-rom.
- Mallarino, A.P., y A.M. Blackmer 1992. Comparison of Methods for Determining Critical Concentrations of Soil Test Phosphorus for Corn. *Agron. J.* 84:850-856.
- Marban, L., y S. Ratto. (Eds.). 2005. *Tecnologías en análisis de suelos*. AACs. Buenos Aires. 215p.

- Melchiori, R.J.M. 2007. Estado actual del manejo sitio específico de nitrógeno en Argentina. En: F. García e I. Ciampitti (ed.). Actas Simposio "Fertilidad 2007". IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Melchiori, R.J.M. 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: una mirada desde el cultivo para el manejo de nitrógeno. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Argentina. AACs. Cd-rom.
- Melchiori, R.J.M. 2012. Fertilización variable con N: herramientas, criterios y recomendaciones. 19th ISTRO Conference – IV SUCS Meeting. Striving for Sustainable High Productivity. 24-28 Septiembre 2012. Montevideo, Uruguay.
- Melchiori, R.J.M., O.P. Papparotti, y P.A. Barbagelata. 2002. Fertilización fosfatada en soja: validación del nivel crítico. INTA EEA Paraná. En: www.parana.inta.gov.ar
- Melgar, R., G. Vitti, y V. de Melo Benites. 2011. Fertilizando para altos rendimientos. Soja en Latinoamérica. IIP Boletín No. 20. 179 p.
- Mercau, J. 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: una mirada con lentes de modelos funcionales de cultivo. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Argentina. AACs. Cd-rom.
- Munson, R.D. and W.L. Nelson. 1990. Ch. 14 In, Soil Testing and Plant Analysis, 3rd ed. SSSA Book Series, No. 3.
- Munson, R.D., y W.L. Nelson. 1986. Principles and Practices in Plant Analysis. En: Walsh L.M. y J.D. Beaton (Eds.). Soil Testing and Plant Analysis. 6th Ed. SSSAJ. Madison, Wisconsin, USA: 223-248.
- Pagani, A., y H.E. Echeverría. 2012. Influence of sulfur deficiency on chlorophyll-meter readings of corn leaves J. Plant Nutr. Soil Sci. 175:604-613.
- Passioura, J.B. 1996. Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? Agronomy Journal 88:690-694.
- Peck, T., J. Cope, y D. Whitney. 1977. Soil Testing: Correlating and interpreting the analytical results. ASA Spec. Pub. 29. ASA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 117p.
- Peralta, N.R., & J.L. Costa. 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. Comp. Electron. Agric. 99:218-226.
- Peralta, N.R., J.L. Costa, M. Balzarini, & H. Angelini. 2013a. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. Can. J. Soil Sci. 93:205-218.
- Peralta, N.R., J.L. Costa, M. Balzarini, & M. Castro Franco. 2013b. Delineation of management zones with digital elevation models and soil depth. Interciencia 38:418-424.
- Peralta, N.R., J.L. Costa, M. Balzarini, M. Castro Franco, M. Cordoba, & D. Bullock. 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. Comp. Electron. Agric. 110:103-113.
- Reussi Calvo, N., y H. Echeverría. 2009. Azufre: Marco conceptual para definir las mejores prácticas de manejo en los cultivos. En F. García e I. Ciampitti (ed.). Simposio Fertilidad 2009: Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. pp. 52-59.
- Reussi Calvo, N., H. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, A. Berardo, y N. Diovisalvi. 2013a. ¿Contribuye el Nan a mejorar el diagnóstico de nitrógeno en maíz? En F. García y A. Correndo (ed.). Simposio Fertilidad 2013: Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable. 22-23 de Mayo de 2013. Rosario. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. pp. 269-272.
- Reussi Calvo, N., H. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, A. Berardo, y N. Diovisalvi. 2013b. ¿Cómo ajustamos la dosis de nitrógeno durante el ciclo de trigo?. En F. García y A. Correndo (ed.). Simposio Fertilidad 2013: Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable. 22-23 de Mayo de 2013. Rosario. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. pp. 273-280.
- Reussi Calvo, N., H. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, y N. Diovisalvi. 2015. Using Canopy Indices to Quantify the Economic Optimum Nitrogen Rate in Spring Wheat. Agron. J. 107:459-465.
- Rice, C., y J. Havlin. 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. In J. Havlin y J. Jacobsen (ed.). Soil tesying: Prospects for improving nutrient recommendations. SSSA Spec. Pub. 40. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. pp.1-13.
- Ruiz, R., E. Satorre, G. Maddoni, J. Carcova, y M. Otegui. 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- Sainz Rozas, H.R., y H.E. Echeverría. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. Rev. Fac. Agron. La Plata. 103 (1):37-44.
- Sainz Rozas, H., H. Echeverría, G. Studdert, y G. Domínguez. 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. Agron. J.92:1176-1183.
- Sainz Rozas, H., P. Calviño, H. Echeverría, M. Redolatti, y P. Barbieri. 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to reliability of planting or presidedress soil nitrogen test in maize. Agronomy Journal 100:1020-1025.
- Satorre, E., F. Menéndez, y G. Tinghitella. 2005. El modelo Triguero: Recomendaciones de fertilización nitrogenada en trigo. Simposio "Fertilidad 2005: Nutrición, Producción y Ambiente". Rosario, 27-28 Abril. INPOFOS Cono Sur-Fertilizar A.C. pp.3-11.
- Satorre, E.H., J.R. Micheloud, J. Belligoi, y J.L. Cavasassi. 2006. MAICERO: Nuevos Criterios para el Diagnóstico y Manejo de la Fertilización del Cultivo de Maíz en Argentina. Convenio AACREA y PROFERTIL S.A., software de aplicación agronómica.
- Scharf, J.C., J.P. Schmidt, N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, S.Y. Jong, J.A. Lory, y J.G. Davis. 2002. Remote sensing for nitrogen management. Journal of Soil and Water Conservation. Nov-Dec 2002:518-524.
- Shanahan, J.F., N.R. Kitchen, W.R. Raun, y J.S. Schepers. 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals, computers and electronics in agriculture 6 1:51-62.
- Sims, J.T. 2000. Soil fertility evaluation. En M.E. Sumner (ed.). Handbook of Soil Science. CRC Press. Boca Raton, FL. pp. 113-153.
- Sumner, M.E. 1977. Applications of Beauflis diagnostic indices to maize data published in the literature irrespective of age and conditions. Plant Soil 46:359-369.
- Vázquez Amabile G., M. Gonzalo, M. Pella, G. Cueto y S.Galbusera. 2013. Nutrición y agricultura por ambientes: Avances en el sur de Buenos Aires. Simposio Fertilidad 2013. IPNI-Fertilizar AC. pp. 104-111.
- Walsh, L., y J. Beaton. 1973. Soil Testing and Plant Analysis. Revised edition. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 491 p.
- Zamuner, E., L. Picone, y H. Echeverría. 2004. Comparación de métodos de extracción de fósforo disponible Bray 1 sobre la respuesta de la fertilización fosfatada en trigo. Ciencia del Suelo 22(2):57-63.

Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos (Argentina)

Juan M. Pautasso^{1*} y Pedro A. Barbagelata²

- En Entre Ríos se cultivan alrededor de 270 mil hectáreas de pasturas base alfalfa.
- La baja disponibilidad de fósforo (P) en suelo es una de las limitantes principales para poder maximizar la producción de pasturas en la provincia.
- El presente trabajo pretende recalibrar, para Entre Ríos, el umbral de P-Bray para el cultivo de alfalfa sobre suelos Molisoles.

Introducción

En Entre Ríos se cultivan alrededor de 270 mil hectáreas de pasturas base alfalfa (INDEC, 2002), siendo uno de los recursos forrajeros de menor costo por kilogramo de materia seca cuando se logran buenos niveles de producción (Centeno et al., 2016).

En la provincia de Entre Ríos, la baja disponibilidad de fósforo (P) es una de las limitantes principales para poder maximizar la producción de pasturas (Quintero, 2000; García et al., 2002). Si bien la fertilización fosfatada en pasturas es la tecnología conceptualmente más reconocida, la correcta aplicación de esta tecnología ha sido casi irrelevante (Agnusdei, 2012).

La respuesta al agregado de P depende de la disponibilidad de este nutriente en el suelo, medida en Argentina a través del P extractable Bray-1 (P Bray). Con este índice de disponibilidad de P se han desarrollado métodos de diagnóstico de fertilidad fosfatada en pasturas que señalan un nivel umbral o rango crítico de P Bray del suelo por debajo del cual existe una alta probabilidad de respuesta a la fertilización, en tanto por encima del mismo la probabilidad de respuesta es baja.

El muestreo de suelos es el primero de una serie de pasos dentro del proceso que lleva a la recomendación de fertilización. La utilidad del valor obtenido en el laboratorio dependerá de cuán representativa sea la muestra del lote a implantar y, además, que el procedimiento involucrado sea similar al realizado en el estudio que definió el umbral o nivel crítico, como la profundidad de muestreo y momento del año, entre otros puntos críticos (Carretero et al., 2016)

Para la provincia de Entre Ríos, Quintero et al. (1995) definieron un modelo continuo para recomendar la fertilización fosfatada en pasturas. Los autores establecieron clases de fertilidad muy baja (MB), baja (B), media (M), alta (A) y muy alta (MA). Los límites de clases propuestos son 4.9, 10.2, 14.9 y 23.1 mg kg⁻¹ de P Bray que corresponden a los niveles de rendimiento relativo del 50%, 70%, 80% y 90% del máximo. Estos autores usaron muestreos de suelos a una profundidad

de 0-10 cm. En el resto de la Pampa Húmeda se estima un umbral para alfalfa de alrededor de 25 mg kg⁻¹ de P Bray, tomando una profundidad de muestreo de 0-20 cm (Díaz Zorita y Gambaudo, 2007; Rubio et al., 2013).

El objetivo del presente trabajo fue validar para Entre Ríos, el umbral de P Bray para el cultivo de alfalfa a partir de la información de ensayos de fertilización fosfatada realizados sobre suelos Molisoles.

Materiales y métodos

Los datos corresponden a muestreos de ensayos de fertilización fosfatada en pasturas de alfalfa diseñados en bloques completos al azar con tres repeticiones. Todos los ensayos se realizaron sobre suelos pertenecientes al Orden Molisol. Más detalles de cada ensayo se muestran en la **Tabla 1**.

Las dosis agregadas fueron 0 y 60 kg P por hectárea como superfosfato triple de calcio (SFT, 0-20-0), excepto en los ensayos 2 y 3 que fueron de 0 y 20 kg de P ha⁻¹. El análisis de suelos se realizó antes de la aplicación del fertilizante químico, previo al momento de la siembra. El análisis se repitió al año de la implantación de las pasturas (sólo se mostrarán datos de dos ensayos con P Bray contrastante). La profundidad de muestreo fue de 0-20 cm.

Para medir la producción de materia seca (MS) por tratamiento y por corte, antes del aprovechamiento que realizó el productor, se cortó una superficie de 0.25 m² por parcela. Luego de pesar las muestras se secaron en estufa a 60 °C durante 48 horas.

Para el cálculo de los umbrales se usó la metodología propuesta por Dyson y Conyers (2013) modificada por Correndo et al. (2017), denominado método del arcoseno-logaritmo (ALCC), que considera variables aleatorias tanto al rendimiento relativo (RR, %) como al valor del análisis de suelo P Bray (mg kg⁻¹, 0-20 cm). El RR se calculó como el cociente porcentual entre el rendimiento del tratamiento sin fertilizar y el rendimiento máximo medio observado. Para poder comparar, con igual método, la información obtenida en el presente trabajo con las recomendaciones existentes en la provincia, se obtuvieron los puntos de

¹ AER INTA Diamante

² EEA INTA Paraná. Entre Ríos, Argentina

* Autor de contacto. Correo electrónico: pautasso.juan@inta.gob.ar

la gráfica de Quintero et al. (1995). Para establecer si las dos series de datos pueden combinarse y representarse como una sola población o dos poblaciones diferentes, se probó un test de F (Mead et al., 1993).

Resultados y discusión

Umbral de P Bray

En la **Figura 1** se muestran las relaciones entre el nivel P Bray del suelo y el rendimiento relativo de alfalfa obtenido en el presente trabajo y por Quintero et al. (1995).

Los modelos obtenidos entre P Bray y RR son estadísticamente diferentes para los datos de Quintero et al. (1995) y los medidos en nuestros ensayos (**Tabla 2**).

La diferencia entre los niveles críticos encontrada entre estos dos sets de datos seguramente se debe a las distintas profundidades de muestreo de suelos utilizadas en ambos estudios. Mientras que para los datos propios se utilizaron muestras a 0-20 cm de profundidad, Quintero et al. (1995) tomaron muestras a 0-10 cm. Teniendo en cuenta la reconocida estratificación del P en

Tabla 1. Características generales de los ensayos de respuesta a fósforo en pasturas realizados en Entre Ríos entre 2013 y 2016.

Ensayos	Latitud	Longitud	Año implantación	Cortes medidos	P Bray mg kg ⁻¹ , 0-20 cm
1	31°59'56.87"S	60°23'25.10"O	2013	13	5.3
2	32° 0'12.74"S	60°23'47.64"O	2014	3	90.0
3	32° 0'8.12"S	60°23'53.60"O	2014	3	13.9
4	32°12'4.99"S	60°17'51.09"O	2015	9	4.2
5	31°57'11.15"S	60°26'14.75"O	2015	8	24.1
6	32°12'27.03"S	60°22'28.38"O	2016	2	10.3
7	32° 1'39.20"S	60°32'36.13"O	2016	2	121.3
8	31°57'1.04"S	60°26'18.30"O	2016	2	93.2

Tabla 2. Análisis de la variación del error entre el modelo completo y el combinado y de la significancia de la diferencia entre los dos modelos.

	SCE	GL	CME	Valor F	Valor p
A - Datos propios (0-20 cm)	21.02	40			
B - Quintero et al. (1995) (0-10 cm)	10.65	77			
Modelo Completo (dos modelos)	31.67	117	0.27		
Modelo Combinado (un modelo)	37.84	119			
Diferencia entre Modelos	6.17	2	3.09	11.40	0.00003

SCE: Suma de cuadrados del error del modelo; GL: grados de libertad de la SCE; CME: Cuadrado medio del error del modelo completo y de la diferencia entre modelos.

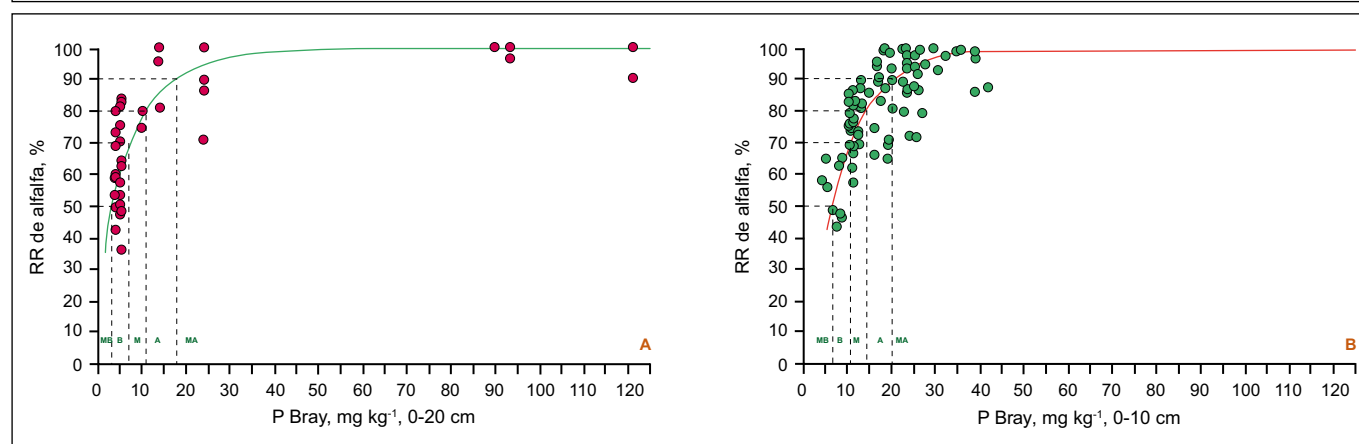


Figura 1. Relación entre el nivel de P Bray en el suelo y el rendimiento relativo (RR) de pasturas de alfalfa: A) Datos propios (n = 42; r = 0.80), cada punto corresponde al promedio de tres repeticiones; B) Datos de Quintero et al. (1995) (n = 79; r = 0.72). Curvas de ajuste (líneas llenas) y clases de fertilidad (líneas punteadas) -muy baja (MB), baja (B), media (M), alta (A) y muy alta (MA)- según el método ALCC modificado.

Tabla 3. Niveles críticos (NC) de P Bray para el cultivo de alfalfa y sus respectivos intervalos de confianza (IC, $\alpha = 0.10$) para las distintas clases de fertilidad estimadas a partir de dos sets de datos: A) Datos propios con muestreo a 0-20 cm (n = 42; r = 0.80), B) Datos de Quintero et al. (1995) con muestreo a 0-10 cm (n = 79; r = 0.72).

P Bray mg kg ⁻¹	RR %	RR %			
		50	70	80	90
A - Datos propios	NC	3.2	6.9	10.6	18.1
	IC _{90%}	(2.4-4.3)	(5.6-8.5)	(8.8-12.8)	(14.8-22.1)
B - Quintero et al. (1995)	NC	6.8	11	14.4	20.2
	IC _{90%}	(5.9-7.8)	(10.0-12.0)	(13.4-15.5)	(18.7-21.7)

Tabla 4. Fósforo extractable (P Bray) y dosis de P para elevar una unidad de P Bray, según tratamiento al inicio y al año de la implantación del cultivo de alfalfa en dos sitios evaluados.

P Bray inicial mg kg ⁻¹	Tratamiento	P Bray al año mg kg ⁻¹	Dosis para elevar 1 mg kg ⁻¹ kg P ha ⁻¹
24.1	Fertilizado	36.4	
	Testigo	22.8	4.4
4.2	Fertilizado	5.9	
	Testigo	3.5	25.0

suelos, es esperable obtener niveles críticos mayores en muestreos de suelo más superficiales. Por otro lado, una posible explicación del menor umbral de P Bray obtenido en nuestro estudio respecto a lo informado para el resto de la Pampa Húmeda es que los Molisoles de Entre Ríos poseen un mayor porcentaje de arcilla en los horizontes superficiales. Melgar et al. (2011) informaron que la respuesta al agregado de P (y por lo tanto el cálculo del umbral) está condicionada por el contenido de arcilla de los suelos.

En la **Tabla 3** se informan los límites de las clases de fertilidad para ambos sets de datos y sus respectivos intervalos de confianza. Excepto para un RR del 90%, los límites ahora definidos son estadísticamente menores.

En la **Tabla 4** se informan los cambios en el P Bray del suelo (0-20 cm) al año de implantación para los tratamientos evaluados en dos sitios con P Bray contrastante con el agregado de 60 kg de P ha⁻¹.

A pesar de tratarse de dos suelos correspondientes al mismo subgrupo (Argiudol ácuico), la dosis necesaria para elevar una parte por millón el P Bray (denominada dosis equivalente), fue muy diferente entre ambos ensayos, requiriendo más cantidad de P para elevar una parte por millón en el suelo con bajo P Bray inicial. Rubio et al. (2008) calcularon el incremento en el P del suelo ante el agregado de fertilizante fosfatado e informan que el P Bray inicial del suelo y el contenido de arcilla del mismo influyen en la determinación de la dosis de P a agregar.

En la **Figura 2** se informan las producciones promedio por corte según los diferentes tratamientos. En un suelo donde la limitante principal fue el P (P Bray = 4.2 mg kg⁻¹),

la fertilización fosfatada incrementó un 70% la producción de MS de alfalfa por corte con respecto al tratamiento sin fertilización, llegando a niveles de producción similares a los logrados en un suelo bien provisto de P (P Bray 24.1 mg kg⁻¹), donde no se observó respuesta a la fertilización fosfatada.

Conclusiones

El umbral o nivel crítico de P Bray estimado para obtener el 90% del RR de alfalfa en Molisoles de Entre Ríos fue inferior (18.1 mg kg⁻¹) a lo informado previamente para la región (23 a 25 mg kg⁻¹). Asimismo, respecto de estudios previos en Entre Ríos, los niveles críticos de las

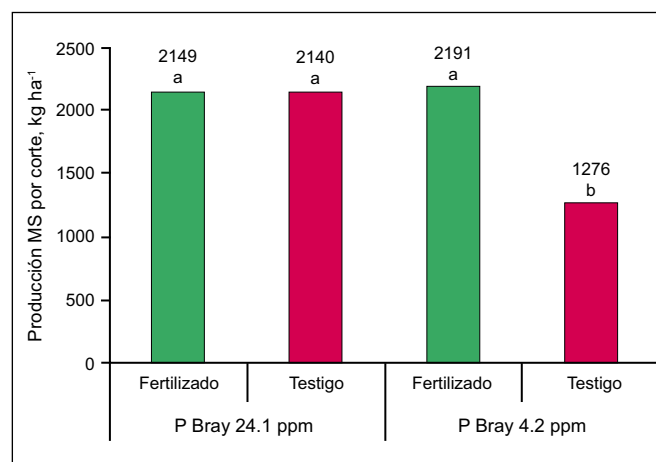


Figura 2. Producción de MS por corte de la pastura de alfalfa en función del agregado de 60 kg P ha⁻¹ para dos situaciones de disponibilidad inicial de P contrastantes. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Test Tukey; p > 0.05).

distintas clases de fertilidad de P Bray también resultaron inferiores en todos los casos. Por un lado, diferente profundidad de muestreo en estudios anteriores, y por otro lado, características inherentes a los suelos de la provincia (contenido y tipo de arcilla) pueden explicar estos resultados.

El P limita fuertemente la producción de alfalfa en la provincia de Entre Ríos. Sin una adecuada provisión de este nutriente mediante fertilización en suelos con bajo P Bray, el cultivo de alfalfa puede rendir la mitad que un cultivo fertilizado o que se siembra en suelos con buena disponibilidad de P.

Es necesario continuar con estos ensayos para incorporar mayor cantidad de datos, explorando rangos intermedios de P Bray para lograr un mejor ajuste de los modelos de fertilización fosfatada para alfalfa en Entre Ríos.

Agradecimientos

A Rubén Isaurralde, Silvestre Cabaña y Javier Kühn por la colaboración en los cortes de las pasturas. A los productores Ricardo Farall, Néstor Lell, Ángel Olivero y Germán Bierig por su predisposición a apoyar las actividades del INTA en sus establecimientos.

Bibliografía

- Agnusdei, M. 2012. Rol de la ecofisiología en el diseño de manejos especializados de pasturas. En Pasturas 2012: hacia una ganadería competitiva y sustentable. Jornada técnica. Síntesis de material de conferencias. Mar del Plata 23 de marzo 2012. pp. 13-28.
- Carretero, C., P. Marasas, E. Souza, y A. Rocha. 2016. Conceptos de utilidad para lograr un correcto muestreo de suelos. Archivo Agronómico N° 15. IPNI. Disponible [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/7712B35AB30A440303257F880046ABB5/\\$FILE/AA%2015.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/7712B35AB30A440303257F880046ABB5/$FILE/AA%2015.pdf) [Verificación: febrero de 2017].
- Centeno, A., I. Esnaola, G. Almada, P. Engler, L. Gastaldi, y M. Suero. 2016. "La alimentación en el tambo y el impacto económico del nuevo escenario". Disponible http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_boletin_lecheria_sustentable_nro1_1.pdf [Verificación: febrero de 2017].
- Correndo, A.A., F. Salvagiotti, y F.O. García, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2017. A modification of the arcsine-log calibration curve for analyzing soil test value–relative yield relationships. *Crop & Pasture Science* 68(3):297-304, doi:10.1071/CP16444.

