



CONTENIDO

	Pág.
Optimización de la aplicación de enmiendas y fertilizantes	1
Magnesio: El elemento olvidado en la producción de cultivos	16
Fuentes de magnesio	20
Reporte de Investigación Reciente	24
- Evaluación de la eficacia de fertilizantes de alta eficiencia como opciones de mitigación de las emisiones de N ₂ O y NO de suelos agrícolas	
- Determinación del fósforo disponible por tres métodos de extracción en un oxisol tropical de Brasil tratado con yeso	
Cursos y Simposios	25
Publicaciones Disponibles	26

Editores: Dr. José Espinosa
Dr. Raúl Jaramillo

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: Desarrollar y promover la información científica sobre el manejo responsable de la nutrición de las plantas para beneficio de la humanidad

OPTIMIZACION DE LA APLICACION DE ENMIENDAS Y FERTILIZANTES

Pedro Henrique de Cerqueira Luz, Rafael Otto, Godofredo Cesar Vitti, Thiago Aristides Quintino, Wellington Sacco Altran y Regis Ikeda*

Introducción

El éxito en el manejo de los cultivos se logra integrando el conocimiento de nutrición mineral de plantas, fertilidad de suelos, características y propiedades de las enmiendas y fertilizantes y de la tecnología de aplicación de estos materiales. La información sobre manejo de la fertilización de los cultivos, desde el punto de vista de utilización de fertilizantes y enmiendas y de su efecto sobre la fertilidad del suelo y la nutrición mineral de las plantas, está consolidada y al momento se dispone de abundante información práctica para los agricultores. Sin embargo, se nota que la tecnología de aplicación de enmiendas y fertilizantes, uno de los factores determinantes en el incremento de la eficiencia del suplemento de nutrientes al sistema suelo-planta, todavía no recibe la debida atención por parte de los productores.

De igual manera, la tecnología de aplicación envuelve el conocimiento de diversas áreas de la agronomía como propiedades de las enmiendas y fertilizantes, características y funcionamiento del equipo de aplicación, fertilidad de suelos y nutrición mineral de plantas. De esta forma, para que se pueda hacer una aplicación exitosa de enmiendas y fertilizantes se deben considerar varios aspectos de la tecnología de aplicación asociados a resultados de pruebas de aplicación de estos materiales conducidos en condiciones de campo. Varios de los aspectos ligados a la aplicación de enmiendas y fertilizantes se discuten a continuación.

Características de las enmiendas y fertilizantes

Las características físicas, químicas y físico-químicas de las enmiendas y fertilizantes son determinantes en el desempeño cualitativo y cuantitativo de las aplicaciones.

Enmiendas

Las características físicas de la cal y el yeso (principales enmiendas), particularmente la humedad, granulometría y ángulo de reposo son más determinantes que las características químicas para la aplicación eficiente de estos materiales. Para los productores, la humedad es el principal factor

* Tomado de: Luz, P.H.C., R. Otto, G.C. Vitti, T.A. Quintino, W.S. Altran, e R. Ikeda. 2010. Otimização da aplicação de corretivos agrícolas e fertilizantes. Informações Agronômicas 129:1-13.

limitante que dificulta la aplicación de cal, considerando que en este material no existen límites de garantía con respecto al contenido mínimo de humedad, lo que implica que existe gran variabilidad de valores en los productos comerciales. Un estudio con cales comerciales en Brasil demostró que la humedad varía entre 2 y 15 %. En el yeso esa variabilidad es aún mayor con valores que van de 24 al 29 % (Coelho et al., 1992).

La granulometría de las enmiendas es otro factor importante, principalmente cuando se utiliza equipo de aplicación al voleo. Normalmente las enmiendas son poco solubles y es necesario colocarlas en contacto con un gran volumen de suelo para promover una mejor reacción de corrección. Un producto que presenta una alta variabilidad en granulometría está sujeto a segregación cuando se aplica mecánicamente al voleo. Las partículas con mayor tamaño y densidad son lanzadas a mayor distancia en comparación con las partículas de menor tamaño y densidad. A mayor uniformidad del producto, menor es la segregación al momento de aplicación.