- Díaz-Zorita, M., y S. Gambaudo. 2007. Capítulo 11: Fertilización y enclado en alfalfa. En *El Cultivo de la Alfalfa en Argentina*. Basigalup (Editor). INTA Manfredi. ISBN 978-987-521-242-8. pp. 227-246. Disponible http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-el_cultivo_de_la_alfalfa_en_la_argentina.pdf [Verificación: febrero de 2017].
- Dyson, C.B., y M.K. Conyers. 2013. Methodology for online biometric analysis of soil test-crop response datasets. *Crop & Pasture Science* 64, 435-441.
- García, F.O., F. Micucci, G. Rubio, M. Ruffo, e I. Deverede. 2002. Fertilización de forrajeras en la región pampeana. Edición INPOFOS. ISBN 987-20486-0-6. 72 p.
- INDEC. 2002. Encuesta Nacional agropecuaria 2002. Ministerio de Economía, obras y servicios públicos. Buenos Aires, Argentina.
- Mead, R., R.N. Curnow, y A.M. Hasted. 1993. Statistical methods in agriculture and experimental biology. Chapman and Hall, London, 415 p.
- Melgar, R., G. Vitti, y V. De Melo Benites. 2011. Fertilizando para altos rendimientos. Soja en Latinoamérica. IIP Boletín No 20. Instituto Internacional de la Potasa. ISBN 978-3-9523243-7-0. DOI 10.3235/978-3-9523243-7-0. 180 p.
- Quintero, C., N. Boschetti, y R. Benavidez. 1995. Fertilización fosfatada de pasturas en implantación en suelos de Entre Ríos. *Ciencia del Suelo* 13:60-65. Disponible http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_13n2/Quintero.pdf [Verificación: febrero de 2017].
- Quintero, C. 2000. Estado de fertilidad de los suelos de Entre Ríos. Principales Limitaciones. En: *Revista Facultad de Agronomía*. UBA, 20:15-19.
- Rubio, G., M.J. Cabello, F.H. Gutiérrez-Boem, y E. Munaro. 2008. Estimating available soil P increases after P additions in Mollisols. *Soil Science Soc. Amer. J.* 72:1721-1727.
- Rubio, G., F. Micucci, y F.O. García. 2013. Capítulo 14: Ciclado de nutrientes y fertilización de pasturas. En *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana*. Editorial Facultad de Agonomía. UBA. ISBN 978-987-27793-7-5. pp. 263-292.

¿Son convenientes los cultivos de cobertura en la región pampeana? Un análisis de la información existente

Roberto Álvarez^{1,2,*}, Haydee S. Steinbach¹ y Josefina L. De Paepe^{1,2}

- *Los cultivos de cobertura invernales son una alternativa al barbecho previo a los cultivos de verano que se está difundiendo en la región pampeana argentina.*
- *Nuestro objetivo fue determinar si los posibles beneficios de estos cultivos compensan su costo de implantación y establecimos que cuando se usa vicia se mejora el rendimiento de maíz.*
- *En otros casos, las mejoras que producen los cultivos de cobertura en los suelos deberán evaluarse a largo plazo para establecer su conveniencia.*

Introducción

Los cultivos de cobertura son una herramienta útil para disminuir la erosión (Langdale et al., 1991) y las pérdidas de N-nitratos (Valkama et al., 2015) en muchos agrosistemas. También pueden actuar como fuente de nitrógeno para los cultivos siguientes introduciendo el nutriente por fijación simbiótica al ecosistema (Li et al., 2015) y ser útiles en el control de malezas (Cherr et al., 2006). Sin embargo, tienen un costo de implantación que puede anular estos beneficios (Snapp et al., 2005). El impacto de los cultivos de cobertura sobre las propiedades físicas del suelo no ha sido aclarado, mientras que son esperables aumentos del nivel de materia orgánica cuando se introducen en la rotación (Poepflau y Don, 2015). En zonas semiáridas y subhúmedas (< 800 mm de precipitación anual), los cultivos de cobertura pueden producir una disminución de la cantidad de agua disponible para los cultivos posteriores (Blanco-Canqui et al., 2015). En consecuencia, es necesario analizar en conjunto los diferentes beneficios e inconvenientes que produce la introducción de cultivos de cobertura en las rotaciones para determinar la conveniencia de su uso.

Para promediar resultados de distintos estudios y poder hacer comparaciones estadísticamente válidas se han desarrollado las técnicas meta-analíticas (Hedges y Olkin, 1985), las que no han sido aplicadas al problema de los cultivos de cobertura a nivel local sino recientemente (Álvarez et al. 2017). Una revisión previa para la región pampeana argentina, usando métodos tradicionales, indicó aumentos del carbono (C) orgánico del suelo por uso de cultivos de cobertura, efectos no claros sobre la humedad del suelo y falta de impacto sobre el rendimiento de maíz y soja (Rimski-Korsakov et al., 2015). Nuestro objetivo es presentar aquí los resultados principales del meta-análisis realizado con información local, relativo a los efectos de los cultivos de cobertura sobre las propiedades físicas, la fertilidad, el contenido de agua útil de los suelos y el rendimiento de los cultivos en la región pampeana argentina.

Materiales y métodos

Se recopilaron resultados publicados de 67 experimentos realizados en la región pampeana (**Figura 1**) en los que se determinó los efectos de los cultivos de cobertura en comparación a suelo en barbecho sobre alguna de las propiedades de interés. Una descripción detallada de las fuentes bibliográficas, las características más relevantes de los experimentos, el sistema de extracción de datos, el procesamiento de las variables y los métodos estadísticos aplicados se pueden encontrar en Álvarez et al. (2017). Brevemente, se seleccionaron experimentos realizados por instituciones oficiales realizados bajo condiciones semejantes a las de producción, en los que se comparaba cultivo de cobertura versus barbecho (sin cultivo de cobertura). La especie del cultivo de cobertura se indicó en todos los casos, así como también el diseño experimental con el número de repeticiones. En algunos casos contactamos a los autores para obtener información adicional. El momento de muestreo respecto del inicio del experimento y la profundidad de las muestras fueron condiciones de selección. Se levantó información de tablas, texto y figuras usando un programa de digitalización. Las variables de interés fueron: densidad aparente del suelo,

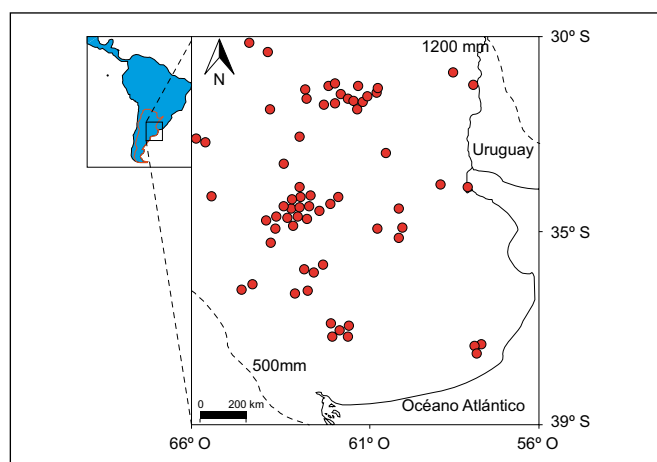


Figura 1. Ubicación de los experimentos analizados. Se indican con línea punteada las isohietas de 1200 y 500 mm. Se han movido levemente algunos puntos para evitar superposiciones.

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires, Argentina

² CONICET

* Autor de contacto. Correo electrónico: ralvarez@agro.uba.ar

resistencia a la penetración, estabilidad estructural, infiltración, C orgánico, N-nitrato, contenido de agua útil y rendimiento de maíz y soja. Las características climáticas de cada sitio experimental se obtuvieron de una base de datos elaborada previamente (De Paepe y Álvarez, 2016). Solo un sitio tenía precipitaciones medias menores a 700 mm anuales, en el resto de los casos estas variaban entre 800 y 1000 mm. La duración de los experimentos varió entre 1 y 15 años y en todos los casos tenían entre 3 y 4 repeticiones. Los cultivos de cobertura más comúnmente testeados fueron: centeno, avena, triticale, raigrás, avena y cebadilla. La leguminosa más testeada fue Vicia sp.

El meta-análisis se realizó ponderando cada promedio extraído de las publicaciones por su número de repeticiones para el cálculo de un promedio general a través de todos los estudios (Adams et al., 1997). La variable respuesta (RR) fue la relación entre la variable de interés en el tratamiento (cultivo de cobertura = \bar{X}_T) y el control (barbecho = \bar{X}_C) (Ec. 1):

$$RR = \frac{\bar{X}_T}{\bar{X}_C} \quad (\text{Ec. 1})$$

Esta variable respuesta no tiene unidades y representa la fracción de cambio que determina el tratamiento respecto del control (Hedges et al., 1999). Para su análisis estadístico se logaritiza a fines de lograr normalidad (Hedges et al., 1999). Se calculó, para el RR promedio (\overline{RR}) de los diferentes estudios, el intervalo de confianza del 95% (IC) por métodos de *bootstrapping* (Adams et al., 1997). Cuando el intervalo de confianza no incluye el valor 1 se asume efecto significativo ($P < 0.05$) del cultivo de cobertura respecto del control. Cuando los intervalos de confianza de dos grupos de datos no se superponen también se considera como diferencias significativas entre ellos. Para los análisis se usó MetaWin 2.0 (Rosenberg et al., 2000). El \overline{RR} se transformó a porcentaje de cambio para presentar los resultados (Ec. 2):

$$\text{Porcentaje de cambio} = (\overline{RR} - 1) * 100\% \quad (\text{Ec. 2})$$

Para analizar si existían diferencias entre grupos de datos (ej. diferentes especies de cultivo de cobertura) se realizó el análisis de heterogeneidad de \overline{RR} calculado para esos grupos (Hedges y Olkin, 1985). Si el análisis era significativo ($P < 0.05$) indicaba respuesta diferente al tratamiento cultivo de cobertura de los grupos testeados. Las correlaciones entre variables se calcularon por mínimos cuadrados ponderados (Hedges y Olkin, 1985) utilizando el software MetaWin (Rosenberg et al., 2000).

Resultados

Las propiedades físicas generalmente mejoraron con cultivos de cobertura (Figura 2). Mientras que la densidad aparente fue mínimamente afectada (media: -1%, IC: 0 a -3%), la resistencia a la

penetración del suelo decreció un 15% (IC: -24 a -7%), la estabilidad estructural mejoró un 12% (IC: +6 a +19%) y la infiltración aumentó 36% (IC: +18 a +62%). Todos estos cambios no se correlacionaron con el tiempo desde la aplicación de los cultivos de cobertura.

Se produjo un aumento del contenido de carbono orgánico de los suelos en casi todos los experimentos (Figura 3). El incremento promedio fue de 7% (IC: +5 a +12%) para el estrato 0-20 cm, registrándose en algunos casos disminución del C orgánico. Esas disminuciones se observaron solamente en experimentos de corta duración, generalmente menor a cinco años. No se pudo correlacionar el aumento del carbono con la duración del experimento. El \overline{RR} difirió entre experimentos instalados en suelos de textura fina y gruesa. El aumento del carbono fue mayor en suelos gruesos que finos (cambio porcentual de 9% vs. 4%, respectivamente). El tipo de rotación (con inclusión de trigo o maíz vs. monocultivo de soja) no impactó sobre el \overline{RR} .

El N-nitrato decreció en promedio 53% (IC: -59 a -47%) a la siembra del cultivo siguiente con cultivos de cobertura (Figura 3). Esta caída se produjo tanto si el cultivo de cobertura era una gramínea o una leguminosa. La meta-regresión mostró que la caída de N-nitrato era mayor a más años bajo cultivo de cobertura.

El efecto del cultivo de cobertura sobre el contenido de agua útil del suelo dependió del estrato de profundidad considerado (Figura 4). En las capas superficiales (0-1 m) del suelo no se detectaron efectos significativos de los cultivos de cobertura sobre contenido de agua útil. En cambio, cuando se consideraron las capas profundas hubo menor contenido de agua útil con cultivos de cobertura. Hasta 1 m de profundidad los cultivos de cobertura no impactaron significativamente sobre la provisión de agua del suelo, pero al considerar toda la zona de exploración de las raíces los cultivos siguientes tuvieron menos agua disponible con cultivos de cobertura en lugar de barbecho. La disminución media varió entre 15% y 30% del total de agua almacenada en el perfil (IC: -42 a -3%) dependiendo de la profundidad considerada.

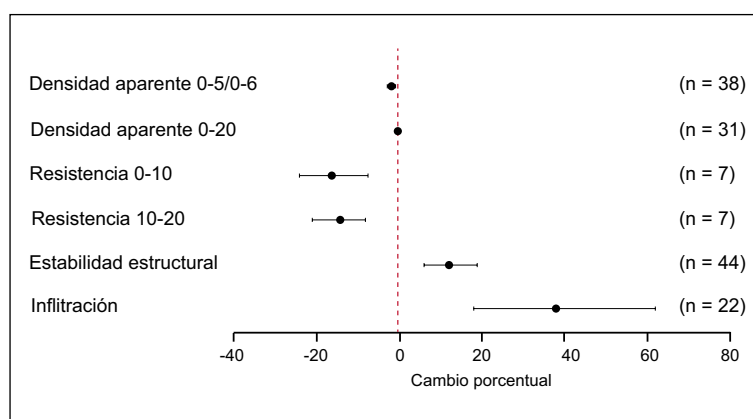


Figura 2. Cambio porcentual de las propiedades físicas del suelo entre el tratamiento con cultivo de cobertura y el control. Los números entre paréntesis indican la cantidad de datos promediados. Las barras indican los intervalos de confianza del 95%.

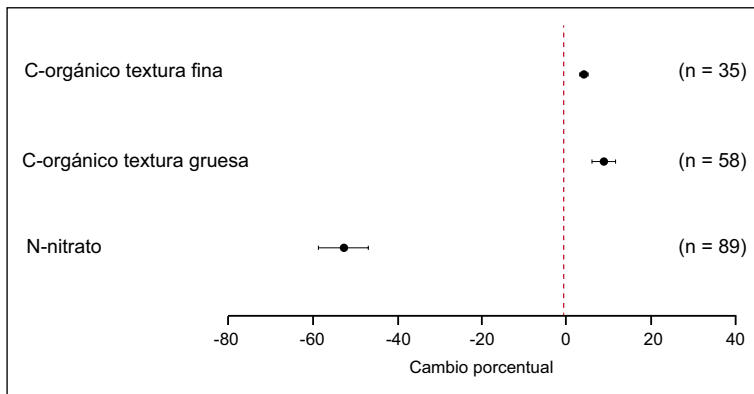


Figura 3. Cambio porcentual de los contenidos de carbono orgánico y N-nitratos a la siembra de los cultivos de granos entre el tratamiento con cultivo de cobertura y el control. Los números entre paréntesis indican la cantidad de datos promediados. Las barras indican los intervalos de confianza del 95%.

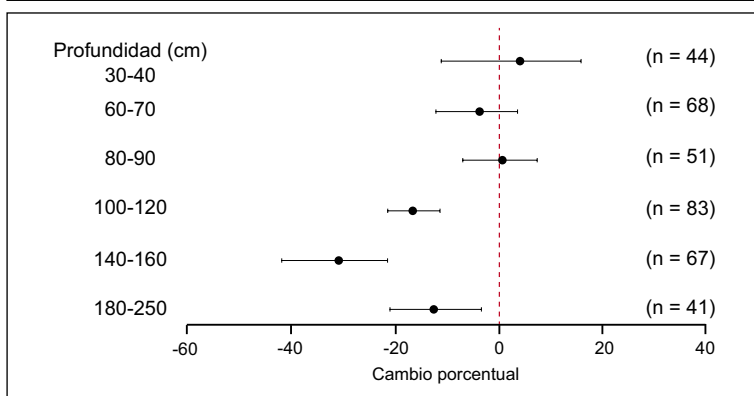


Figura 4. Cambio porcentual del contenido de agua útil del suelo entre el tratamiento con cultivo de cobertura y el control medido entre el secado del cultivo de cobertura y la siembra del cultivo de grano posterior. El agua útil se calculó en todos los casos desde la superficie del suelo hasta la profundidad indicada en cada caso. Los números entre paréntesis indican la cantidad de datos promediados. Las barras indican los intervalos de confianza del 95%.

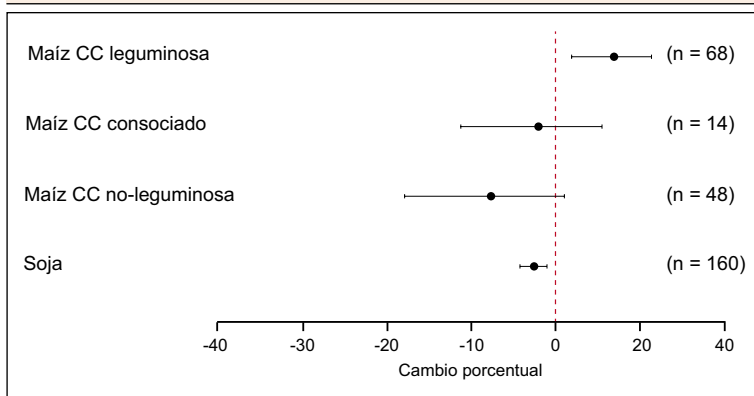


Figura 5. Cambio porcentual del rendimiento de maíz y soja entre el tratamiento con cultivo de cobertura y el control. Los números entre paréntesis indican la cantidad de datos promediados. Las barras indican los intervalos de confianza del 95%.

Los rendimientos tanto de maíz como de soja se vieron significativamente afectados por el cultivo de cobertura (Figura 5). El análisis de heterogeneidad indicó, en maíz, diferencias según el tipo de cultivo de cobertura, mientras que en soja no se detectó este comportamiento. Cuando el maíz fue precedido por un cultivo de

cobertura leguminosa (generalmente *Vicia sp.*), su rendimiento se incrementó, en promedio, un 7% (IC: +3 a +12%). En cambio, el rendimiento no fue significativamente afectado por consociaciones (gramíneas+leguminosas) o cuando se usaba una no leguminosa como cultivo de cobertura. En este último caso, sin embargo, hubo una tendencia a la disminución del rendimiento del 8% en promedio (IC: -16 a +3%). Estos efectos fueron independientes del clima del sitio experimental. No hubo correlación entre y la relación precipitación/evapotranspiración potencial del sitio. En contraposición, el rendimiento de soja fue mínimamente afectado (media: -2%, IC: -4 a -1%) por el cultivo de cobertura previo y no hubo diferencias significativas entre tipos de cultivo de cobertura.

Discusión

Propiedades físicas

Los cambios producidos por los cultivos de cobertura sobre la densidad aparente fueron muy pequeños y no afectan el crecimiento de las raíces. En cambio, la resistencia a la penetración decreció con cultivos de cobertura. En el 40% de los casos de nuestro set de datos, la resistencia sobrepasaba el umbral de 2 kPa a partir del cual las raíces se ven afectadas (Hamza et al., 2005). Una reducción del 15-20% en la dureza puede mejorar las condiciones para las raíces en esos casos. Sin embargo, nuestro set era reducido para analizar en profundidad esta variable, por lo que más datos deberán ser generados en el futuro para confirmar esta observación. La mejora de la estabilidad estructural observada con cultivos de cobertura parece ser producida por un efecto agregante de las raíces de esos cultivos. Si bien no se pudo testear si los mismos estaban asociados a mayores niveles de materia orgánica inducidos por los cultivos de cobertura, debido a la falta de datos de ambas variables combinadas, el 79% de los casos correspondían a experimentos de dos años o menos, lo que sugiere poco cambio del nivel de materia orgánica de los suelos. Estos efectos agregantes de los cultivos de cobertura, sin afectar el contenido de materia orgánica edáfica, han sido descritos anteriormente (Liu et al., 2005). La mayor infiltración bajo cultivos de cobertura, como la observada en la región pampeana, no necesariamente impacta favorablemente sobre el nivel de humedad del suelo porque los cultivos de cobertura consumen agua (Lal et al., 1978).

Fertilidad

El incremento promedio de 7% del nivel de C orgánico del suelo con cultivos de cobertura representa aproximadamente 2.6 t C ha⁻¹ de carbono secuestrado para el estrato 0-20 cm. Este incremento fue mayor en suelos de textura gruesa posiblemente debido a una menor productividad de los cultivos de granos en esos suelos (De Paepe y Álvarez, 2013). Consecuentemente,

para estos suelos, el aporte adicional de residuos que producen los cultivos de cobertura es más importante en términos relativos. La rotación no impactó sobre el secuestro de C producido por los cultivos de cobertura.

La disminución de N-nitrato se produjo tanto en casos donde se usaron gramíneas como cultivos de cobertura como leguminosas. La *Vicia sp.* actuó como destino del N-nitrato del suelo tan eficientemente como las gramíneas a pesar de su capacidad de fijar N atmosférico, que se ha estimado entre 50 a 180 kg N ha⁻¹ (Fageria et al., 2005; LaRue and Patterson, 1981).

Agua del suelo

La adopción de cultivos de cobertura produjo una disminución promedio de contenido de agua útil del suelo de entre 15% y 30% para la zona de exploración radical, lo que representó entre 20 y 40 mm de agua en relación al nivel de humedad del tratamiento control. El uso consuntivo de los cultivos de granos en la región pampeana oscila entre 500 y 700 mm en el ciclo de desarrollo (Bono y Álvarez, 2016; Dardanelli et al., 2003) y esta restricción posiblemente tiene poco impacto sobre la productividad. En áreas donde la precipitación anual es menor a 500 mm, los cultivos de cobertura pueden producir una disminución marcada de la disponibilidad de agua en el suelo (Cherr et al., 2006) pero este no es el escenario climático de la mayor parte de las áreas agrícolas pampeanas, excepto en años secos.

Rendimientos

El rendimiento de soja prácticamente no fue impactado por los cultivos de cobertura. Ni la reducción del N-nitrato, ni la del agua útil afectaron al cultivo. Por el contrario, el rendimiento de maíz se vio incrementado cuando se utilizó *Vicia sp.* como cultivo de cobertura. Teniendo en cuenta que en la región pampeana se ha estimado un requerimiento de 20 kg N para generar una tonelada de grano en este cultivo (Álvarez y Steinbach, 2016), el aumento promedio del rendimiento de 7% calculado en el meta-análisis representó 0.65 t grano ha⁻¹ en relación a la media del tratamiento control. Este incremento estaría asociado a un crédito de N producido por la *Vicia sp.* que determinó una absorción adicional de 15 kg N ha⁻¹. El mismo se generó durante el ciclo del maíz gracias a la descomposición de los residuos del cultivo de cobertura y no antes de la siembra, ya que con *Vicia sp.* el N-nitrato fue menor a la siembra. Aunque no fue significativa, la disminución del rendimiento al usar gramíneas como cultivos de cobertura debe ser un tema de preocupación y de futuros estudios. Esta caída parece deberse al efecto de los cultivos de cobertura sobre el nivel de N-nitrato. Se utilizó un costo estimado de sembrar un cultivo de cobertura como equivalente al valor de aproximadamente 0.7 t de maíz (Márgenes Agropecuarios, 2016). Nuestro meta-análisis indicó que, en maíz, este costo se compensa cuando se usa *Vicia sp.* como cultivo de cobertura. Adicionalmente, el agrosistema recibe otros beneficios como la mejora en las propiedades físicas y el nivel de materia orgánica. Serán necesarios experimentos de larga duración para determinar si estas y otras ventajas que pueden aportar los cultivos de cobertura, compensan o

no su costo de implantación cuando se usan gramíneas previas a cultivos de maíz o soja.

Bibliografía

- Álvarez, R., H.S. Steinbach, y J.L. De Paepe, J.L. 2017. Cover crops effects on soils and subsequent crops in the Pampas: a meta-analysis. *Soil Till. Res.* 170:53-45.
- Adams, D.C., J. Gurevitch, y M.S. Rosenberg, M.S. 1997. Resampling tests for meta-analysis of ecological data. *Ecology* 78:1277-1283.
- Álvarez, R, y H.S. Steinbach. 2016. Dosificación de la fertilización en maíz. In: Fertilidad de suelos y fertilización en la región pampeana. Chapter 15. R. Álvarez (Ed.), Editorial Facultad de Agronomía-Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina, pp. 307-331.
- Blanco-Canqui, H., T.M. Shaver, J.L. Lindquist, J.L., C.A. Shapiro, R.W. Elmore, C.A. Francis, y G.W. Hergert. 2015. Cover crops and ecosystems services: insights from studies in temperate soils. *Agron. J.* 107:2449-2474.
- Bono, A., y R. Álvarez. 2016. Estimación del uso consuntivo de trigo, maíz y girasol en la Región Semiárida-Subhúmeda Pampeana. *Actas XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 5 p.
- Cherr, C.M., J.M.S. Scholberg, y R. McSorley. 2006. Green manure approaches to crop production: a synthesis. *Agron. J.* 98:302-319.
- Dardanelli, J., D. Collino, M.E. Otegui, V.O. Sadras. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de granos. In: Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. H. Satorre et al. (Eds.). Editorial FAUBA, Buenos Aires, Argentina, pp. 375-440.
- De Paepe, J.L., y R. Álvarez. 2013. Developments of a soil productivity index using an artificial neural network approach. *Agron. J.* 105:1803-1813.
- De Paepe, J.L., y R. Álvarez. 2016. Wheat yield gap in the pampas: modeling the impact of environmental factors. *Agron. J.* 108:1367-1378.
- Fageria, N.K., V.C. Baligar, B.A. Bailey. 2005. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36:2733-2757.
- Hamza, M.A., y W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res* 82:121-145.
- Hedges, L.V., Gurevitch, J., Curtis, P.S. 1999. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology* 80:1150-1156.
- Hedges, L.V., Olkin, I. 1985. *Statistical methods for meta-analysis*. Academic Press, London, 369 pp.
- Lal, R., Wilson, G.F., Okigbo, B.N. 1978. No-till framing alter various grasses and leguminous cover crops in tropical Alfisol. I: Crop performance. *Field Crops Res.* 1:71-84.
- Langdale, G.W., R.L. Blevins, D.L. Karlen, D.K. McCool, M.A. Nearing, E.L. Skidmore, E.L., A.W. Thomas, D.D. Tyler, y J.R. Williams. 1991. Cover crops effects on soil erosion by wind and water. In: W.L. Hargrove (Editor). *Cover crops for clean water*. Soil and Water Conservation Society, 7515 N.E. Iowa, USA, pp. 15-22.
- LaRue, T.A., T.G. Patterson. 1981. How much nitrogen do legumes fix? *Adv. Agron.* 34:15-38.
- Li, X., P. Sorensen, F. Li, S.O. Petersen, y J.E. Olsen. 2015. Quantifying biological nitrogen fixation of different catch crops, and residual effects of roots and tops on nitrogen uptake in barley using in-situ ¹⁵N labelling. *Plant Soil* 395:273-287.
- Liu, A., Ma, B.L., y A.A. Bomke. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:2041-2048.
- Márgenes Agropecuarios. 2016. Editorial Márgenes Agropecuarios S.R.L. Año 32, Nº 374, Buenos Aires, Argentina.
- Poeplau, C., y A. Don. 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops-A meta-analysis. *Agric. Ecosys. Environm.* 200:33-41.
- Rimski-Korsakov, H., C.R. Álvarez, y R.S. Lavado. 2015. Cover crops in the agricultural systems of the Argentine Pampas. *J. Soil Water. Cons.* 70:112A-118A.
- Rosenberg, M.S., D.C. Adams, y J. Gurevitch. 2000. *MetaWin*. Statistical software for meta-analysis, version 2.0. 133 p.
- Snapp, S.S., S.M. Swinton, R. Labarta, D. Mutch, J.R. Black, R. Leep, J. Nyiraneza, y K. O'Neil. 2005. Evaluating cover crops for benefits, cost and performance within cropping systems niches. *Agron. J.* 97:322-332.
- Valkama, E., R. Lemola, T. Känkänen, y E. Turtola. 2015. Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. *Agric. Ecosys. Environm.* 203:93-101.

Características físicas de los fertilizantes y calibración de fertilizadoras

Walter Carciochi^{1,2,*}, y Santiago Tourn^{2,*}

- *La aplicación de fertilizantes y enmiendas son prácticas cada vez más frecuentes y necesarias.*
- *A la hora de aplicar estos productos surge la necesidad de conocer sus características físicas, y de calibrar adecuadamente la maquinaria, en pos de lograr una aplicación de calidad, efectiva y eficiente.*
- *Se brindan una serie de pautas y ejemplos de cómo mejorar la calidad de aplicación con maquinarias de uso común en la región.*

Introducción

La intensificación de los sistemas productivos actuales generó un incremento en el uso de recursos e insumos. En este contexto, la aplicación de fertilizantes y enmiendas, son prácticas cada vez más frecuentes, lo que genera la necesidad de seguir realizando estudios para asegurar su adecuada aplicación.

La calidad de aplicación de los fertilizantes se ve afectada por numerosas variables. Se asume que, aproximadamente, una tercera parte de la misma es determinada por el operador, otra por el equipo fertilizador y otra por las características del fertilizante. La mayoría de las máquinas aplicadoras de enmiendas y fertilizantes sólidos granulados se caracterizan por aplicar los mismos de manera desuniforme en el suelo, obligando a realizar superposiciones entre pasadas sucesivas para uniformizar la aplicación. La falta de calibración de las fertilizadoras lleva al empleo de anchos de labor inadecuados que generan la aplicación de cantidades excesivas de fertilizantes en una parte del lote y muy bajas cantidades en otras zonas. Esto produce pérdidas de productividad, afectando económicamente al sistema.

Los objetivos del siguiente trabajo son:

- 1) Realizar una revisión y presentar datos locales sobre las propiedades físicas de los fertilizantes y enmiendas más utilizados.
- 2) Detallar los principales aspectos a contemplar para la calibración de fertilizadoras.
- 3) Presentar resultados de evaluaciones de distribución de algunos fertilizantes con máquinas de uso común en la región.

Propiedades de los fertilizantes

A la hora de elegir un fertilizante o enmienda deben considerarse ciertas propiedades de los mismos que hacen a la calidad de su aplicación. Entre ellas pueden mencionarse:

Tamaño de partícula

Este es el principal factor que afecta la distribución de los fertilizantes sólidos y enmiendas. Las partículas más grandes son arrojadas por el distribuidor a una mayor distancia, en comparación con las más pequeñas (Yule, 2011). Esto es así porque la fuerza centrífuga sobre las partículas es proporcional a la masa de las mismas (Morsy et al., 2012). Como ejemplo, puede mencionarse un estudio realizado por Broder y Balay (1983), donde gránulos de urea (46-0-0) de 4.7 mm de diámetro alcanzaron una distancia de dispersión de 20 m, mientras que aquellos de 1.7 mm sólo alcanzaron una distancia de 10 m. Asimismo, Hofstee y Huisman (1990) recomiendan remover las partículas menores a 1 mm, ya que no solo disminuyen el ancho de labor, sino que también incrementan la desuniformidad de la aplicación del producto sobre el terreno.

Comúnmente el tamaño de partícula es determinado por el Número Guía de Tamaño (SGN, por sus siglas en inglés "Size Guide Number"). El SGN se calcula como el tamaño de partícula en mm al cual se retiene el 50% de las partículas (mediana), multiplicado por 100 y redondeado al múltiplo de cinco más cercano (Fertilizer Manual, 1998). Como ejemplo, si se retiene el 50% de un fertilizante en el tamiz de 3.18 mm, entonces su SGN es de 320. En la **Tabla 1** se muestra el SGN de distintos fertilizantes y de distintas partidas de urea granulada y fosfato monoamónico (MAP, 15-52-0) comercializadas por una empresa de la región pampeana argentina. Cabe destacar la variabilidad en el SGN entre fertilizantes, e incluso entre partidas de un mismo fertilizante.

Conocer el SGN de los fertilizantes es de fundamental importancia a la hora de evaluar su aptitud para el mezclado físico. Fertilizantes con diferencias considerables en granulometría, responderán en forma diferencial a las fuerzas y acciones mecánicas a las que serán sometidos durante el mezclado, almacenamiento, transporte y aplicación, y presentarán tendencia a la segregación de las partículas. La mayoría

¹ CONICET

² Facultad de Ciencias Agrarias, Unidad Integrada Balcarce INTA-FCA

* Autor de contacto. Correo electrónico: carciochi.walter@inta.gov.ar, tourn.santiago@inta.gov.ar

Tabla 1. Número Guía de Tamaño (SGN) de distintos fertilizantes granulados. Letras minúsculas distintas entre partidas de fosfato monoamónico, y mayúsculas entre partidas de urea, indican diferencias significativas según test LSD (5%). Fuente: Datos propios.

Fertilizante	SGN
Sulfato de amonio	400
Sulfato de calcio (yeso)	340
Carbonato de calcio y magnesio (dolomita)	310
Superfosfato simple	260
Fosfato monoamónico 1	340 a
Fosfato monoamónico 2	310 b
Urea 1	285 A
Urea 2	265 B
Urea 3	250 B

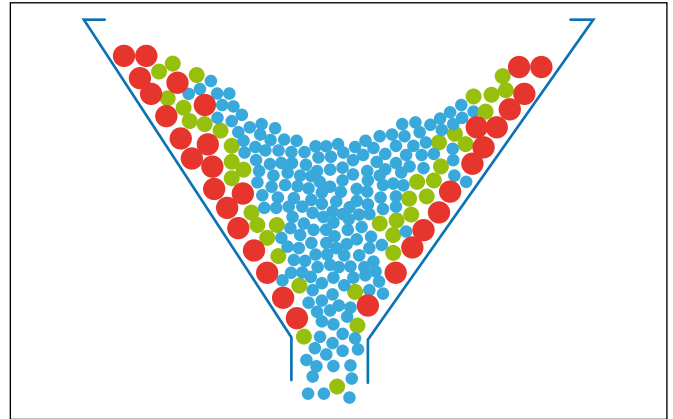


Figura 1. Segregación del fertilizante dentro de la tolva de la fertilizadora.

de las partículas más pequeñas tienden a acumularse en la parte central y superior de la pila de almacenamiento, mientras que las partículas más grandes, lo hacen en la base y en la parte externa de la pila. La misma situación se da dentro de las tolvas (**Figura 1**), debido a las vibraciones producidas durante el transporte del fertilizante a granel.

Tabla 2. Compatibilidad de fertilizantes según Número Guía de Tamaño (SGN). Fuente: Fertilizer Manual, 1998.

Diferencia en SGN	Compatibilidad esperada
0-10 %	Compatible
11-20 %	Compatibilidad moderada
>20 %	Incompatible

Una vez calculado el SGN de cada fertilizante de la mezcla, se comparan los valores y se determina si los mismos se encuentran dentro de los límites de compatibilidad (**Tabla 2**). Como ejemplo, y en función a los valores de la **Tabla 1**, puede mencionarse que el sulfato de calcio (SGN = 340) y la urea de la partida 3 (SGN = 250) no pueden mezclarse ya que la diferencia entre sus SGN es mayor al 20%.

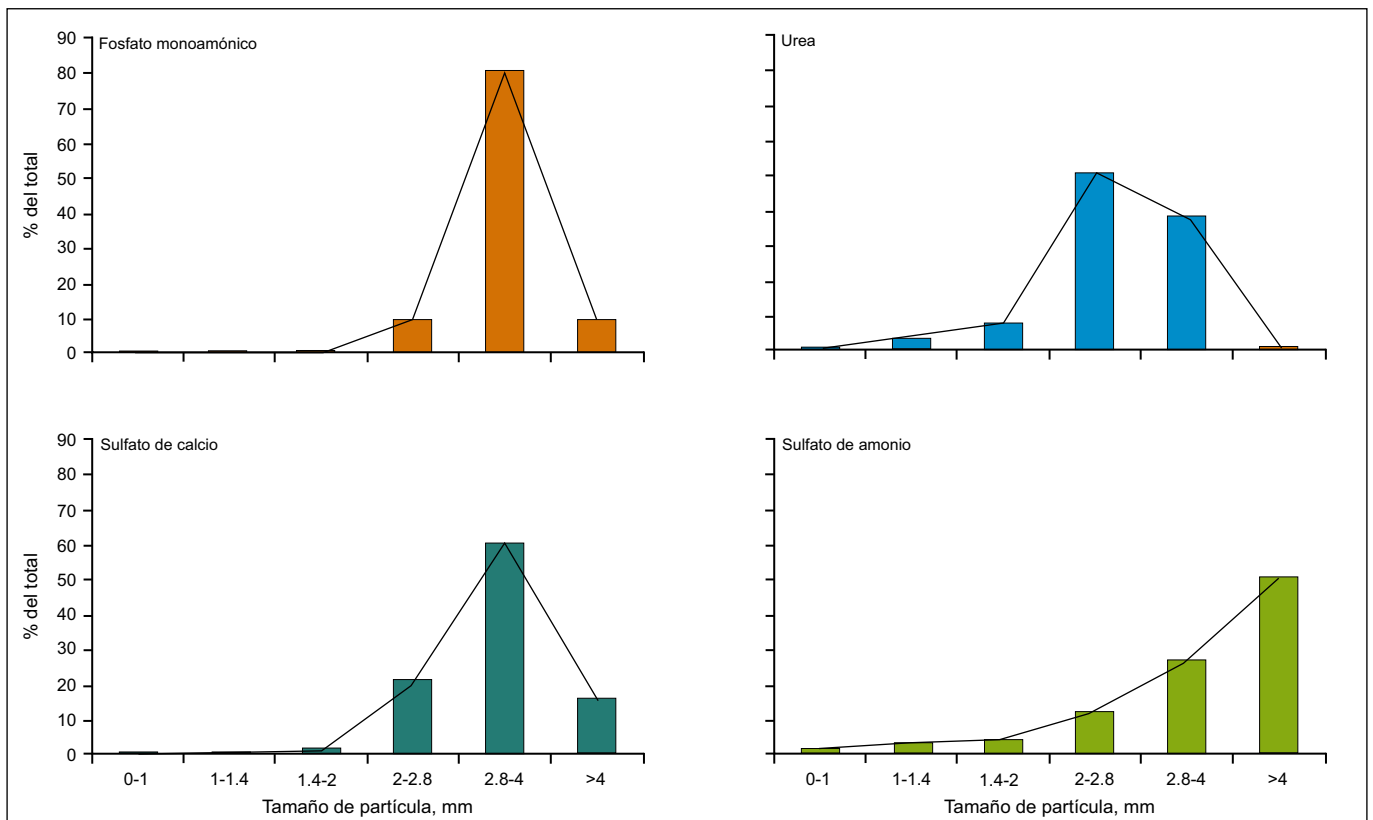


Figura 2. Distribución del tamaño de partículas para distintos fertilizantes. Fuente: Datos propios.

Distribución del tamaño de partículas

No solo resulta necesario conocer el tamaño de las partículas, sino también su distribución. Si se va a emplear una fertilizadora con sistema distribuidor pendular, una heterogeneidad en el tamaño de partículas favorecerá la uniformidad de aplicación. De forma contraria, con distribuidores de disco, a mayor homogeneidad del producto se logrará una distribución del fertilizante más uniforme (Hofstee y Huisman, 1990).

En la **Figura 2** se muestra la distribución del tamaño de partículas para distintos fertilizantes comercializados por una empresa de venta de este insumo en la región pampeana. Tal como puede observarse, el fosfato monoamónico presenta una gran uniformidad en el tamaño de sus partículas, ya que más del 80% de las mismas se encuentran en el rango de 2.8 a 4 mm. Una distribución similar muestra el sulfato de calcio (0-0-0-16S-25Ca), mientras que en la urea granulada y el sulfato de amonio (21-0-0-24S) la distribución es más heterogénea.

Higroscopicidad y humedad crítica relativa

La higroscopicidad es la capacidad que tienen los fertilizantes de absorber humedad bajo determinadas condiciones de humedad y temperatura. La mayoría de los fertilizantes son higroscópicos debido a su alta solubilidad en agua (Fertilizer Manual, 1998). A mayor higroscopicidad de un fertilizante, más fácilmente se humedece, y sus partículas se vuelven blandas y pegajosas. Esto afecta

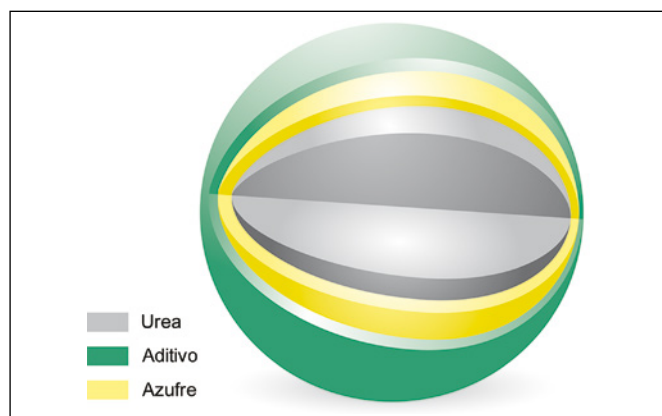


Figura 3. Granulo de fertilizante recubierto con agente anti-apelmazante (coating). Fuente: IPNI (2013).

su fluidez y, por consiguiente, se deteriora la calidad de su esparcimiento. Además, el humedecimiento de los fertilizantes lleva al apelmazamiento, el cual ocurre como resultado de la formación de puentes cristalinos fuertes, y fuerzas adhesivas entre los gránulos. Esto es un efecto indeseable en los fertilizantes ya que también afecta la distribución del material sobre el lote. Una solución a este problema en ciertos fertilizantes, es la aplicación de un agente anti-apelmazante que recubre el gránulo (coating), el cual reduce la tasa de absorción de humedad del producto (**Figura 3**).

La humedad crítica relativa (HCR) de un fertilizante es la humedad relativa del ambiente (determinada a 30 °C) a partir de la cual un fertilizante comienza a absorber humedad del medio que lo rodea (**Tabla 3**) (Fertilizer Manual, 1998). La HCR es una propiedad de suma importancia para evaluar fuentes a emplear en mezclas, ya que generalmente la HCR de las mezclas es más baja que la de cada fuente en forma individual (**Tabla 3**). Un caso muy particular se presenta al mezclar urea y nitrato de amonio, donde la HCR de la mezcla es de sólo 18%. Considerando que la mayoría de los días se dan condiciones de humedad relativa ambiental por encima de ese valor, y que el humedecimiento de los fertilizantes dificulta el manipuleo y aplicación, es que se indica que dichos fertilizantes son incompatibles.

Dureza de la partícula

Este parámetro está regulado por el tipo de formulación y el diámetro de la partícula, e indica la fuerza que debe aplicarse para romper las partículas de fertilizante (Fertilizer Manual, 1998). Esta ruptura afecta la densidad aparente y tamaño de las partículas, impactando sobre el almacenamiento, transporte y distribución del producto. A menor dureza, mayor es la formación de polvillo durante el manipuleo y aplicación del fertilizante, lo cual es una característica indeseable. La dureza se relaciona con la distancia alcanzada por las partículas aplicadas, determinada en parte por la velocidad de giro del disco distribuidor. Esto es así, porque para evitar la ruptura de los fertilizantes menos duros, el disco distribuidor debe girar a una menor velocidad, lo que genera una menor distancia de lanzamiento del fertilizante y, por ende, un menor ancho de labor. Por este motivo, resulta importante conocer la velocidad adecuada de giro de los discos, la

Tabla 3. Humedad crítica relativa (HCR) de algunos fertilizantes y sus mezclas (a 30 °C). Fuente: Fertilizer Manual, 1998.

Fertilizante	U	NA	SA	SPT	DAP	MAP
Urea (U)	70					
Nitrato de amonio (NA)	18	55				
Sulfato de amonio (SA)	55	55	75			
Superfosfato triple (SPT)	60	50	70	80		
Fosfato diamónico (DAP)	50	55	70	75	70	
Fosfato monoamónico (MAP)	55	55	70	80	70	70

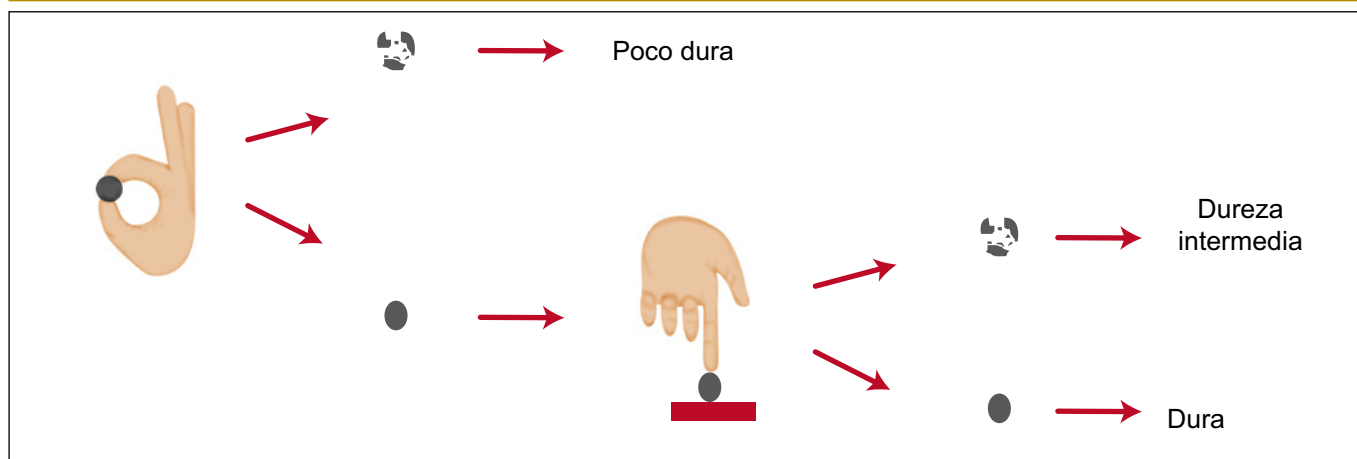


Figura 4. Determinación práctica de la dureza de partícula.

Tabla 4. Densidad aparente de fertilizantes y de tres partidas de urea. Letras distintas entre partidas de urea indican diferencias significativas según test LSD (5%). Fuente: Datos propios.

Fertilizante	Densidad aparente, kg m^{-3}
Urea	700-820
Sulfato de calcio	950-1100
Nitrato de amonio	850-975
Sulfato de amonio	785-1040
Superfosfato triple	950-1200
Fosfato monoamónico	900-1100
Fosfato diamónico	875-1100
Urea 1	710 B
Urea 2	710 B
Urea 3	740 A

cual se determina como la máxima velocidad a la que no se observa ruptura de partículas. Se ha indicado que gránulos con durezas menores a 1.5 kg se romperán con facilidad y generarán polvo. Durezas entre 1.5-2.5 kg son adecuadas tomando algunas precauciones de manejo mientras que partículas con durezas mayores a 2.5 kg son deseables (Fertilizer Manual, 1998). Una aclaración a la hora de comparar la dureza de distintos fertilizantes es que debe medirse al menos sobre 10 gránulos que deben ser de igual tamaño, ya que la fuerza de ruptura se incrementa a medida que aumenta el tamaño de partícula. Una forma práctica y sencilla de medir la dureza de las partículas en el campo es mediante la aplicación de presión en gránulos individuales. Así, partículas que se rompen al ejercerles presión entre los dedos índice y pulgar, se consideran poco duras, si la ruptura se produce al presionarlas entre el dedo y una superficie dura, se dice que tienen dureza intermedia, mientras que se consideran duras si no se rompen de esta última forma (Figura 4).

Un ejemplo de diferencia en la dureza del fertilizante debido al tipo de formulación es el de la urea. En este caso, la urea granulada presenta partículas con mayor dureza en comparación con la perlada ($1.5-2.5$ vs $0.8-1.2$ kg gránulo^{-1}). Es debido a esto y a su mayor esfericidad y tamaño que es preferible el empleo de la urea granulada (Fertilizer Manual, 1998).

Densidad de partícula y densidad aparente

La densidad de partícula es una propiedad que afecta el ancho de labor efectivo de la aplicación. Partículas más densas alcanzan una mayor distancia (Morsy et al., 2012), y generalmente, pueden aplicarse con una mayor velocidad de giro de los platos, dado que suelen tener una mayor dureza de partícula.

Por su parte, la densidad aparente es una característica que debemos conocer a la hora de ajustar la dosis que queremos aplicar, tal como veremos más adelante. Su determinación es muy sencilla, ya que sólo debemos llenar con el fertilizante una probeta u otro recipiente de volumen conocido y pesarlo, obteniendo los kg L^{-1} del producto. En la **Tabla 4** se muestran valores promedio de densidad aparente para distintos fertilizantes, y valores medidos en distintas partidas de urea granulada. Cabe remarcar que al igual que lo ocurrido con el SGN, hay una gran variabilidad de densidad aparente entre fertilizantes y entre partidas de un mismo fertilizante, tal como se observa en el ejemplo de la urea. Esto genera la necesidad de determinar la densidad del producto previo a cada aplicación.

Forma de las partículas

La forma de las partículas puede variar entre los fertilizantes. Ésta puede ser redonda (esférica o en forma de huevo), cúbica, rectangular o irregular. A mayor esfericidad de la partícula, mayor es la distancia que puede alcanzar, debido a que mejora su aerodinamicidad (Morsy et al., 2012). Además, las partículas irregulares son más propensas a la segregación que las esféricas. Sin embargo, la diferencia de tamaño de las partículas tiene mucho más impacto en la distancia de aplicación y la segregación, que la forma de las mismas.

Características de las fertilizadoras: puesta a punto

i) Equipos aplicadores de fertilizantes y enmiendas

En Argentina, gran parte de la aplicación de fertilizantes y enmiendas sólidas se realiza al voleo por medio de máquinas fertilizadoras de arrastre, montadas y algunas autopropulsadas. Si bien existen diferencias constructivas y de configuración, todas poseen un sistema de dosificación y distribución de producto. Conocer el funcionamiento de cada uno de estos sistemas permite, por un lado, ajustar la dosis objetivo de manera precisa, y por otro, corregir la distribución del producto en el suelo. Como se mencionó anteriormente, el éxito de la aplicación está influenciado, en gran parte, por las características del fertilizante o mezcla realizada y las condiciones ambientales. Por lo tanto, es necesario aclarar que cada vez que se utilice un fertilizante o mezcla diferente, habrá que calibrar y configurar la máquina nuevamente (Márquez, 2011a).

ii) Distribución del fertilizante sobre el terreno

Es el primer punto a observar y corregir, ya que nos definirá la calidad de aplicación y el ancho de labor efectivo (ALE). Como se ha mencionado, la uniformidad de distribución del fertilizante está influenciada en gran medida por las características del producto y las condiciones ambientales. Sin embargo, el tipo y configuración del mecanismo distribuidor de fertilizante va a definir finalmente su nivel de uniformidad. Las máquinas pueden generar distintos perfiles de distribución (**Figura 5**) según su mecanismo distribuidor (pendular, de un disco o de dos discos, **Figura 6**). Si consideramos una buena condición del fertilizante (ver arriba), las máquinas mono-disco tienden, en general, a formar perfiles sesgados y en forma de "M" con acumulaciones en los extremos, que son muy difíciles de corregir. Las pendulares pueden generar perfiles simétricos, pero de bajo ancho de labor. En cambio, las máquinas con distribuidores de doble-disco pueden generar un perfil más deseable (ovalado o piramidal), dado el efecto de compensación que genera un disco adicional, aunque es común encontrar distribuciones tipo M o W (Márquez, 2011b).

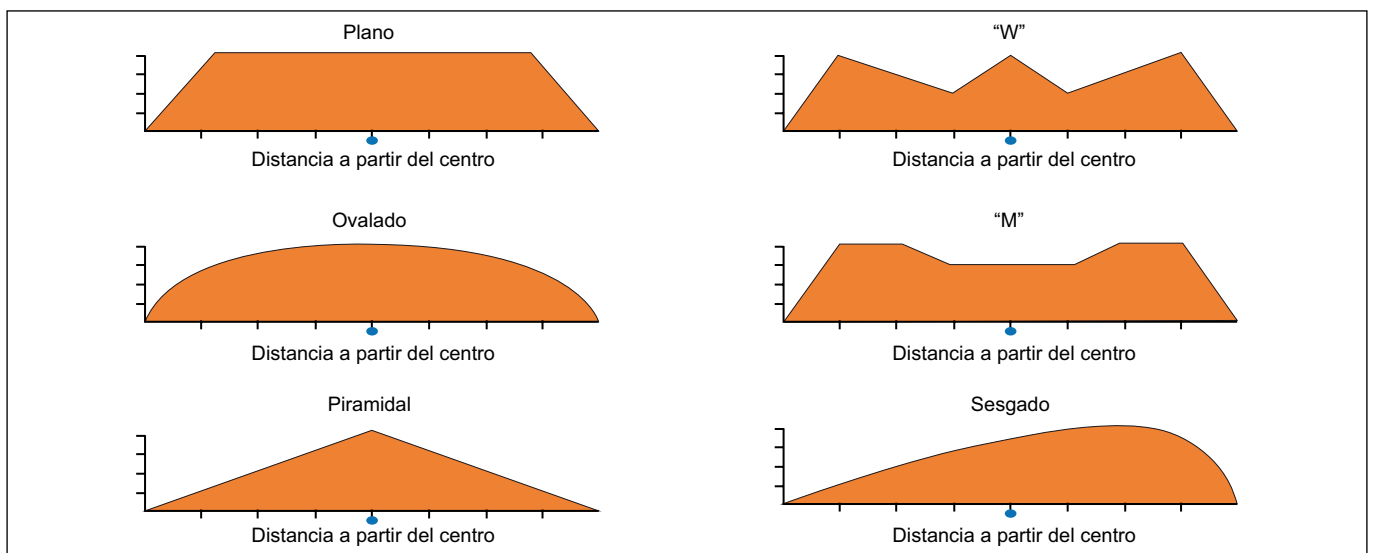


Figura 5. Perfiles de distribución de fertilizantes generados por máquinas fertilizadoras al voleo.

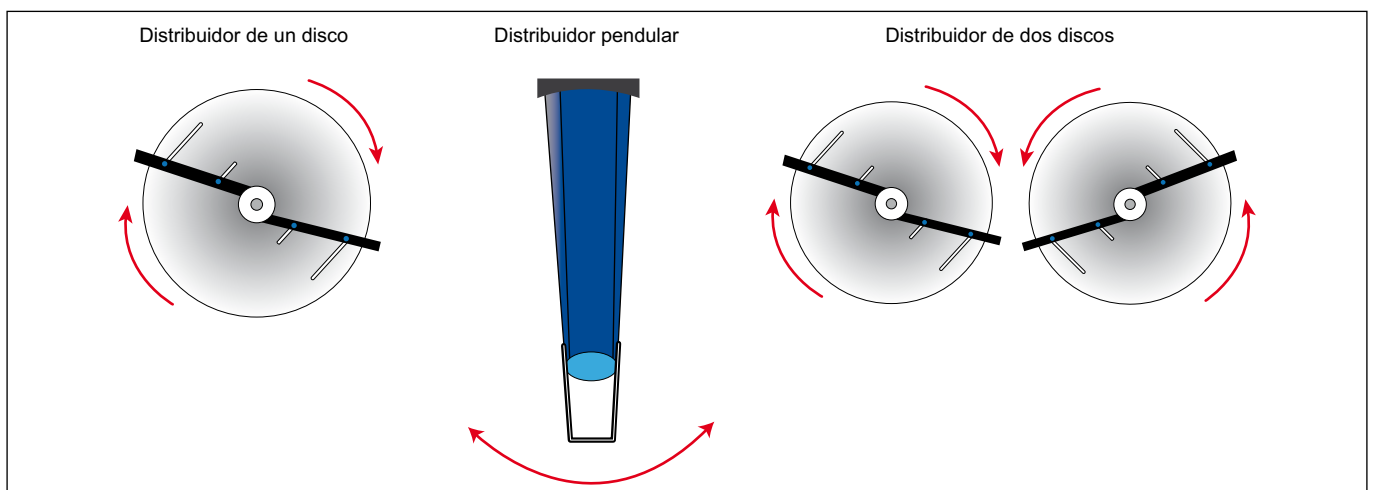


Figura 6. Distintos mecanismos distribuidores de fertilizantes presentes en fertilizadoras.

iii) Método para determinar ancho de labor efectivo (ALE) de las fertilizadoras.

1. Colocar cajas en sentido transversal al desplazamiento del tractor a 1 m de distancia entre cajas asegurando cubrir la distancia de distribución (las del centro pueden ir separadas a 1.5 m, según trocha de los implementos).
2. Con la máquina cargada se realizan 4 pasadas sucesivas y en el mismo sentido sobre las cajas. Mantener la velocidad y las revoluciones de toma de fuerza.
3. Peso medio: Recolectar y pesar el producto de cada caja. Sumar los pesos y todas las cajas y dividir por la cantidad de cajas.
4. Tolerancia: Multiplicar el peso medio por 0.3 (30%).
5. Límite inferior: Restarle al peso medio la tolerancia.
6. Cajas (metros) a superponer: Número de cajas peso inferior o límite inferior.
7. Ancho de labor efectivo: Número de cajas no superpuestas multiplicado por la distribución entre colectores.

iv) Modificaciones en la configuración de la máquina fertilizadora para corregir la distribución del fertilizante en el terreno

Cómo se mencionó anteriormente, para definir el ALE de la operación de fertilización es necesario conocer la distribución del material en el terreno. En fertilizadoras de doble-disco es común observar distribuciones del tipo M o W (Figura 5). Éstas, generan zonas de sub o sobre-dosificación que no pueden ser corregidas con la variación del grado de solapamiento entre pasadas. Es necesario, por lo tanto, actuar sobre la configuración de la máquina fertilizadora. Las máquinas que son comercializadas en Argentina, presentan distintos modos de cambio en su configuración para modificar distribuciones. En general, existen cinco puntos posibles de acción.

1. Modificación del ángulo de las paletas o barras de los discos respecto al sentido de giro.
2. Modificación del largo de las paletas o barras.
3. Modificación del punto de caída del fertilizante según sentido de giro.
4. Modificación del punto de caída del fertilizante según el radio del disco.
5. Modificación de la velocidad de giro de los discos.

En la Figura 8 se representan los cambios en la configuración de la máquina para corregir modelos de distribución tipo M y tipo W. Es necesario aclarar que no todas las máquinas fertilizadoras en el mercado poseen los distintos tipos posibles de configuración presentes en la figura.

En el caso de una distribución con una depresión de material en el centro y acumulación sobre los lados de la depresión (M), se puede modificar la posición de las paletas, moviéndolas hacia adelante respecto del sentido de giro, esto provoca que el material sea arrojado antes (alcanza menos distancia) y más cerca el centro. El punto de caída del material se puede modificar para lograr mejorar una distribución M si se coloca adelantado respecto al sentido de giro o bien, más cerca del borde del plato. De esta manera, el fertilizante recorre menos espacio en el disco y es liberado en la zona central. Para una distribución W, se deben realizar los cambios en la configuración de manera opuesta a la forma de corrección de una M (Figura 8).

Evaluación de la uniformidad de distribución de dos fertilizadoras con distintos fertilizantes

Ensayo 1

Uniformidad de distribución de urea y sulfato de calcio con fertilizadora Fertec Fertil 3000 de doble-disco

Se evaluó la distribución de urea y sulfato de calcio (Tablas 2, 3, 4 y Figura 5) con una fertilizadora de doble disco

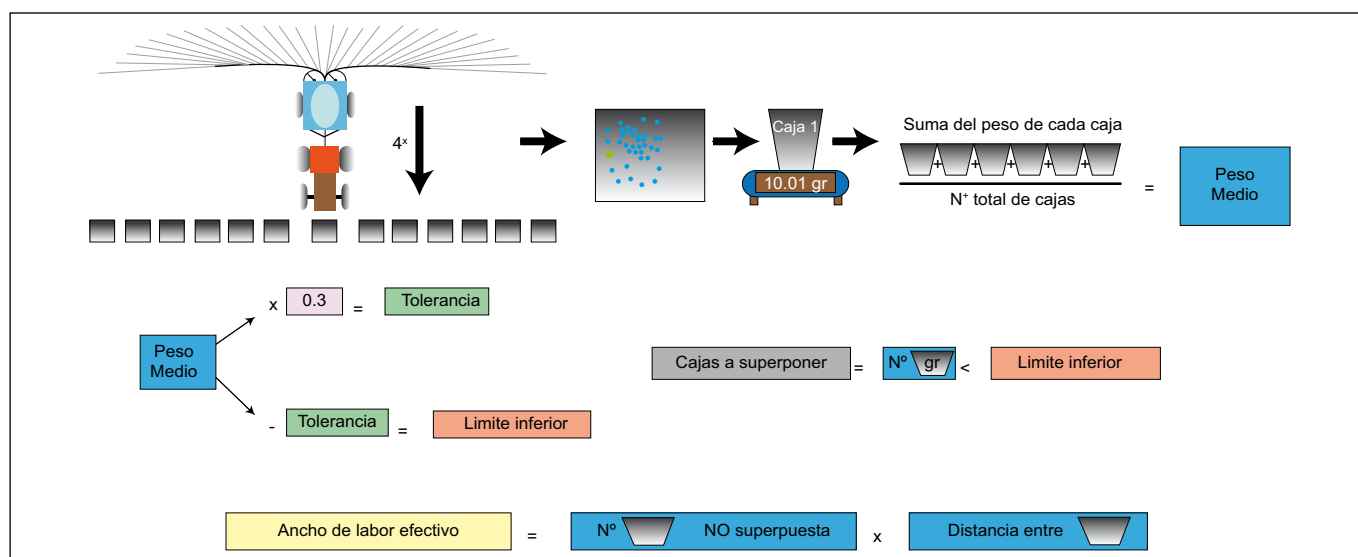


Figura 7. Determinación de ancho de labor efectivo (ALE) de la fertilizadora.

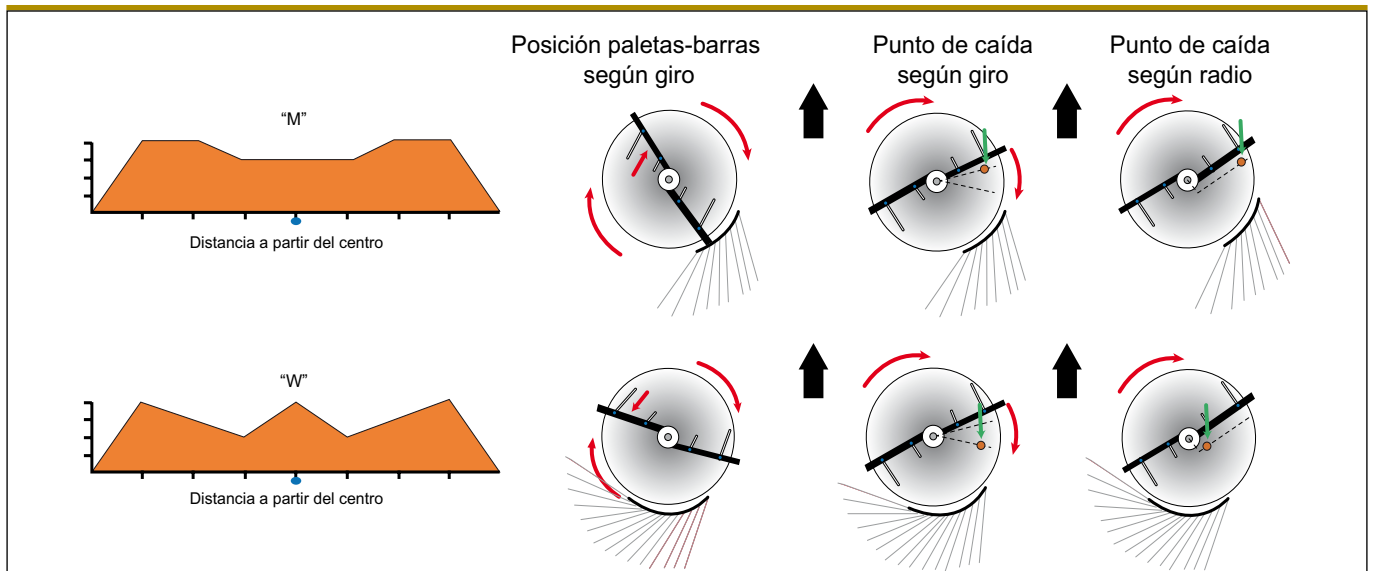


Figura 8. Modos de corrección de distribuciones de tipo M y W. Las flechas rojas indican la dirección de giro de los discos y las flechas negras, la dirección de avance de la fertilizadora. Flechas verdes y los círculos naranjas indican la posición de caída del fertilizante.

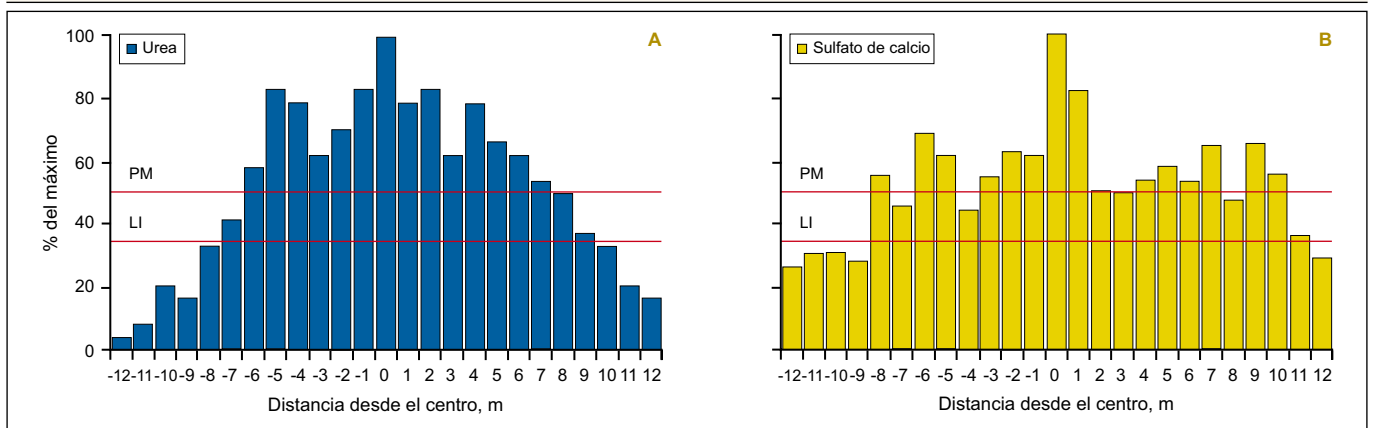


Figura 9. Perfil de distribución de urea (A) y sulfato de calcio (B) sin superposición. PM sobre línea roja indica peso medio y LI límite inferior. Fertilizadora: Fertec "Fertil 3000".

utilizando el método descrito en la **Figura 7**. El ancho de labor efectivo (ALE) fue diferente entre los fertilizantes (**Tabla 5**). El mayor ALE obtenido con el sulfato de calcio estuvo dado, principalmente, por el mayor SGN y densidad respecto a la urea (**Tablas 1 y 4**).

En cuanto al perfil de distribución, para ambos fertilizantes fue similar, sesgado y de tipo W. Sin embargo, para el sulfato de calcio el tipo W fue menos notorio que para urea (**Figura 9**). La combinación de estos tipos de distribuciones hace que se presente acumulación de fertilizante hacia la derecha y, además, un pico en la zona central, luego un valle a cada lado y nuevamente un pico a cada lado del valle (**Figura 9**). Esto genera sobredosificación (picos) y subdosificación (valles) afectando directamente la calidad y eficiencia de aplicación.

En la **Figura 10** se muestra la distribución de los fertilizantes ajustada con la superposición de pasadas trabajando en redondo y en función al ALE estimado. Se puede observar que aún con el ALE elegido, no se logra una distribución adecuada en la zona de solapamiento, ya que los valores están por debajo, aunque muy cercanos, al límite inferior (30% menos fertilizante que la media). Esto se puede mejorar disminuyendo el ancho de labor,

pero se pierde eficiencia operativa. Es importante aclarar que los picos que aparecen en la zona de la W, son muy difíciles de corregir con la superposición de pasadas, pero sería posible realizarlo eligiendo un fertilizante con bajo contenido de polvo y/o con regulaciones del sistema

Tabla 5. Resultado de la evaluación de ancho de labor efectivo (ALE) para urea y sulfato de calcio. Fertilizadora Fertec "Fertil 3000" de doble plato.

Variable	Resultado
Urea	
N° total de colectores	25
N° colectores superpuestos	8
Ancho de Labor Efectivo (m)	17
Sulfato de Ca	
N° total de colectores	25
N° colectores superpuestos	6
Ancho de Labor Efectivo (m)	19

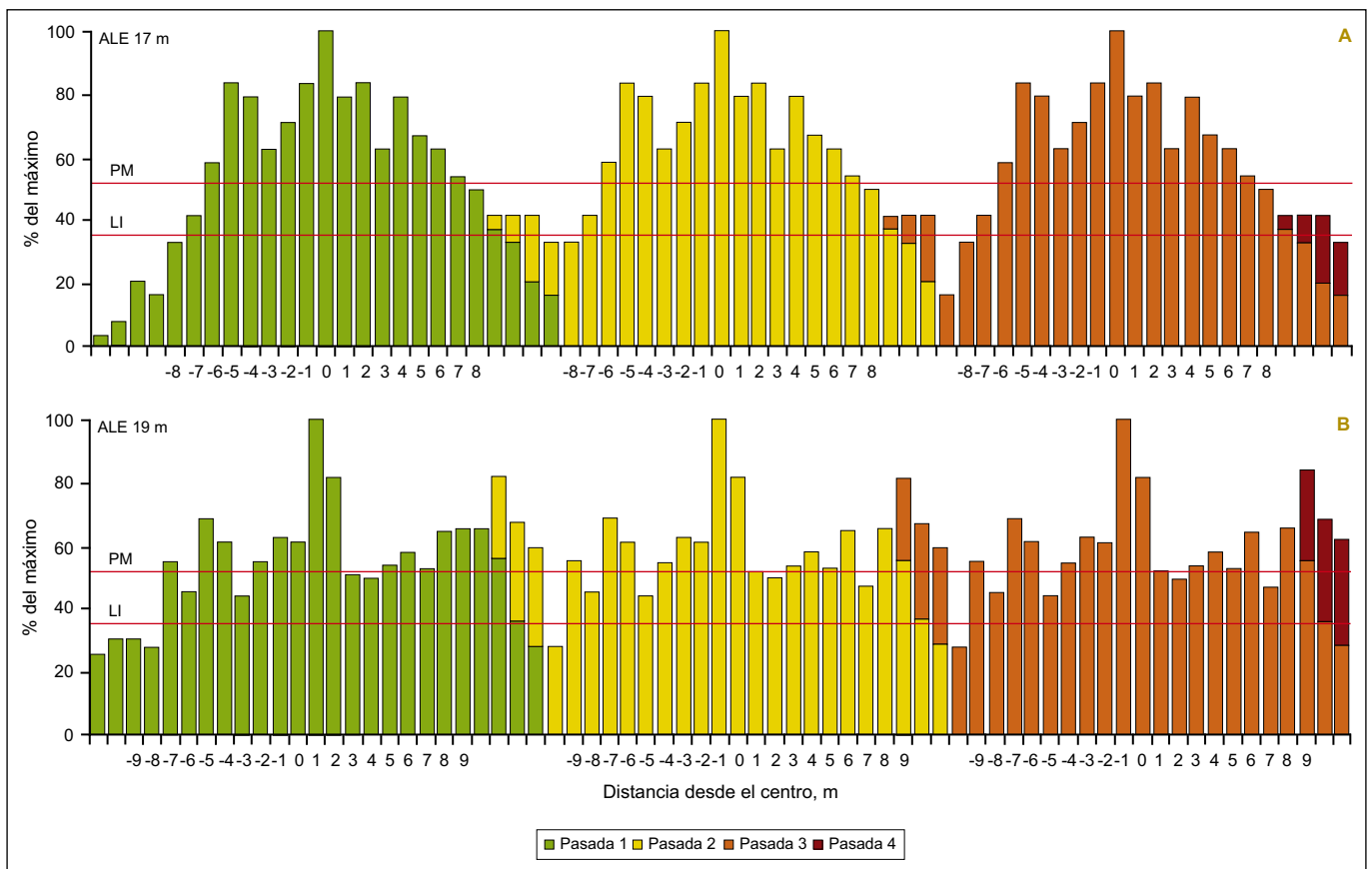


Figura 10. Perfiles de distribución de urea (A) y sulfato de calcio (B) superpuestos según ancho de labor efectivo (ALE). PM sobre línea roja indica peso medio y LI límite inferior. Fertilizadora: Fertec "Fertil 3000".

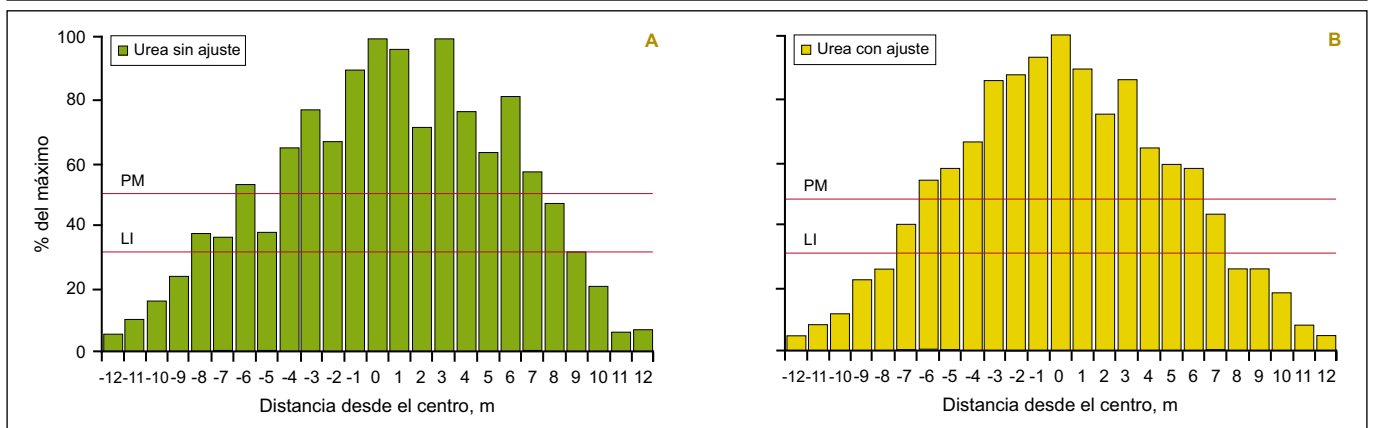


Figura 11. Perfil de distribución de urea sin ajuste (A) y con ajuste (B) de la entrega de fertilizante, sin superposición. PM sobre línea roja indica peso medio y LI límite inferior. Fertilizadora: Terra-Gator 8103.

distribuidor tal como muestra la **Figura 8**. La distribución sesgada a la derecha hace necesario que se tenga que trabajar en círculo, superponiendo el extremo derecho de una pasada, con el extremo izquierdo de la pasada anterior. De lo contrario, si se trabaja de manera plana (ida y vuelta) aparecerán zonas con muy baja aplicación de fertilizante (superposición de extremo izquierdo de dos pasadas). Se puede corregir esta variación modificando la velocidad de uno de los platos (no más de 10%) o bien ajustando la entrega de fertilizante a cada plato, asegurándose que caiga la misma cantidad de fertilizante sobre los mismos.

Ensayo 2

Uniformidad de distribución de urea con fertilizadora autopropulsada Terra-Gator 8103 de doble-disco

Se evaluó la distribución de urea (**Tablas 2, 3, 4 y Figura 11**) con una fertilizadora autopropulsada de doble disco utilizando el método anteriormente descrito. Al realizar la evaluación se observó una distribución sesgada hacia la derecha. Ante esta situación, se determinó la cantidad de fertilizante que caía sobre cada plato y se pudo observar que el plato izquierdo recibía 14% menos de fertilizante que el derecho. Por lo tanto, se modificó la placa divisoria de fertilizante hasta igualar la entrega sobre los platos. Esta modificación hizo desaparecer el sesgo.

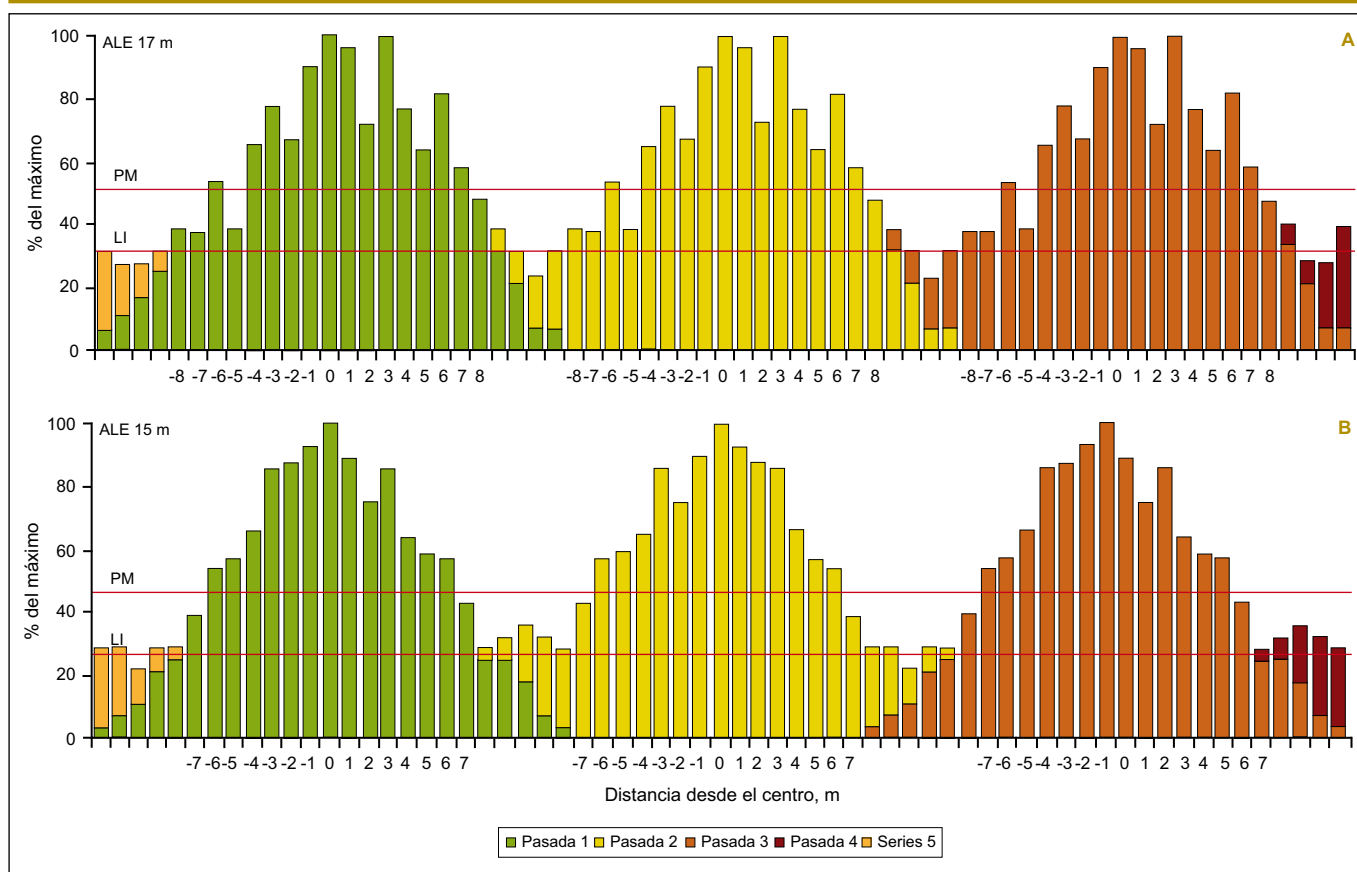


Figura 12 Perfiles de distribución de urea sin ajuste (A) y con ajuste (B) de la entrega de fertilizante, superpuestos según ancho de labor efectivo (ALE). PM sobre línea roja indica peso medio y LI límite inferior. Fertilizadora: Terra-Gator 8103.

En la **Figura 12**, se muestra la distribución del fertilizante antes (A) y después (B) del ajuste, simulando una aplicación de ida y vuelta y considerando la superposición de pasadas (ALE estimado). Se puede observar que antes del ajuste, el ALE calculado (17m) fue mayor que para la situación con la modificación (15m). Sin embargo, el coeficiente de variación en la primera situación fue superior a la situación con el ajuste (35% y 27% para la situación sin y con ajuste, respectivamente). Tales valores de coeficiente de variación son altos y si se quieren disminuir se deberá usar un ALE menor.

Cómo fue mencionado, el ajuste de la entrega de fertilizante generó que la distribución sea más pareja a ambos lados del centro de la máquina, respecto a la situación sin ajuste. Pero, a su vez, hizo que el material se concentre en los dos primeros tercios de cada lado del centro, y el último tercio quedó con muy poco material, generando un ALE que determina una capacidad operativa baja. Si bien no fue realizado, se debería modificar el punto de entrega del material sobre los platos (éste se encontraba en un punto medio entre el centro y el extremo del plato), desplazándolos hacia el centro del plato. Esta acción generaría que el material acumulado cerca del centro sea distribuido de forma más uniforme hacia los laterales, aumentando así el ancho de labor efectivo, por disminución del promedio y la tolerancia mínima.

Consideraciones finales

La distribución de un fertilizante o enmienda sobre el terreno varía con el tipo de producto, las condiciones ambientales y el equipo aplicador. Es necesario conocer las propiedades de los fertilizantes, y tener en cuenta que existen importantes diferencias entre fertilizantes e incluso entre partidas de un mismo producto. Por otra parte, debe conocerse el funcionamiento de la fertilizadora y saber que pueden realizarse regulaciones en la misma para mejorar la distribución de los fertilizantes. Es por esto que, para lograr una aplicación de calidad, es decir, distribuir el fertilizante uniformemente sobre el terreno y a la dosis deseada, se requiere la calibración de la fertilizadora de forma periódica.

Bibliografía

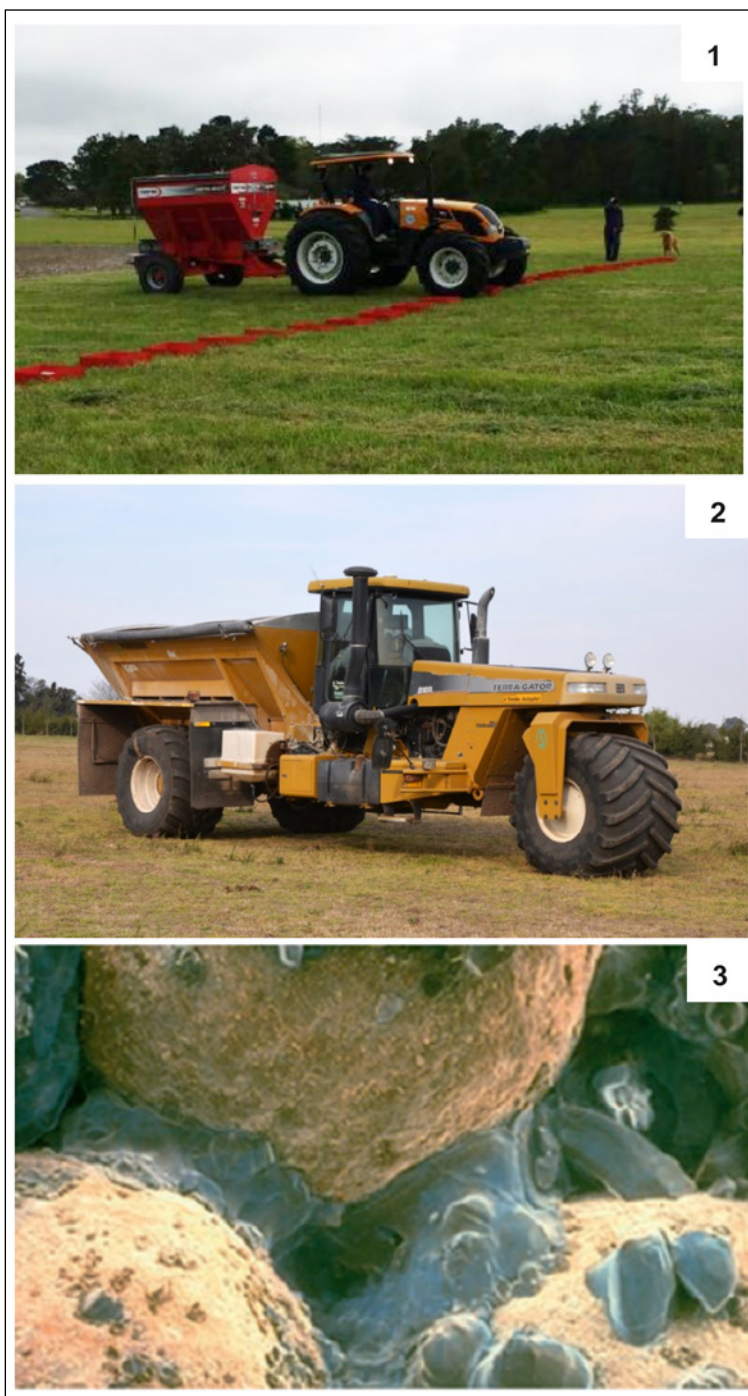
- Broder, M.F., y H.L. Balay. 1983. Effect of granule size on application. Proceedings of 33rd Annual Meeting of the Fertilizer Industry Round Table, (Spillman, J., ed.) pp. 90-96.
- Fertilizer Manual. 1998. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and International Fertilizer Development Center (IFDC). 615 p.
- Hofstee, J.W., y W. Huisman. 1990. Handling and spreading of fertilizers part 1: physical properties of fertilizer in relation to particle motion. Journal of Agricultural Engineering Research, 47:213-234.

Márquez, L. 2011a. La tecnología en abonadoras de proyección. Parte 2. Evaluación de las abonadoras en La uniformidad de distribución. Agrotécnica (4). pp 3-44.

Márquez, L. 2011b. La tecnología en abonadoras de proyección. Parte 1. La uniformidad de distribución. Agrotécnica (3). pp 38-44.

Morsy, H.A., J. Paliwal, A. Abouelmagd, H. Hedia, y Z. Ismail. 2012. Some properties of fertilizers in relation to particle motion in the hopper and on the distribution disc. 19th. Annual Conference of the Misr Soc. of Ag. Eng., 14-15 November, 2012. pp. 447-458.

Yule, I.J. 2011, The Effect of Fertiliser Particle Size on Spread Distribution. En: Adding to the Knowledge Base for the Nutrient Manager. (Eds L.D. Currie and C.L. Christensen). Occasional Report No. 24. Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, Palmerston North, New Zealand: ISSN 0112-9902, 10 p.



Descripción de las Fotos:

- 1. Fertilizadora Fertec Fertil 3000 de doble disco.
- 2. Fertilizadora autopropulsada Terra-Gator 8103 de doble disco.
- 3. Puentes cristalinos entre partículas de fertilizantes causando apelmazamiento. Fuente: Yara.

Efectividad de cales granuladas en el manejo de dos suelos ácidos

Juan Hirzel¹, Roberto Lecannelier², Emilio Cuevas² y Francisco Rodríguez³

- La hipótesis de este estudio fue que el uso de CaCO_3 granulado es una alternativa eficiente para corregir acidez en suelos volcánicos agrícolas.
- Los resultados mostraron que, en suelos Andisoles y Ultisoles, el uso de CaCO_3 granulado aumentó el pH en forma similar al CaCO_3 en polvo, pero con el uso de una dosis menor.
- En términos cuantitativos hubo mayor efecto del CaCO_3 granulado en el suelo Andisol respecto del Ultisol.

Introducción

La fertilidad de un suelo es un concepto amplio que involucra propiedades físicas, químicas y biológicas (Havlin et al., 1999; Baldi et al., 2006). El uso continuo del suelo sin prácticas de conservación conduce a la pérdida paulatina de sus propiedades; entre ellas, un menor contenido de bases o incremento de la acidez, y de otros nutrientes esenciales como P, N, S y micronutrientes (Hirzel et al., 2007; Hirzel et al., 2010; Castro y Crusciol, 2013). La acidez del suelo está asociada con las concentraciones de Al e H^+ , y la disponibilidad de bases de intercambio como Ca, Mg, K y Na, las cuales contrarrestan esta acidez (Castro y Crusciol, 2013; Fageria y Nascente, 2014; Fageria et al., 2014; Moreira et al., 2015).

La superficie mundial afectada por la acidez del suelo se estima en 30% del área total cultivada y corresponde a 4×10^9 ha (Sumner y Noble, 2003). Esta acidificación es el resultado de varios factores, dentro de los cuales se señalan: la lixiviación de bases (asociada a la pluviometría y el riego); deposición ácida desde la atmósfera (la combustión de derivados del petróleo contamina la lluvia con ácido sulfúrico y nítrico); uso de fertilizantes amoniacales (producción de H^+ a través del proceso de nitrificación) (Caires et al., 2015); generación de protones en el suelo (derivados del ciclo del C, N, y S); acidez fisiológica (proceso inducido por la planta asociado al consumo de bases y liberación de H^+ como reemplazo de carga en el suelo); fijación de N en plantas leguminosas (exportación de H^+ en la zona rizosférica durante el proceso de fijación simbiótica); mineralización de la materia orgánica (MO) (liberación de ácidos orgánicos como resultado del proceso de mineralización); y reducción y oxidación de sulfatos (transformación de sulfatos y sulfuros en pirita (FeS_2) y luego en ácido sulfúrico) (Fageria y Nascente, 2014).

La acidez del suelo se puede dividir en tres componentes: (a) acidez activa que corresponde a la actividad de los

iones H^+ en la solución del suelo expresados en una escala logarítmica; (b) acidez intercambiable definida por la cantidad de Al^{3+} adsorbida a coloides del suelo; y (c) acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$), que corresponde a la suma de la acidez activa y de la acidez intercambiable (Havlin et al., 1999; Ebeling et al., 2011; Moreira et al., 2015).

La principal estrategia de manejo y control de la acidez es el encalado, es decir la aplicación de carbonato (CO_3) de calcio, el cual además tiene otros beneficios directos, como el incremento en la concentración de bases y nutrientes disponibles como N, P, S y Mo. Además, el encalado mejora la fijación simbiótica de N_2 , y reduce la disponibilidad de iones que en alta concentración son tóxicos para las plantas como el Al, Fe y Mn (Bachiega et al., 2007; Fageria y Nascente, 2014; Moreira et al., 2015).

Para conseguir una rápida solubilidad y disponibilidad del carbonato, y también dar facilidad de aplicación, se han desarrollado productos granulados que facilitan la aplicación con equipos convencionales de fertilización, y que, en contacto con agua, presentan una rápida solubilidad y control de la acidez.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dosis crecientes de dos enmiendas calcáreas granuladas comerciales en el aumento de pH y concentración de bases, y en la disminución del Al intercambiable y extractable en dos suelos ácidos de la zona sur de Chile. La hipótesis de este estudio fue que el uso de CaCO_3 granulado es una alternativa eficiente para corregir acidez en suelos volcánicos.

Materiales y métodos

Los suelos empleados en el experimento fueron colectados a una profundidad de 0 a 20 cm, en el sur de Chile cultivados con rotación de trigo (*Triticum aestivum* L.) y avena (*Avena sativa* L.). El primer suelo colectado fue Andisol con textura franco limosa (Melanudands) ($39^{\circ}02'18''$ N y $72^{\circ}30'18''$ O), y el segundo un Ultisol

¹ Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Quilamapu. Chillán, Chile
Correo electrónico: jhirzel@inia.cl

² Empresa ANAGRA S.A., Departamento de Desarrollo e Investigación. Santiago, Chile
Correo electrónico: rlecannelier@anagra.cl, ecuevas@anagra.cl

³ Universidad del Bío-Bío, Facultad de Educación y Humanidades, Departamento Ciencias de la Educación, Chillán, Chile
Correo electrónico: frodriguez@ubiobio.cl

(38°59'14" N y 73°02'20" O), con textura franco arcillosa (Rhodudults). La determinación de las propiedades químicas fue realizada de acuerdo a la metodología indicada por la Comisión Nacional de Acreditación de Análisis de Suelo de Chile (Sadzawka et al., 2006). La textura del suelo fue determinada a través del método del hidrómetro de Bouyoucos, la humedad fue determinada por gravimetría expresando los resultados en base a peso seco, y la densidad aparente fue determinada a través del método del cilindro (**Tabla 1**).

El experimento fue desarrollado en condiciones aeróbicas controladas, con incubación de suelos a 25 °C y 80% de la humedad aprovechable, como una modificación del método señalado por Laos et al. (2000). Se emplearon potes plásticos de 500 ml de capacidad, a los cuales se les agregaron 300 g de suelo seco y tamizado a 2 mm, y los tratamientos de enmiendas calcáreas y calcáreas-magnésicas, con reposición de humedad cada 2 días. El periodo de incubación fue de 32 días en una cámara incubadora refrigerada (FOC 225E, Velp Scientifica, Usmate, Italia). Las dosis de cada tratamiento empleado fueron determinadas por regla de tres simple, considerando la masa de cada suelo en los primeros 20 cm de profundidad, ajustando por la densidad aparente específica (**Tabla 1**).

Los tratamientos evaluados fueron:

- 1) Control sin enmienda cálcica (Control).
- 2) CaCO₃ granulado (CaCO₃-G) (Calciprill® 110-SZ, 91% de CaCO₃; 2% de MgCO₃ y 5% de H₂O) en dosis equivalente a 250 kg ha⁻¹ (CaCO₃-G 250).
- 3) CaCO₃-G (Calciprill® 110-SZ) en dosis equivalente a 500 kg ha⁻¹ (CaCO₃-G 500).
- 4) CaCO₃-G (Calciprill® 110-SZ) en dosis equivalente a 1000 kg ha⁻¹ (CaCO₃-G 1000).
- 5) CaCO₃*MgCO₃ granulado (CaMgCO₃-G) (Magprill® 90-SZ, 68% de CaCO₃, 25% de MgCO₃ y 2% de H₂O) en dosis equivalente a 250 kg ha⁻¹ (CaMgCO₃-G 250).

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de los suelos (0 - 20 cm) previo al inicio del experimento.

Parámetro	Andisol	Ultisol
Arcilla (%)	14.8	37.9
Limo (%)	52.1	32.5
Arena (%)	33.1	29.6
Humedad gravimétrica a 0.33 bares	26.8	27.4
Humedad gravimétrica a 15.00 bares	13.7	17.2
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0.85	1.05
pH _(suelo:agua 1:5)	5.55	5.66
MO (g kg ⁻¹)	186.0	88.0
N disponible (mg kg ⁻¹)	62.7	28.8
P Olsen (mg kg ⁻¹)	25.2	24.3
K intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	0.85	0.42
Ca intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	5.09	5.23
Mg intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	1.20	1.01
Na intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	0.07	0.10
Suma de bases de intercambio (cmol ₊ kg ⁻¹)	7.21	6.76
Al intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	0.130	0.126
Saturación de Al (%)	1.77	1.83
Fe disponible (mg kg ⁻¹)	104.4	44.3
Mn disponible (mg kg ⁻¹)	20.7	31.5
Zn disponible (mg kg ⁻¹)	1.3	0.6
Cu disponible (mg kg ⁻¹)	1.8	1.4
B disponible (mg kg ⁻¹)	0.4	0.5
S disponible (mg kg ⁻¹)	24.3	29.6

Tabla 2. Grado de fineza y solubilidad de las enmiendas calcáreas y calcáreas-magnésicas empleadas.

Grado de fineza mm	Distribución de partículas dentro de cada grado de fineza, %			
	CaCO ₃ -G	CaMgCO ₃ -G	CaCO ₃ polvo	CaMgCO ₃ polvo
> 4	44.20	11.20	0.00	0.00
3.9 - > 2	55.41	86.91	0.94	0.10
1.9 - > 1	0.17	1.00	1.04	0.42
0.9 - > 0.5	0.11	0.71	2.00	3.96
0.49 - > 0.25	0.07	0.08	72.18	31.12
< 0.25	0.04	0.10	23.84	64.40
Solubilidad (g l ⁻¹)*	0.5	0.3	0.2	0.2

* Gramos por litro en agua destilada a 17 °C.

Tabla 3. Niveles de significancia para los parámetros evaluados en el experimento.

Parámetro	Suelo S	Tratam. F	Interacción S*F
pH	**	**	*
Ca (cmol ₊ kg ⁻¹)	**	**	*
Mg (cmol ₊ kg ⁻¹)	**	**	*
K (cmol ₊ kg ⁻¹)	**	ns	**
Na (cmol ₊ kg ⁻¹)	**	ns	ns
SB* (cmol ₊ kg ⁻¹)	**	**	**
Al int** (cmol ₊ kg ⁻¹)	**	**	**
Sat. Al*** (%)	**	**	**
Al ext**** (mg kg ⁻¹)	**	**	**

* SB: Suma de bases (Ca + Mg + K + Na)

** Al int: Al de intercambio

*** Sat. Al: Saturación de Al = [Al/(SB + Al)] * 100

**** Al ext: Al extractable

- 6) CaMgCO₃-G (Magprill® 90-SZ) en dosis equivalente a 500 kg ha⁻¹ (CaMgCO₃-G 500).
- 7) CaMgCO₃-G (Magprill® 90-SZ) en dosis equivalente a 1000 kg ha⁻¹ (CaMgCO₃-G 1000).
- 8) CaCO₃ polvo (Soprocal®, 91% de CaCO₃ y 0,5% de H₂O) en dosis equivalente a 1000 kg ha⁻¹ (CaCO₃ 1000).
- 9) CaCO₃*MgCO₃(CaMgCO₃) polvo (Dolomita comercial, 58% de CaCO₃, 37% de MgCO₃ y 1% de H₂O) en dosis equivalente a 1000 kg ha⁻¹ (CaMgCO₃ 1000).

La fineza (mallaje) y solubilidad de cada una de las enmiendas calcáreas que se utilizó se indica en la **Tabla 2**. Las enmiendas de CaCO₃ y CaMgCO₃ en polvo presentaron una proporción mayor a 95% de partículas < 1 mm, en tanto las enmiendas de CaCO₃-G y CaMgCO₃-G (granuladas) presentaron una proporción mayor a 98% de granulometría > 2 mm (**Tabla 2**). La mayor solubilidad en agua destilada se presentó en CaCO₃-G seguido de CaMgCO₃-G, y la menor solubilidad se presentó en las enmiendas calcáreas en polvo (**Tabla 2**).

Después de la aplicación de cada tratamiento se mezcló homogéneamente el suelo dentro de cada pote. Cada tratamiento contó con tres réplicas. Los parámetros analizados al término de la incubación, fueron pH al agua, concentración de Ca, Mg, K, Na y Al intercambiable, suma de bases (SB) (Ca + Mg + K + Na intercambiables), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe = SB + Al intercambiable), saturación de Al (Al intercambiable/CICe * 100) y Al extractable. Los análisis químicos fueron realizados de acuerdo a la metodología indicada por la Comisión Nacional de Acreditación de Análisis de Suelo de Chile (Sadzawka et al., 2006).

El diseño experimental fue de parcelas divididas, donde la parcela principal fue el suelo y la sub-parcela el tratamiento

de enmienda calcárea. Los resultados fueron sometidos a análisis de varianza y las diferencias de medias fueron analizadas con el test de Tukey para un 5% de significancia. Se incluyó también un análisis de regresión para las asociaciones Al extractable-pH, Saturación de Al-pH y pH-SB. Para todos estos análisis se empleó el software SAS System versión 6.0 (SAS Institute, 1989). Para estimar el poder relativo neutralizante total (PRNT) de los productos CaCO₃-G y CaMgCO₃-G en cada suelo se evaluó el aumento de pH logrado con las dosis equivalentes a 1000 kg ha⁻¹, respecto del control y respecto del aumento logrado con el uso de CaCO₃ comercial de referencia (presentación en polvo). La fórmula de cálculo para estimar el PRNT se presenta en la siguiente ecuación (**Ec. 1**):

$$\text{PRNT} = \frac{[(\text{pH tratamiento}(1000 \text{ kg ha}^{-1}) - \text{pH control}) / (\text{pH CaCO}_3 \text{ polvo}(1000 \text{ kg ha}^{-1}) - \text{pH control})] \times 100}{\text{Ec. 1}}$$

Resultados y discusión

Características de acidez de cada suelo evaluado

Los suelos Andisol y Ultisol empleados presentaron un nivel moderado y levemente ácido de pH, respectivamente (**Tabla 1**), y en ambos casos una saturación de Al⁺³ sin limitación para la mayoría de las plantas cultivadas (Havlin et al., 1999). Esta baja saturación de Al⁺³ está asociada a la suma de bases moderada presentada en ambos suelos (**Tabla 1**), la cual permite contrarrestar el efecto del Al intercambiable en el suelo (Fageria y Nascente, 2014).

Análisis de significancia

Se observó un efecto altamente significativo de cada suelo sobre todos los parámetros evaluados ($p < 0.01$) (**Tabla 3**). Los tratamientos de enmiendas calcáreas afectaron todos los parámetros evaluados ($p < 0.01$), excepto las concentraciones de K y Na intercambiable ($p > 0.05$). Las interacciones entre suelos y tratamientos también fueron significativas ($p < 0.05$) para todos los parámetros evaluados, excepto para el Na intercambiable ($p > 0.05$), lo cual indica un comportamiento diferente de cada suelo frente a los tratamientos evaluados. Por tanto, para separar el efecto significativo del suelo y de la interacción Suelo x Tratamiento, se evaluó el efecto de las enmiendas calcáreas en cada suelo por separado como un diseño de bloques al azar.

Suelo Andisol

En general, el pH obtenido en todos los tratamientos al término del periodo de incubación fue inferior en relación al valor inicial (**Tabla 1 y Figura 1a**). Al respecto, se ha descrito que el proceso de mineralización de la MO presente en el suelo durante un periodo de incubación, libera ácidos orgánicos y protones H⁺, los cuales contribuyen a reducir el pH respecto del valor inicial (Fageria y Nascente, 2014), y este efecto es particularmente mayor en un suelo Andisol asociado su alto contenido de MO. El pH del suelo presentó un incremento cuantitativo directamente proporcional a las dosis de enmiendas calcáreas empleadas, excepto con el

uso de CaMgCO_3 1000 (Figura 1a) y un alto error estándar en algunas medias. Los tratamientos que lograron el mayor pH y que a su vez superaron al control fueron $\text{CaCO}_3\text{-G}$ 1000, $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$ 500, $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$ 1000 y CaCO_3 1000 ($p < 0.05$) (Figura 1a). A su vez, el pH obtenido con el uso de $\text{CaCO}_3\text{-G}$ 500 y CaMgCO_3 1000 fue similar al logrado con los tratamientos antes mencionados. Estos resultados indican que el uso de $\text{CaCO}_3\text{-G}$ y $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$ ambos en dosis de 500 kg ha^{-1} , permiten lograr el mismo pH que se obtuvo con la cal de referencia comercial (CaCO_3) en dosis de 1000 kg ha^{-1} . Este efecto puede estar explicado por la mayor solubilidad y reactividad de ambas enmiendas calcáreas granuladas, como ha sido reportado por Castro

y Cruciol (2013).

La concentración de Ca intercambiable (Figura 1b) también presentó un incremento cuantitativo directamente proporcional a las dosis de enmiendas calcáreas empleadas, sin embargo, sólo el uso de $\text{CaCO}_3\text{-G}$ en dosis de 500 y 1000 kg ha^{-1} , y el uso de CaCO_3 y CaMgCO_3 en polvo (ambas en dosis de 1000 kg ha^{-1}) lograron superar al control ($p < 0.05$). Este incremento está asociado a la solubilidad y dosis empleadas de las enmiendas calcáreas granuladas y en polvo. Resultados similares han sido reportados por Castro y Cruciol (2013) y Moore y Quimet. (2014).

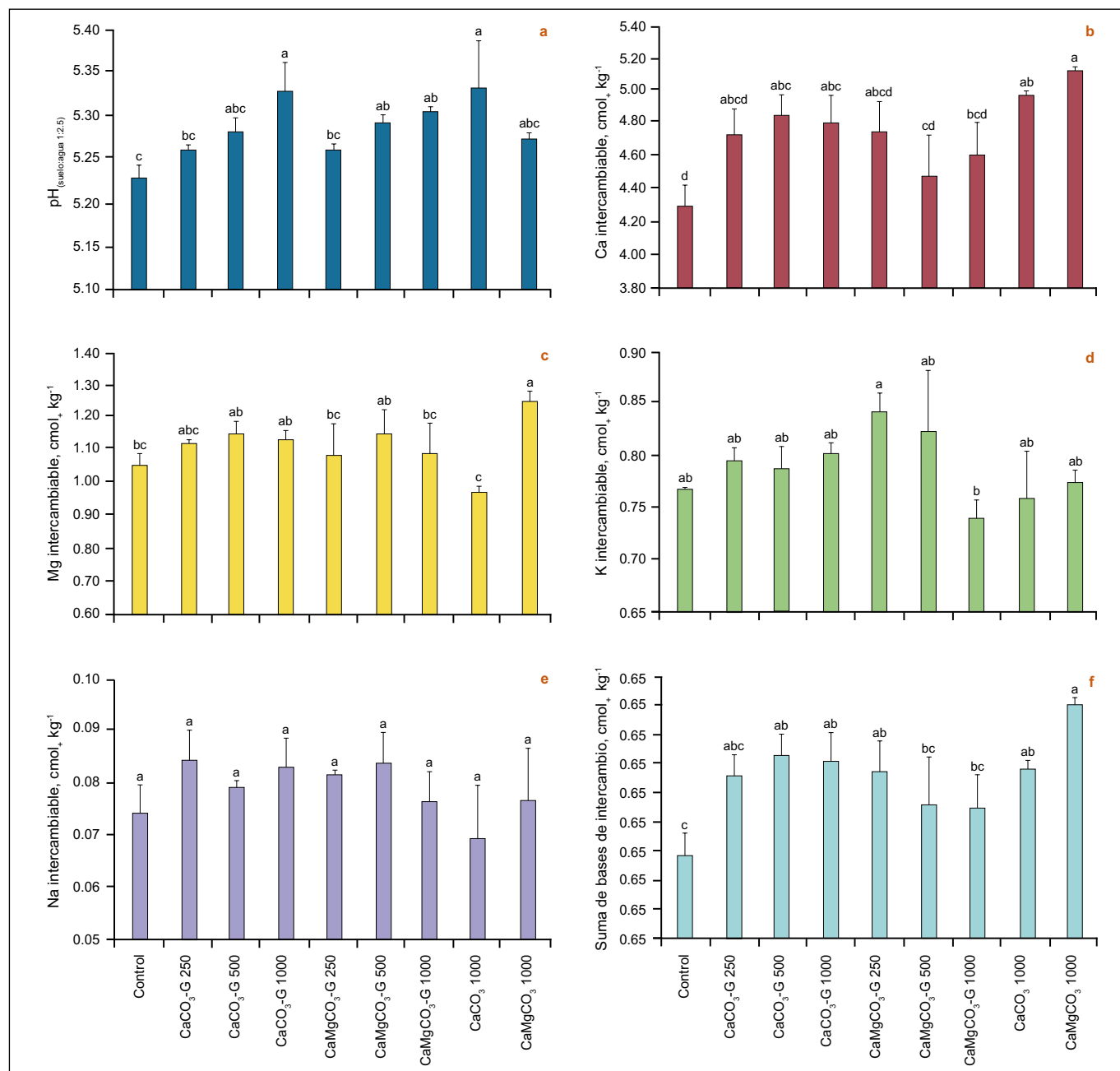


Figura 1. Propiedades químicas del suelo Andisol al término del periodo de incubación en condiciones aeróbicas controladas (25 °C y 80% humedad aprovechable): a) pH, b) Ca intercambiable, c) Mg intercambiable, d) K intercambiable, e) Na intercambiable, f) suma de bases, g) Al intercambiable, h) saturación de Al, y i) Al extractable. Letras distintas sobre las barras indican diferencia significativa según el test de Tukey ($p < 0.05$). Líneas verticales sobre las barras indican el error estándar. $\text{CaCO}_3\text{-G}$: CaCO_3 granulado en dosis de 250, 500 y 1000 kg ha^{-1} ; $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$ 250: CaMgCO_3 granulado en dosis de 250, 500 y 1000 kg ha^{-1} ; CaCO_3 1000: CaCO_3 polvo en dosis de 1000 kg ha^{-1} ; CaMgCO_3 1000: CaCO_3 polvo en dosis de 1000 kg ha^{-1} .

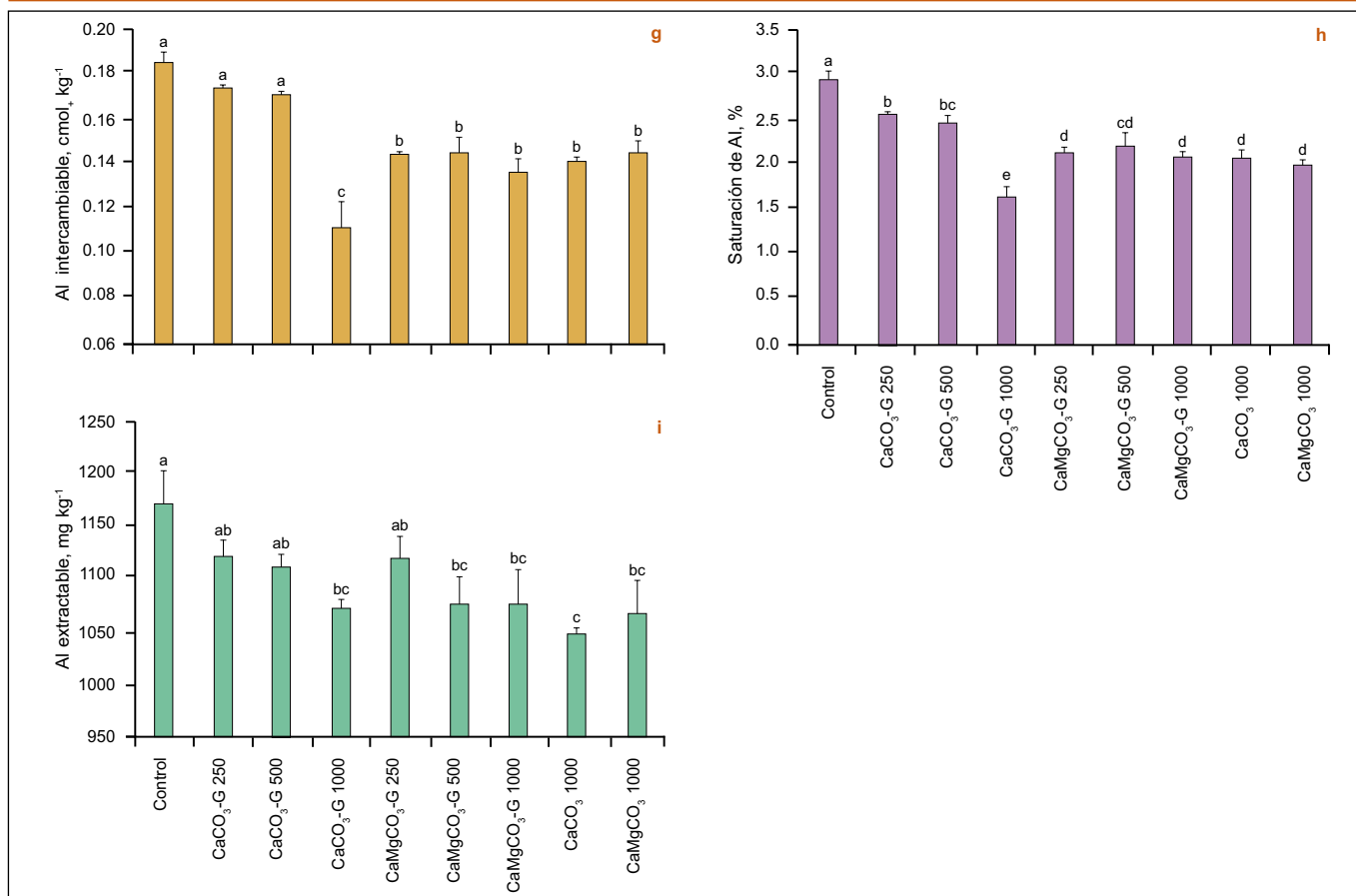


Figura 1. Continuación ...

Para la concentración de Mg intercambiable (**Figura 1c**) se observó un aumento cuantitativo asociado a la dosis empleada en la mayoría de las enmiendas calcáreas que aportan este elemento (CaCO₃-G, CaMgCO₃-G y CaCO₃ polvo). No obstante, sólo el uso de CaMgCO₃ polvo (1000 kg ha⁻¹) logró superar la concentración de Mg intercambiable del control, probablemente asociado a la dosis de Mg aplicada (37% de MgCO₃). Incrementos en la concentración de Mg con el uso de cal dolomítica han sido también reportados por Bachiega et al. (2007) y Moore y Ouimet (2014). También hubo una reducción de la concentración de Mg intercambiable en algunos tratamientos respecto del valor inicial (**Tabla 1**). Esta reducción fue más pronunciada con el uso de CaCO₃ 1000, probablemente asociado a la competencia Ca-Mg y a la reducción del pH (generación de H⁺) producto de los procesos de mineralización de MO (Fageria y Nascente, 2014).

La concentración de K intercambiable (**Figura 1d**) sólo presentó diferencias entre los tratamientos CaMgCO₃-G 250 y CaMgCO₃-G 1000, siendo mayor en el primero de éstos (p < 0.05). En general, la aplicación de dosis crecientes de enmiendas calcáreas genera una reducción en la concentración de K intercambiable del suelo, asociado a procesos de intercambio de cationes (Havlin et al., 1999; Bachiega et al., 2007; Moore y Ouimet, 2014). Esta reducción fue también observada en la mayoría de los tratamientos respecto del valor inicial del suelo (**Tabla 2**). En contraste a lo anterior, Castro y Cruciol

(2013) indican un incremento en la concentración de K intercambiable sólo en la zona superficial de un suelo oxisol ácido de Brasil, después de 18 meses de aplicadas dos enmiendas calcáreas (silicato de Ca y dolomita).

Para la concentración de Na intercambiable (**Figura 1e**) no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (p < 0.05), probablemente asociado al alto error estándar obtenido. A su vez, las concentraciones de Na fluctuaron entre 0.07 y 0.08 cmol₊ kg⁻¹ (**Figura 1e**), lo cual fue muy similar a la concentración inicial presente en el suelo (**Tabla 1**). Moore y Ouimet (2014) reportaron resultados similares.

La SB (**Figura 1f**) presentó un comportamiento muy similar al obtenido para el Ca intercambiable (**Figura 1b**), dado que el Ca es el principal catión en términos cuantitativos en la SB de este suelo Andisol (70.6% de la SB) (**Tabla 1**). La mayor SB se obtuvo en los tratamientos CaMgCO₃ polvo, CaCO₃ polvo, CaCO₃-G 500, CaCO₃-G 1000 y CaMgCO₃-G 250 (**Figura 1f**), que fueron mayores al control (p < 0.05). A su vez, llama la atención la diferencia obtenida entre el control y el uso de CaMgCO₃-G 250 por la baja dosis de enmienda empleada, probablemente asociado al error estándar obtenido. Incrementos en la SB frente al uso de enmiendas calcáreas han sido también reportados por Castro y Cruciol (2013).

El Al de intercambio (**Figura 1g**) presentó una concentración inferior al control (p < 0.05) sólo con el uso de CaCO₃-G 1000, CaMgCO₃-G en todas sus dosis, CaCO₃

polvo y CaMgCO_3 polvo. La menor concentración de Al se logró con el uso de $\text{CaCO}_3\text{-G}$ 1000, que a su vez fue inferior a los valores obtenidos con $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$ en todas sus dosis, CaCO_3 polvo y CaMgCO_3 polvo ($p < 0.05$). El uso de $\text{CaCO}_3\text{-G}$ en dosis de 250 y 500 kg ha^{-1} no logró diferir del control ($p > 0.05$), probablemente asociado a la dosis empleada y al menor poder corrector de la acidez que presenta el Ca respecto del Mg, como ha sido señalado por Fageria y Nascente (2014). Reducciones en la concentración de Al de intercambio asociado al encalado de suelo han sido reportadas también por Caires et al. (2015), con un efecto significativo hasta 40 cm de profundidad.

La saturación de Al (Figura 1h) presentó un comportamiento similar al observado en el Al de intercambio (Figura 1g). Todos los tratamientos lograron reducir la saturación de Al respecto del control ($p < 0.05$), sin embargo el menor valor se logró con el uso de $\text{CaCO}_3\text{-G}$ 1000, probablemente asociado a la mayor solubilidad respecto de las enmiendas de referencia (Tabla 2). Un aumento en la saturación de Al respecto del valor inicial (Tabla 1) fue observado principalmente en el control, y en algunos tratamientos con baja y moderada dosis de enmienda cálcica, asociado a la generación de acidez con el proceso de incubación de suelo (Fageria y Nascente, 2014), anteriormente ya discutido.

Para el Al extractable (Figura 1i), la menor concentración se obtuvo con el uso de CaCO_3 1000 (polvo), $\text{CaCO}_3\text{-G}$ 1000, $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$ 250 y 500, y CaMgCO_3 1000 (polvo), que fueron diferentes del control ($p < 0.05$) (Figura 1i). Se habría esperado un efecto similar al obtenido en el Al de intercambio (Figura 1g), sin embargo el Al extractable presentó un relación más estrecha con las dosis de enmiendas calcáreas utilizadas (Figura 1i).

Las relaciones Al extractable-pH y saturación de Al-pH fueron inversamente proporcionales, altamente significativas y con coeficientes de determinación moderados que validan el modelo lineal planteado (Figuras 2a y 2b), mostrando la dependencia entre estas variables en este suelo Andisol. En contraste, no hubo correlación lineal entre el pH y la SB para este suelo (Figura 2c). Lo anterior puede estar explicado porque el pH determinado en este experimento (pH al agua) es una medida de la acidez activa del suelo (actividad de los iones H^+ en la solución del suelo), en tanto que la SB tiene mayor relación con la acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$) (Havlin et al., 1999; Ebeling et al., 2011; Moreira et al., 2015). Como ejemplo de lo anterior, Fageria y Nascente (2014) presentan un estudio descriptivo y comparativo de suelos desde dos valles de Brasil, en los cuales el pH al agua es similar (5.2 y 5.3), en tanto que la saturación de bases (SB/capacidad de intercambio catiónico * 100) es muy diferente (17% y 50%, respectivamente).

Suelo Ultisol

Al igual que en el suelo Andisol (Figura 1a), para el suelo Ultisol se observó un incremento de pH directamente

proporcional a las dosis de las enmiendas calcáreas empleadas (Figura 3a). No obstante, en el suelo Ultisol se obtuvo un aumento de pH respecto al control mayor al observado en el suelo Andisol (Figuras 1a y 3a), asociada a la diferencia de capacidad tampón de cada suelo (Havlin et al., 1999; Fageria y Nascente, 2014) (Tabla 1 y Tabla 3). Los tratamientos que lograron el mayor pH y que a su vez superaron al control fueron $\text{CaCO}_3\text{-G}$ 500 y 1000, $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$ 1000, CaCO_3 1000, y CaMgCO_3 1000 ($p < 0.05$) (Figura 3a). A su vez, el pH obtenido con el uso de $\text{CaCO}_3\text{-G}$ en dosis de 500 y 1000 kg ha^{-1} , y CaMgCO_3 en dosis de 500 y 1000 kg ha^{-1} fue similar al logrado con CaCO_3 y CaMgCO_3 en polvo, ambos en dosis de 1000 kg ha^{-1} . Estos resultados indican que el uso de $\text{CaCO}_3\text{-G}$ y $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$, ambos en dosis de 500 kg ha^{-1} , permiten lograr el mismo pH que se obtuvo con la cal de referencia comercial (CaCO_3) en dosis de 1000 kg ha^{-1} , efecto anteriormente discutido.

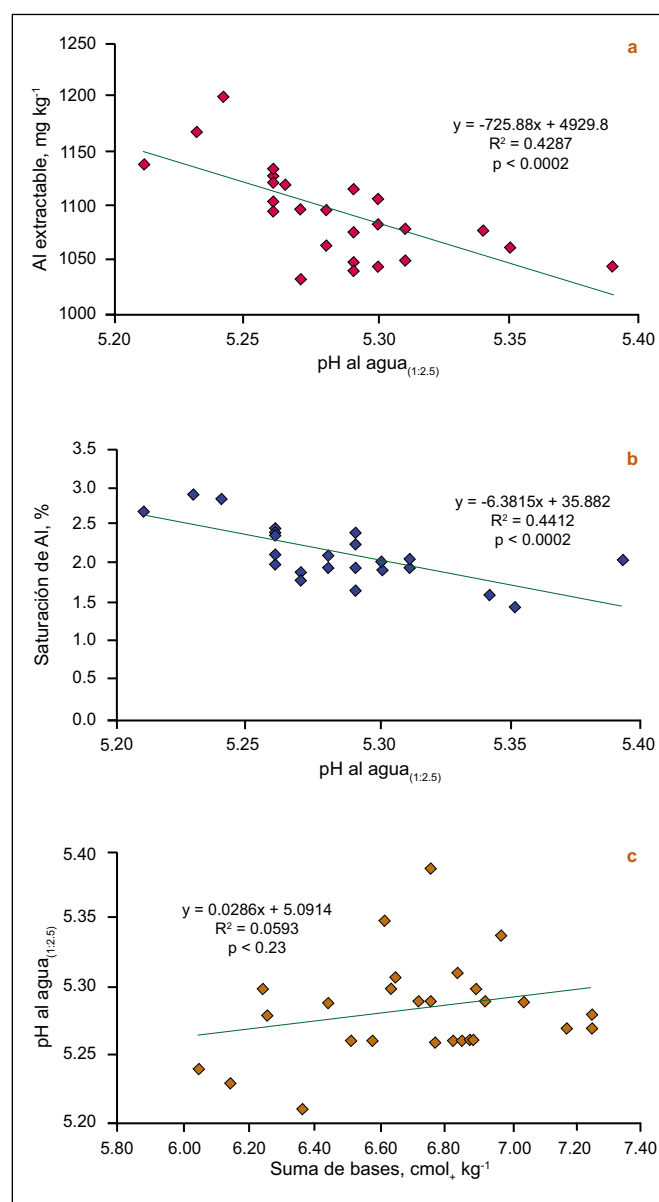


Figura 2. Regresiones lineales entre: a) Al extractable-pH, b) saturación de Al-pH, y c) pH-suma de bases, en el suelo Andisol al término del periodo de incubación en condiciones aeróbicas controladas (25 °C y 80% humedad aprovechable).

La mayor concentración de Ca intercambiable (**Figura 3b**) se obtuvo con el uso de CaCO_3 1000, que sólo superó al control y a las enmiendas CaCO_3 -G en dosis de 250 y 500 kg ha^{-1} , y CaMgCO_3 -G en dosis de 250 kg ha^{-1} ($p < 0.05$). Al respecto, Moore y Ouimet (2014) reportaron que no hubo diferencia significativa en las concentraciones de Ca intercambiable en la zona superficial de un suelo franco arenoso de uso forestal en Canadá, después de 15 años de la aplicación de CaMgCO_3 (22% de Ca y 12% de Mg) en dosis de 1000 kg ha^{-1} .

El Mg intercambiable (**Figura 3c**) no presentó diferencias entre tratamientos ($p > 0.05$). En general, con el uso de enmiendas calcáreas que aportaron Mg en cantidades

considerables (CaMgCO_3 -G y CaMgCO_3 en polvo en dosis de 500 y 1000 kg ha^{-1} , respectivamente), se observó un incremento cuantitativo de la concentración de Mg intercambiable respecto del valor inicial (**Tabla 1 y Figura 3c**). Sin embargo, no se observó dicho incremento con el uso de CaMgCO_3 -G en dosis de 1000 kg ha^{-1} .

La concentración de K intercambiable (**Figura 3d**) fue mayor en los tratamientos CaMgCO_3 -G 1000 y CaMgCO_3 1000, que sólo superaron a CaCO_3 -G 500, CaCO_3 -G 1000 y CaMgCO_3 -G 250 ($p < 0.05$). A su vez, los valores obtenidos fueron similares al valor inicial del suelo (**Tabla 1**). En este suelo no se observó la reducción en la concentración de K constatada en el suelo Andisol (**Figura 1d**), atribuida

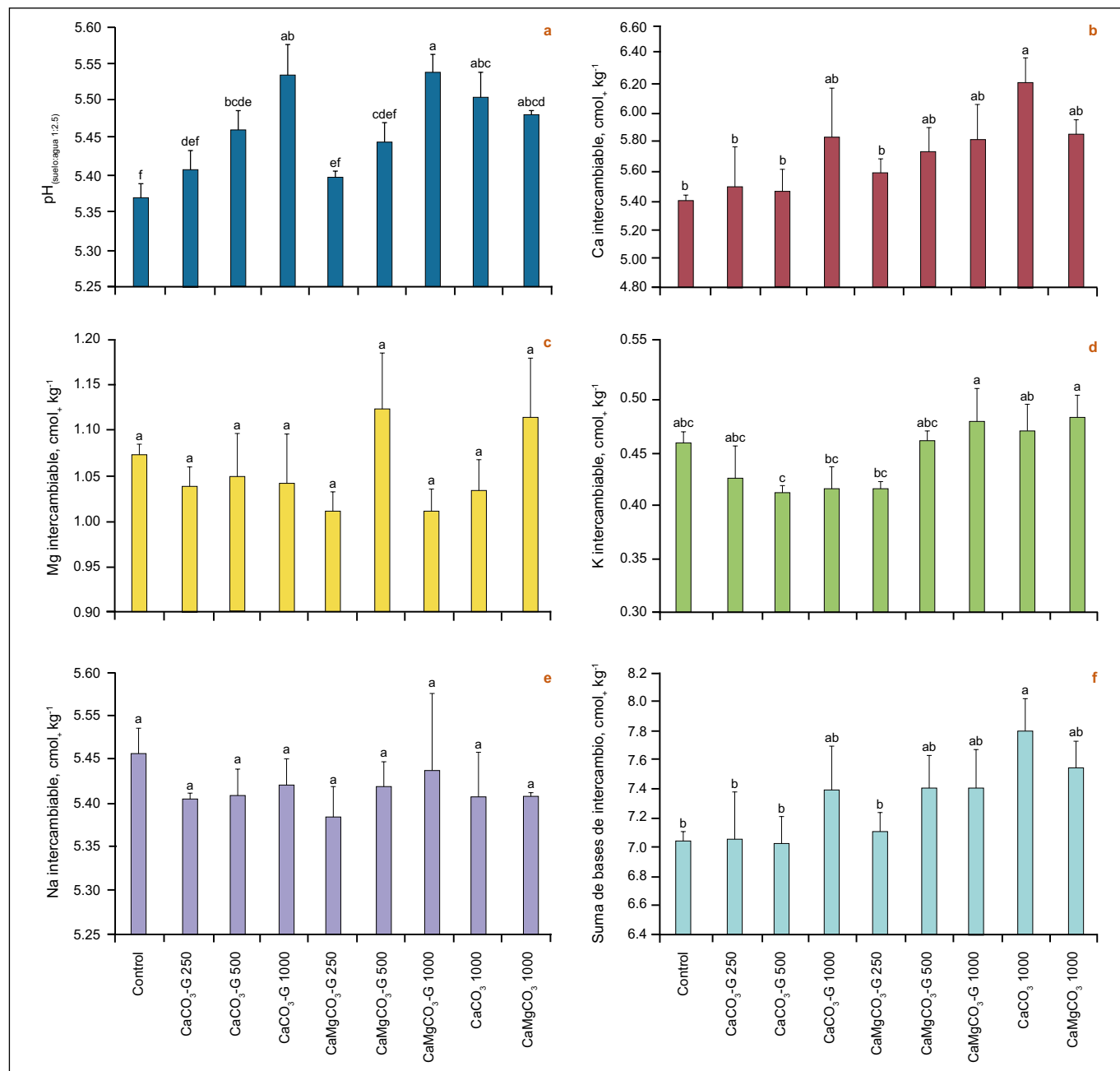


Figura 3. Propiedades químicas en el suelo Ultisol al término del periodo de incubación en condiciones aeróbicas controladas (25 °C y 80% humedad aprovechable); a) pH, b) Ca intercambiable, c) Mg intercambiable, d) K intercambiable, e) Na intercambiable, f) suma de bases de intercambio, g) Al intercambiable, h) saturación de Al, i) Al extractable. Letras distintas sobre las barras indican diferencia significativa según test de Tukey ($p < 0.05$). Líneas verticales sobre las barras indican el error estándar. CaCO_3 -G: CaCO_3 granulado en dosis de 250, 500 y 1000 kg ha^{-1} ; CaMgCO_3 -G 250: CaMgCO_3 granulado en dosis de 250, 500 y 1000 kg ha^{-1} ; CaCO_3 1000: CaCO_3 polvo en dosis de 1000 kg ha^{-1} ; CaMgCO_3 1000: CaCO_3 polvo en dosis de 1000 kg ha^{-1} .

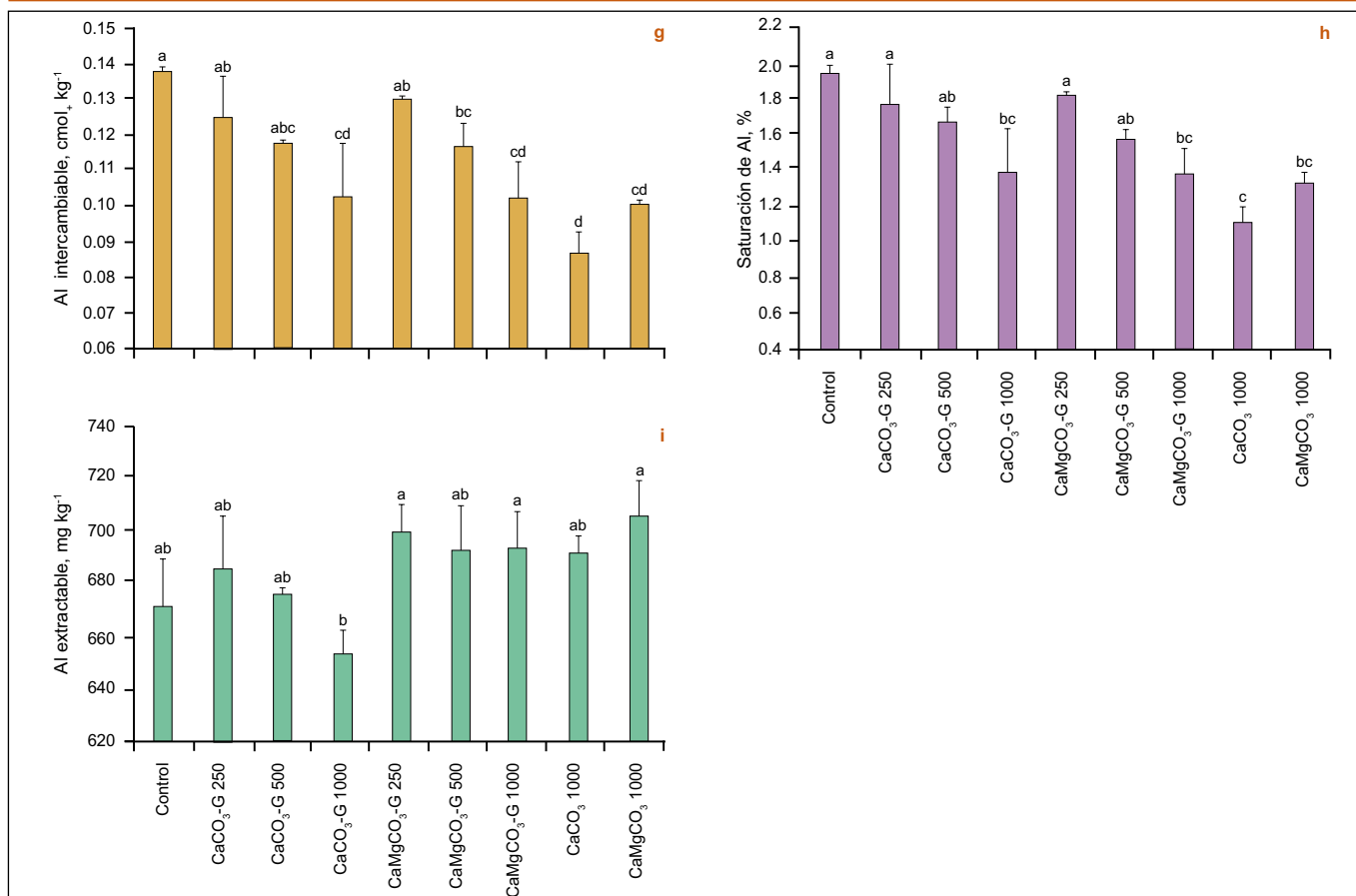


Figura 3. Continuación ...

a procesos de competencia e intercambio de cationes (Havlin et al., 1999; Bachiega et al., 2007). Dado que las mayores concentraciones de K obtenidas en algunos tratamientos con enmiendas calcáreas fueron similares al control ($p > 0.05$), tampoco se puede inferir efectos de las enmiendas sobre aumentos en este nutriente, como fue reportado por Castro y Cruciol (2013) para un suelo Oxisol ácido de Brasil.

Para el Na intercambiable (**Figura 3e**) y al igual que lo ocurrido en el suelo Andisol (**Figura 1e**), tampoco se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ($p < 0.05$). Resultados similares son reportados por Moore y Ouimet (2014). A su vez, las concentraciones de Na obtenidas fluctuaron entre 0.11 y 0.12 $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$ (**Figura 1e**), valores levemente superiores a la concentración inicial en el suelo (**Tabla 1**).

Para la SB (**Figura 3f**) se presentó el mismo comportamiento observado en el suelo Andisol (**Figura 1f**), asociado al Ca intercambiable (**Figura 3b**) y porcentaje de Ca sobre la SB (77.4%) (**Tabla 1**). La mayor SB se obtuvo en el tratamiento CaCO₃ polvo (**Figura 3f**) que superó al control y a los tratamientos CaCO₃-G 250, CaCO₃-G 500 y CaMgCO₃ ($p < 0.05$).

El Al de intercambio (**Figura 3g**) presentó una concentración inferior al control ($p < 0.05$) sólo con el uso de CaCO₃-G 1000, CaMgCO₃-G en dosis de 500 y 1000 kg ha^{-1} , CaCO₃ y CaMgCO₃. Estos resultados fueron similares a lo obtenido en el suelo Andisol (**Figura 1g**). El uso de

CaCO₃-G en dosis de 250 y 500 kg ha^{-1} , y de CaMgCO₃-G en dosis de 250 kg ha^{-1} no difirieron del control ($p > 0.05$), efecto anteriormente discutido y asociado tanto a la dosis usada como al menor poder de neutralización del Ca respecto del Mg (Fageria y Nascente, 2014).

La saturación de Al⁺³ (**Figura 3h**), al igual que en el suelo Andisol (**Figura 1h**), también presentó un comportamiento similar al observado en el Al de intercambio (**Figura 3g**). Sin embargo, sólo los tratamientos de 1000 kg ha^{-1} de enmienda calcárea redujeron significativamente la saturación de Al respecto del control ($p < 0.05$). Para el Al extractable (**Figura 3i**), pocas diferencias significativas fueron detectadas entre tratamientos, probablemente asociado al alto error estándar de cada media. A diferencia de lo obtenido para el suelo Andisol (**Figura 1i**), sólo se observó una tendencia inversamente proporcional entre el uso de CaCO₃-G en dosis crecientes y la concentración de Al extractable (**Figura 3i**). Sin embargo, se habría esperado una reducción del Al extractable frente a la aplicación de las enmiendas calcáreas evaluadas en sus diferentes dosis, como ocurrió en el suelo Andisol (**Figura 1i**), situación que no ocurrió en este suelo Ultisol (**Figura 3i**). Dicho efecto podría ser explicado por la alta capacidad tampón de este suelo Ultisol, asociado a su alto contenido de arcilla (**Tabla 1**) (Havlin et al., 1999; Fageria y Nascente, 2014).

Para las relaciones matemáticas lineales simples entre Al extractable-pH, saturación de Al-pH, y pH-SB, sólo se observó una relación inversamente proporcional y

altamente significativa para la relación saturación de Al-pH, con un coeficiente de determinación moderado (Figura 4a, 4b y 4c). A diferencia del suelo Andisol (Figura 2a), no se observó la relación inversamente proporcional entre Al extractable-pH (Figura 4a), efecto asociado a las pocas diferencias detectadas para el Al extractable cuando se comparó entre tratamientos (Figura 3i), y que podría estar explicado por el contenido de arcilla (Tabla 1) y su efecto sobre la capacidad tampón de este suelo Ultisol (Havlin et al., 1999; Fageria y Nascente, 2014). Al igual que en el suelo Andisol (Figura 2c), aunque con efecto significativo, no hubo correlación lineal entre el pH y la SB para el suelo Ultisol (Figura 4c), efecto anteriormente discutido.

Poder relativo neutralizante total (PRNT)

Para el suelo Andisol los valores estimados de PRNT en las enmiendas CaCO_3 -G y CaMgCO_3 -G fueron 1.11 y 1.03, respectivamente (Figura 1a). En el suelo Ultisol, los valores

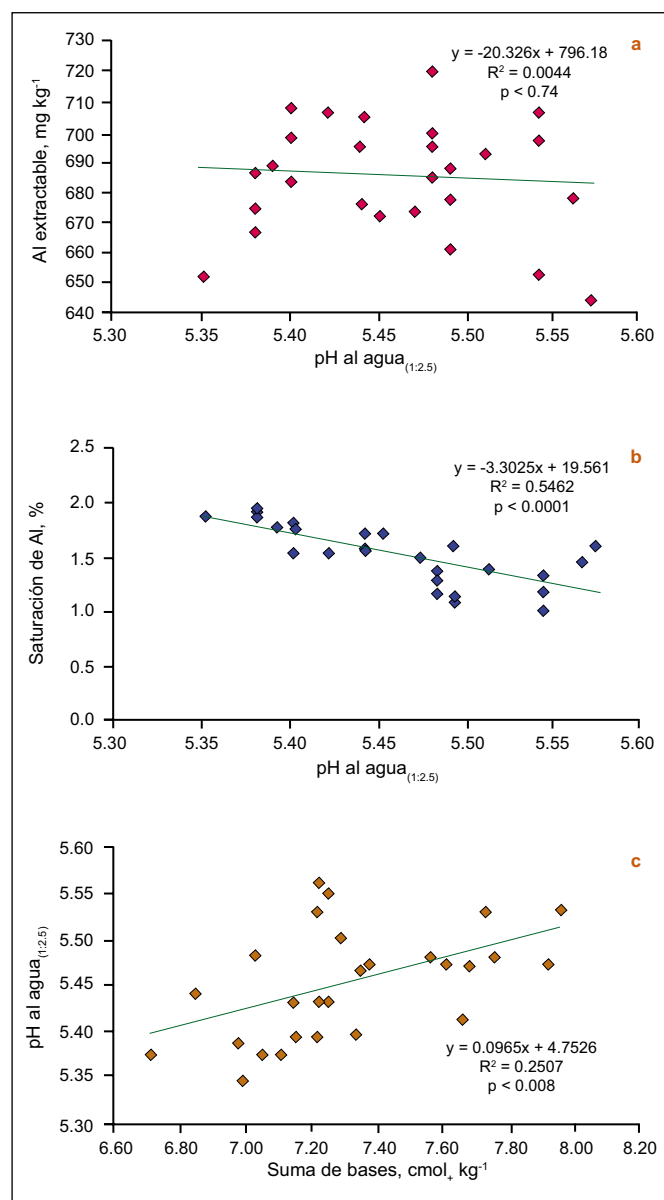


Figura 4. Regresiones lineales entre (a) Al extractable-pH, (b) saturación de Al-pH, y (c) pH-suma de bases, en el suelo Ultisol al término del periodo de incubación en condiciones aeróbicas controladas (25 °C y 80% de la humedad aprovechable).

de PRNT para las enmiendas CaCO_3 -G y CaMgCO_3 -G fueron de 1.20 y 0.97, respectivamente (Figura 3a). Por su parte, la enmienda calcárea CaMgCO_3 polvo presentó valores de PRNT en relación al uso de CaCO_3 polvo, de 0.68 y 0.70 para los suelos Andisol y Ultisol, respectivamente (Figuras 1a y 3a), probablemente asociado a su menor solubilidad respecto del CaCO_3 -G (Tabla 2). De las enmiendas calcáreas granuladas, sólo el uso de CaCO_3 -G generó un PRNT estimado mayor que la enmienda calcárea de referencia (CaCO_3 en polvo) en ambos suelos.

El uso de CaCO_3 granulado en menor o igual dosis que el CaCO_3 en polvo es una alternativa a esta cal en polvo para corregir la acidez en los dos suelos volcánicos evaluados. A su vez, en el suelo Andisol, el uso de CaCO_3 granulado en igual dosis que CaCO_3 en polvo permitió reducir el Al intercambiable y la saturación de Al^{+3} .

El uso de CaMgCO_3 granulado en menor o igual dosis que el CaMgCO_3 en polvo es una alternativa a esta cal en polvo para corregir la acidez sólo en el suelo Andisol evaluado.

En ambos suelos de origen volcánico el indicador consistente de reducción de la acidez fue la relación inversamente proporcional obtenida entre la saturación de Al^{+3} y pH.

Bibliografía

- Bachiega, F., L. Ferracciú, y E. Fávero. 2007. Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid Oxisol under no-till system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 79:169-179.
- Baldi, E., M. Toselli, G. Marcolini, y B. Marangoni. 2006. Effect of mineral and organic fertilization on soil chemical, biological and physical fertility in a commercial Peach orchard. *Acta Horticulturae* 721:55-62.
- Caires, E.F., A. Haliski, A.R. Bini, y D.A. Scharr. 2015. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. *European Journal of Agronomy* 66:41-53.
- Castro, G.S.A., y C.A.C. Crusciol. 2013. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. *Geoderma* 195-196:234-242.
- Ebeling, A.G., L.H. Anjos, D.V. Pérez, M.G. Pereira, y G.S. Valladares. 2011. Relationship between acidity and other chemical attributes of soils with high organic matter content. *Bragantia* 70:157-165.
- Fageria, N., y A. Nascente. 2014. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. *Advances in Agronomy* 128:221-275.
- Fageria, N.K., A. Moreira, L.A.C. Moraes, y M.F. Moraes. 2014. Influence of lime and gypsum on yield and yield components of soybean and changes in soil chemical properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45:271-283.
- Havlin, J.L., S.L. Tisdale, W. Nelson, J. Havlin, y J. Beaton. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. 6th ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

- Hirzel, J., I. Matus, F. Novoa, y I. Walter. 2007. Effect of poultry litter on silage maize (*Zea mays* L.) production and nutrient uptake. *Spain Journal of Agricultural Research* 5:102-109.
- Hirzel, J., P. Undurraga, P., y I. Walter. 2010. Mineralization of nitrogen and nutrients released in a volcanic soil amended with poultry manure. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70:113-121.
- Laos, F., P. Satti, I. Walter, M.J. Mazzarino, y S. Moyano. 2000. Nutrient availability of composted and noncomposted residues in a Patagonian Xeric Mollisol. *Biology and Fertility of Soils* 31:462-469.
- Moore, J., y R. Ouimet. 2014. Effects of two types of Ca fertilizer on sugar maple nutrition, vigor and growth after 7 years. *Forest Ecology and Management* 320:1-5.
- Moreira, A., G.J. Sfredo, L.A.C. Moraes, y N.K. Fageria. 2015. Lime and cattle manure in soil fertility and soybean grain yield cultivated in tropical soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 46:1157-1169.
- Sadzwarka, A., M.A. Carrasco, R. Grez, M.D.L.L. Mora, H. Flores, y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Serie Actas-INIA N° 34.: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.
- Sumner, M.E., y A.D. Noble. 2003. Soil acidification: the world story. In: Rengel, Z. (ed.) *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker, New York. p. 1-28.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

La Importancia de la nutrición con magnesio y azufre en el cultivo de la papa

Francisco Jiménez Uribe¹

- *La fertilización balanceada del cultivo de papa en Colombia puede mejorar notablemente la productividad.*
- *Además de N, P y K, el magnesio (Mg) y el azufre (S) pueden resultar limitantes, particularmente en regiones de producción intensiva.*
- *Este artículo pretende servir de guía para una correcta recomendación de fertilización balanceada con Mg y S.*

El cultivo de la papa en Colombia es de vital importancia por que provee de este preciado alimento a millones de personas y del que derivan su sustento miles de agricultores. Constantemente estos productores enfrentan una alta variabilidad en la rentabilidad de su cultivo debido a las fluctuantes condiciones del mercado en las cuales tienen poca influencia.

Sin embargo los agricultores pueden mejorar su productividad optimizando todas las labores que el cultivo requiere y teniendo como objetivo aumentar la rentabilidad dentro de un esquema de administración eficiente. Dentro de estas labores la adecuada fertilización del cultivo es una práctica que ayuda a obtener altos rendimiento por unidad de área.

Para que la nutrición de la papa sea adecuada se debe tener una fertilización suficiente y balanceada, es decir debe contener los nutrientes necesarios en las cantidades óptimas y en las relaciones apropiadas. Del mismo modo se deben aplicar en las épocas que son requeridos por el cultivo y con los fertilizantes adecuados de acuerdo con las condiciones del suelo y el ambiente.

Es conocido que la planta requiere de 17 nutrientes esenciales para su normal crecimiento y desarrollo, en la mayoría de los suelos dedicados al cultivo de la papa en Colombia estos no se encuentran en cantidades

suficientes lo que hace necesario la aplicación de sustancias externas portadoras de estos elementos. Dentro de los elementos deficientes se encuentran el Magnesio (Mg) y el Azufre (S) que son fundamentales para la obtención de altos rendimientos en el cultivo.

Una fertilización sin considerar Mg y S puede resultar en un agotamiento de la reservas del suelo, particularmente en regiones de producción intensiva de papa. Los suelos con contenidos de Mg intercambiable menor a 1.5 cmol_c kg⁻¹ de suelo y menor a 10 ppm de azufre asimilable se consideran bajos para el cultivo.

Dependiendo del rendimiento esperado, la papa absorbe aproximadamente de 20 a 40 kg de MgO y de 20 a 60 kg de S, por ciclo de cultivo. (Guerrero, 1998; Castro 2005).

Magnesio (Mg)

Magnesio en el suelo

Los niveles de Mg en el suelo varían entre 0.1 y 4%. El Mg está presente en distintas fracciones en el suelo, el Mg estructural, Mg de reserva, Mg no cambiante, Mg intercambiable, Mg en la materia orgánica y el Mg en solución. Su deficiencia se puede presentar en suelos arenosos, suelos ácidos con baja capacidad de intercambio catiónico, suelos muy alterados, suelos

¹ Monómeros S.A. Gerente de Asistencia Técnica y Nuevos Negocios. Correo electrónico: frjimenez@monomeros.com.co

calcáreos con bajos niveles de Mg, suelos que reciben fertilización intensiva con Potasio, Calcio o Amonio y en suelos cultivados con plantas muy exigentes en Mg. (Havlin, 1999).

El magnesio en la fisiología de la planta

Las plantas toman el Mg como catión Mg^{2+} desde la solución del suelo el cual está en equilibrio con el Mg cambiante. El suministro de este elemento a las plantas ocurre mediante transporte por flujo de masa siendo muy móvil dentro del floema y puede ser trascolado desde las hojas más viejas a las más jóvenes o a los ápices. Los cationes Calcio, Potasio y Amonio compiten fuertemente en la toma y transporte del Mg.

El Mg cumple varias funciones vitales para la planta:

- 1) Es constituyente del núcleo central de la molécula de la clorofila y como tal elemento clave para la fotosíntesis.
- 2) Participa activamente en las transformaciones del nitrógeno.
- 3) Es necesario en la transferencia del fósforo en la planta.
- 4) Cada transformación o transporte de energía en la planta requiere del Mg.
- 5) Es esencial para la síntesis de carbohidratos, proteínas y aceites.
- 6) Ayuda a la resistencia al ennegrecimiento de la papa y a la duración del almacenamiento.

Deficiencia de magnesio en la planta

Una deficiencia de Mg afecta particularmente el tamaño, estructura y función de los cloroplastos lo que disminuye el potencial de fotosíntesis.

Cuando el Mg es deficiente y la exportación de carbohidratos desde la fuente al vertedero es deteriorada hay una disminución en el contenido de almidón de los tejidos de almacenamiento tales como tubérculos de papa y en el peso de granos de los cereales. La traslocación de Mg desde hojas maduras a jóvenes se aumenta lo que causa que los síntomas de deficiencias visuales típicamente aparezcan inicialmente en las hojas maduras (Marschner, 1995).

Niveles bajos de Mg en la planta de papa tienen como consecuencia una disminución en el rendimiento particularmente si las deficiencias se presentan durante la floración y la formación de los tubérculos. **Foto1.**

Sintomatología: Las hojas viejas presentan moteados cloróticos pálidos entre las nervaduras con forma de espina de pez a lo largo de las nervaduras principales. Estos puntos pueden unirse y se necrosan si la deficiencia es severa. Los márgenes de la hoja pueden curvarse hacia arriba y se tornan frágiles.



Foto 1. Deficiencia de magnesio en la papa.

Tabla 1. Distribución (%) de la disponibilidad de Magnesio (Mg-intercambiable) en suelos de las diferentes zonas paperas de Colombia. Guerrero et al. (2004).

Zona	----- Nivel de disponibilidad, % -----			
	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Antioquia	9	4	26	61
Cundinamarca	17	17	23	43
Boyacá	4	12	31	53
Caldas	8	8	39	46
Cauca	5	3	43	49
Nariño	18	13	41	28
Norte de Santander	3	10	39	49
Santander	31	0	19	50
Tolima	26	11	5	58
Total	12	13	29	46

Disponibilidad de magnesio en los suelos cultivados con papa en Colombia

Guerrero et al, (2004) realizaron un estudio sobre la disponibilidad de magnesio en suelos cultivados con papa en Colombia donde se evidenció que en su mayoría los contenidos de Mg son bajos y muy bajos. **Tabla 1.**

García y Pantoja, (1998) al evaluar la fertilidad de los suelos dedicados al cultivo de la papa en Nariño encontraron que el 67% de los suelos evaluados presentaron contenidos bajos de Mg. Señalan además que las características químicas de los suelos de Nariño son predominantemente deficientes en Boro, Zinc, Magnesio y Azufre, lo cual limita la producción y la calidad industrial de la papa.

Ríos (2010) menciona que de acuerdo con los resultados de numerosos análisis de suelos realizados por la Universidad Nacional de Colombia en diferentes suelos dedicados al cultivo de la papa, en el país estos muestran que son suelos de muy baja fertilidad, caracterizados

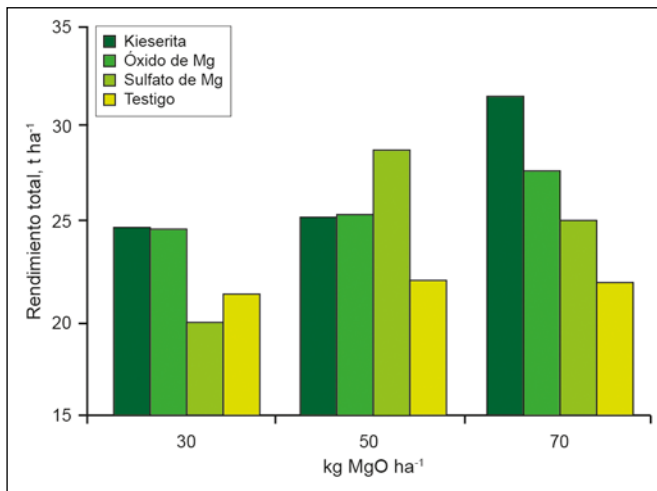


Figura.1 Respuesta de la papa (*Solanum tuberosum*) a la fertilización con tres dosis y tres fuentes de magnesio, Acuña y Cifuentes (2001). Jenesano. Boyacá.

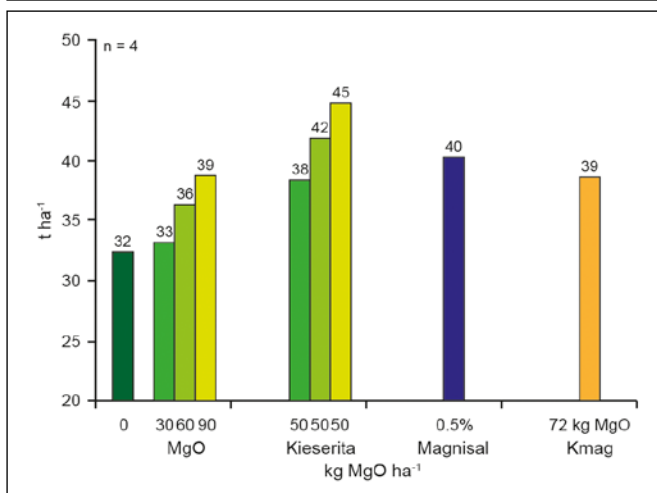


Figura 2. Rendimiento de papa (*Solanum tuberosum*) obtenido bajo diferentes fuentes y dosis de magnesio en Guachucal (Nariño), Guerrero et al, (2000).

por presentar texturas gruesas, pH menores de 5.5 y con contenidos de Ca y Mg muy bajos. Del mismo modo Castro (2005) señala que existe un alto potencial de deficiencias de Mg en suelos paperos de Colombia especialmente en Boyacá.

Respuesta a la aplicación de magnesio en el cultivo de la papa

Se ha demostrado en diferentes investigaciones el efecto positivo de la aplicación del Mg y el S en el cultivo de la papa en Colombia. Así mismo el aumento en los rendimientos del cultivo ha sido comprobado por un sinnúmero de agricultores que han aplicado estos nutrientes en sus planes de fertilización.

García y Pantoja, (1998) realizaron un experimento de fertilización con Boro y Sulfato de Magnesio en suelos de Nariño y encontraron que el rendimiento más alto se obtuvo con 2 kg de B y 250 kg de Sulfato de Magnesio, con un incremento del 44% sobre el tratamiento sin estos fertilizantes.

Acuña y Cifuentes, en el 2001 evaluaron tres dosis y tres fuentes de Mg encontrando aumentos significativos en los rendimientos del cultivo. Señalan que efectivamente el Mg influye sobre el rendimiento de la papa arrojando como resultado que la ESTA Kieserita presentó el mejor rendimiento total de papa con un promedio de 31.41 t ha⁻¹, seguido del óxido de magnesio con 27.59 t ha⁻¹ y del sulfato de magnesio con 25.02 t ha⁻¹. **Figura 1.**

Guerrero (2000) en suelos andisoles de Guachucal (Nariño), encontró respuesta a la aplicación de Magnesio, especialmente en dosis de 90 Kg ha⁻¹ de MgO usando como fuente ESTA Kieserita, Este tratamiento alcanzó un rendimiento de 45 t ha⁻¹ en comparación a las 32 t ha⁻¹ obtenidas por el testigo. **Figura 2.**

Estudios sobre absorción de nutrientes en papa llevados a cabo por Gómez (2012) muestran como en el caso de la absorción de Mg esta es dependiente de la localidad y la variedad (*Pastusa Suprema* y *Diacol Capiro*). El autor encontró valores de extracción que fluctúan entre 0.66 Kg y 0.92 Kg de MgO por tonelada cosechada.

Azufre (S)

Azufre en el suelo

El azufre está presente en el suelo tanto en formas orgánicas como inorgánicas, su contenido depende de los minerales de S que están presentes en el suelo, del grado de intemperización, de las condiciones climáticas, del contenido de materia orgánica y de la distancia del sitio a fuentes de S tales como los volcanes o las industrias.

El azufre en la fisiología de la planta

El S es absorbido por las raíces en forma de SO₄²⁻; el transporte a larga distancia del sulfato ocurre principalmente en el xilema siendo muy móvil dentro de la planta y se incorpora rápidamente en la estructura de los metabolitos. El S también puede absorberse por las hojas a través de las estomas en forma de dióxido de S gaseoso (SO₂).

El S cumple varias funciones en la planta, siendo las principales:

- 1) Constituyente de ciertos aminoácidos los cuales hacen parte de los bloques donde se forman las proteínas.
- 2) Estimula la asimilación del Nitrógeno.
- 3) Es constituyente de vitaminas y hormonas.

Deficiencia de azufre en la planta

Las deficiencias de S se presentan por diferentes razones: Bajo contenido de S en el suelo, bajo contenido de materia orgánica, predominio de la inmovilización sobre la mineralización del S-orgánico, pérdidas de S por lixiviación y erosión, pérdidas de S por volatilización (quemaduras) y remoción intensiva del cultivo.

Tabla 2. Distribución porcentual de las clases de S disponible en suelo en las regiones andinas de clima frío.

S disponible, ppm*	Nivel	Cundinamarca	Boyacá	Nariño	Norte de Santander	Antioquia
< 5	Muy bajo	24	52	70	71	45
5.1-10.0	Bajo	47	35	23	22	55
10.1-15	Medio	24	4	3	3	--
> 15	Alto	5	9	4	4	--

* Extracción con $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0.008M.



Foto 2. Deficiencia de azufre en la papa.

Al ser un constituyente esencial de las proteínas, la deficiencia de S en la planta resulta en una inhibición de la síntesis proteica que conduce a una clorosis. Los síntomas son muy similares a los síntomas de deficiencia de nitrógeno pero estos comienzan en las hojas más jóvenes. Así mismo los tallos son delgados y las plantas son pequeñas. **Foto 2.**

Sintomatología: La deficiencia comienza por las hojas jóvenes. Todas las hojas presentan un amarillamiento y son más pequeñas de lo normal. Las hojas más jóvenes son de un color amarillo brillante. El desarrollo productivo suele reducirse más que el crecimiento vegetativo y los tallos se tornan delgados.

Disponibilidad de azufre en los suelos cultivados con papa en Colombia

Lora (2001) menciona que a pesar que los suelos dedicados al cultivo de la papa son orgánicos y en su mayoría derivados de cenizas volcánicas, el contenido de azufre disponible para la planta estén en niveles de medios a bajos. En estos suelos aunque el contenido de S total es alto, su disponibilidad depende principalmente de la mineralización del S orgánico, proceso que en suelos Andisoles es limitado debido a la formación de complejos entre las arcillas amorfas y el humus lo que conlleva a una reducción de la actividad microbial.

En la **tabla 2** se muestran los valores de la distribución porcentual del azufre disponible en las zonas frías (Guerrero, 1998).

Respuesta a la aplicación de azufre en el cultivo de la papa

En suelos de Tuquerres y Pasto, Guerrero y Montenegro (1994) evaluaron el reabonamiento de la papa con S utilizando sulfato de amonio, el cual fue acompañado de una adecuada dosificación NPK en la siembra (1500 kg de 13-26-6 ha⁻¹). Se encontró que de tres a cinco bultos (50 kg) de sulfato de amonio aplicados en el primer aporque, (40 a 60 kg de S ha⁻¹) resultaron suficientes para satisfacer la demanda de azufre e incrementar los rendimientos entre 6 y 9 t ha⁻¹.

Monómeros ha realizado diversas investigaciones sobre la fertilización de S y Mg en el cultivo de la papa, donde se han encontrado incrementos muy significativos en los rendimientos y en la rentabilidad del cultivo. Varios de estos son detallados por publicaciones de Guerrero (1998) y Lora (2001).

Estos diagnósticos y estudios han conducido al diseño de grados fertilizantes como el fertilizante granulado **13-26-10-3 (Mg)-3(S)** que además de tener una relación nutricional adecuada de NPK para la papa aporta las cantidades suficientes de S y Mg. Los beneficios de esta relación nutricional han sido comprobados por los agricultores al ver aumentados sus rendimientos durante muchas cosechas en diferentes zonas del país. Así mismo se continúa con las investigaciones con estos y otros nutrientes con el fin de optimizar los planes de fertilización del cultivo.

En conclusión, el productor de papa debe incluir el Mg y el S dentro de sus planes de fertilización y buscar la asesoría de los técnicos de Fedepapa o de los técnicos del gremio con el fin de ajustar la recomendación.

Bibliografía

- Acuña, J. y Cifuentes, N. 2001. Efectos de diferentes fuentes y dosis de magnesio en el rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en un suelo de origen alofánico en el municipio de Jenesano, Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Ingeniería Agronómica. 72 p.
- Castro H. 2005. Balance y prospectiva de la investigación en el campo de la fertilización para el sistema de producción de papa en Colombia. pp 31-43. En: Memorias. I Taller

- Nacional sobre suelos, fisiología y nutrición vegetal en el cultivo de la papa. Centro Virtual de Investigación de la Cadena Agroalimentaria de la Papa (CEVIPAPA). Bogotá, Colombia.
- Havlin, J. 1999. Soil Fertility and Fertilizers: an introduction to nutrient management. 6 Ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 499 p.
- García, R.B. y C.L. Pantoja. 1998. Fertilización del cultivo de la papa en el departamento de Nariño. Fertilización de Cultivos de Clima frío. Segunda edición. Monómeros Colombo Venezolanos. Colombia. 370 p.
- Gómez, M. 2012. Absorción, extracción y manejo nutricional del cultivo. EN: Revista Fedepapa. N° 26 Diciembre de 2012. Fedepapa. pp. 20-25.
- Guerrero, R., A. Franco, y L. Rojas. 2004. Disponibilidad del Magnesio en el cultivo de papa en algunos departamentos de Colombia.
- Guerrero, R., V.Y. Montenegro, M. Ross. 2000. Fertilización con Magnesio para más y mejores rendimientos en papa. En: Papas Colombianas 2000. Revista ventana al campo andino. Vol.3 N° 1-2. pp. 96-99.
- Guerrero, R. 1998. La Fertilización con Azufre para el Cultivo de la Papa en Colombia. Fertilización de Cultivos de Clima Frío. Segunda Edición. Monómeros Colombo Venezolanos, Colombia. 370 p.
- Guerrero, R., G.V. Montenegro. 1994. Respuesta de la papa (*Solanum tuberosum*, L.) var. "Parida Pastusa" al reabonamiento con nitrógeno y azufre en Andisoles del Altiplano de Pasto y la sabana de Túquerres, Nariño. Suelos Ecuatoriales, 24:13-16.
- Lora, R. 2001. Los elementos secundarios Ca, Mg, S y el Silicio en la Agricultura. Bogotá: S.C.C.S cap. Cundinamarca. 176 p.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2 Ed. London: Academic Press, 884 p.
- Ramírez, F. 2012. Fertilización a la Carta. Revista Fedepapa. N° 26 Diciembre. FEDEPAPA. pp. 26-29.
- Ríos, J., C. Jaramillo, L. Gonzales, y J. Cotes. 2010. Determinación del Efecto de Diferentes Niveles de Fertilización en Papa (*Solanum tuberosum* ssp. Andigena) DIACOL Capiro en un Suelo con Propiedades Ándicas de Santa Rosa de Osos, Colombia. En: Revista Facultad Nacional de Agronomía. Medellín 63(1):5225-5237.

Cursos y Simposios

- VII Congreso Mundial de Agricultura de Conservación y XXV Congreso AAPRESID**

Organiza : Aapresid
Lugar : Rosario, Santa Fe, Argentina
Fecha : Agosto 1-4, 2017
Información : <http://congresoaaapresid.org.ar>
- II Congreso Paraguayo de Ciencia del Suelo**

Organiza : SOPACIS
Lugar : Encarnación, Paraguay
Fecha : Agosto 17-18, 2017
Información : <https://sopacis.org.py/congreso>
- X Conferencia Mundial de Soja**

Organiza : Universidad de Georgia
Lugar : Savannah, Georgia, EE.UU.
Fecha : Septiembre 10-15, 2017
Información : <http://wsr10.net>
- V Simposio Nacional de Agricultura: "Al futuro no alcanza con llegar"**

Organiza : FAGRO-UDELAR - IPNI Cono Sur
Lugar : Paysandú, Uruguay
Fecha : Septiembre 14-15, 2017
Información : difusion_eemac@fagro.edu.uy
<http://www.eemac.edu.uy>
- V Reunión de la Red Argentina de Salinidad. "Salinidad: Un desafío para el semiárido"**

Organiza : AACS
Lugar : Villa Mercedes, San Luis, Argentina
Fecha : Octubre 4-6, 2017
Información : info.ras2017@gmail.com
<http://www.suelos.org.ar>
- ASA-CSSA-SSSA Meetings: "Managing Global Resources for a Secure Future"**

Organiza : ASA-CSSA-SSSA
Lugar : Tampa, Florida, EE.UU.
Fecha : Octubre 22-25, 2017
Información : <https://www.acsmeetings.org>
- XIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo**

Organiza : Pontificia Univ. Católica de Chile
Lugar : Santiago de Chile, Chile
Fecha : Noviembre 20-23, 2017
Información : <http://congresosuelo.uc.cl>
- XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**

Organiza : AACS
Lugar : San Miguel de Tucumán, Argentina
Fecha : Mayo 15-18, 2018
Información : <https://congresosuelo2018.org>
congresosuelo2018@gmail.com

Publicaciones Disponibles

Titulo de la Publicación	Costo (US\$)	Costo (\$ arg.)
NUEVO. Los desafíos de la agricultura. En esta publicación, el Dr. Fernando H. Andrade (INTA-CONICET-FCA/UNMDP) amplía su anterior obra "La tecnología y la producción agrícola, el pasado y los actuales desafíos". En esta obra, el autor nos brinda su profunda y relevante visión para pensar como construir una mejor agricultura para una mejor sociedad.	9.00	120.00
Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2da Edición (2015). INTA e IPNI han editado esta nueva edición, que incluye la participación de más de 30 reconocidos autores de los 34 capítulos y el anexo. El Ing. Agr. M.Sc. Hernán E. Echeverría y el Dr. Fernando O. García son los compiladores de esta obra de referencia en el tema.	40.00	550.00
Simposio Fertilidad 2015. CD de las Actas con los trabajos extendidos de presentaciones orales y posters presentados en el Simposio organizado por IPNI y Fertilizar AC, Rosario. 19 y 20 de Mayo de 2015.	7.00	100.00
Manual 4R de la Nutrición de Plantas. Bajo el lema de los 4 Requisitos (R) básicos de la nutrición: la fuente correcta, en la dosis, el momento, y la localización correctos, este Manual busca servir de apoyo para la toma de decisiones referidas al manejo de la nutrición de los cultivos.	40.00	600.00
Simposio Fertilidad 2013. CD de las Actas con los trabajos extendidos de presentaciones orales y posters presentados en el Simposio organizado por IPNI y Fertilizar AC, Rosario 22 y 23 de Mayo de 2013.	4.00	50.00
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.	4.00	50.00
Manual de Manejo del Cultivo de Soja. Editado por Fernando O. Garcia, Ignacio A. Ciampitti y Hector Baigorri.	11.00	150.00
Como se Desarrolla una Planta de Soja. Edición en español de la guía fenológica y de manejo publicada por Iowa State University.	4.00	50.00
Como se Desarrolla una Planta de Maíz. Edición en español de la guía fenológica y de manejo publicada por Iowa State University.	4.00	50.00
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	50.00
Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Publicación didáctica sobre el uso y el manejo de suelos y fertilizantes. Primera impresión versión en español, Mayo de 1997. (142 pág).	15.00	180.00
Vea el catálogo completo de publicaciones del IPNI Cono Sur en http://Lacs.ipni.net		

Forma de pago de las publicaciones

Argentina
<input type="checkbox"/> Depósito bancario a INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, Banco Galicia, Sucursal Olivos, Cta. Cte. N° 3856/4 053/5
<input type="checkbox"/> Transferencia bancaria a INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, Banco Galicia, Sucursal Olivos, Cta. Cte. N° 3856/4 053/5, CBU 007005352000003856451 CUIT 30-70175611-4
<input type="checkbox"/> Personalmente, en efectivo, o con tarjeta de crédito/débito VISA, AMEX, MASTERCARD, en nuestra oficina (consultar horarios de atención).
<input type="checkbox"/> A distancia, con tarjetas de crédito VISA, AMEX, MASTERCARD, comunicarse al Telf/Fax.: 54 11 4798 9939 o al correo electrónico: Lpisauri@ipni.net
Solicitamos nos haga saber por teléfono, fax o correo electrónico, la opción elegida y nos envíe los datos para acreditar su pago (datos de depósito o transferencia bancaria).
Para conocer los gastos de envío y cualquier otra consulta de publicaciones por favor enviar un correo electrónico a Lpisauri@ipni.net