Las cales presentan granulometrías que varían de 0.3 a 2.0 mm. El tamaño de las partículas de la cal afecta la reactividad del material en el suelo por unidad de tiempo. De esta forma, gránulos de cal que se retienen en un tamiz de 0.84 mm tienen una eficiencia relativa de 20 %, los que se retienen en un tamiz de 0.3 mm tienen una eficiencia de 60 % y aquellos que pasan este tamiz tienen una eficiencia de 100 %, para un periodo de reacción de alrededor de 50 días. Debido a que para el cálculo del poder relativo de neutralización de la cal

(PRNC) se usa el valor de la eficiencia relativa conjuntamente con el equivalente de carbonato de calcio (ECaCO_3), este valor afecta el valor del PRNC en el suelo. Esto significa que la segregación del producto altera la PRNC en la zona de aplicación.

Todo producto sólido granulado, cuando cae libremente, forma un montículo cuyos taludes (lados del cono) presentan un ángulo de inclinación característico denominado ángulo de reposo. Este parámetro es un indicador de la tendencia de movimiento del producto dentro del equipo de distribución/aplicación. Mientras mayor sea el ángulo más difícil es la distribución del producto. El ángulo de reposo varía principalmente en función de la granulometría (tamaño, forma y aspereza) y de la humedad del producto, factores que influyen directamente la fluidez y la distribución del producto en el mecanismo de aplicación y distribución de las máquinas aplicadoras. Esta condición fue evaluada con algunas enmiendas y fertilizantes por Cequeira Luz (datos no publicados) quien obtuvo valores de ángulo de reposo de 42 % para yeso, 40 % para cal, 36 % para la mezcla física 6-12-6 y 32 % para urea. Nótese que las enmiendas tienen un mayor ángulo de reposo que los fertilizantes, lo que implica que las enmiendas son más difíciles de aplicar en el campo que los fertilizantes.

Fertilizantes

Cuando se discute la tecnología de aplicación se deben tener en cuenta las características físicas, químicas y físico-químicas de los fertilizantes. Las principales características que deben analizarse son: estado físico, granulometría, dureza de los gránulos, fluidez, densidad, higroscopicidad y endurecimiento.

Tabla 1. Granulometría de los fertilizantes y enmiendas según la legislación en vigor en Brasil (MAPA, 2007).

Naturaleza física	----- Especificaciones granulométricas -----		
	Tamiz	Paso	Retenido
Granulado y mezcla granulada: un producto en el que cada gránulo contiene los elementos declarados o garantizados por el fabricante.	4 mm (ABNT N° 5)	95 % mínimo	5 % máximo
	1 mm (ABNT N° 18)	5 % máximo	95 % mínimo
Mezcla física: los gránulos de la mezcla contienen separadamente uno o más de los elementos declarados por el fabricante.	4 mm (ABNT N° 5)	95 % mínimo	5 % máximo
	1 mm (ABNT N° 18)	5 % máximo	95 % mínimo
Microgranulado	2.8 mm (ABNT N° 7)	90 % mínimo	10 % máximo
	1 mm (ABNT N° 18)	10 % máximo	90 % mínimo
Polvo	2.0 mm (ABNT N° 10)	100 %	0 %
	0.84 mm (ABNT N° 20)	70 % mínimo	30 % máximo
	0.3 mm (ABNT N° 50)	50 % mínimo	50 % máximo
Molido fino	3.36 mm (ABNT N° 6)	95 % mínimo	5 % máximo
	0.5 mm (ABNT N° 35)	75 % máximo	25 % mínimo
Molido medio	3.36 mm (ABNT N° 6)	95 % mínimo	5 % máximo
	0.5 mm (ABNT N° 35)	25 % máximo	75 % mínimo
Molido grueso	4.8 mm (ABNT N° 4)	100 %	0 %
	1.0 mm (ABNT N° 18)	20 % máximo	80 % mínimo

ABNT: Asociación Brasileira de Normas Técnicas

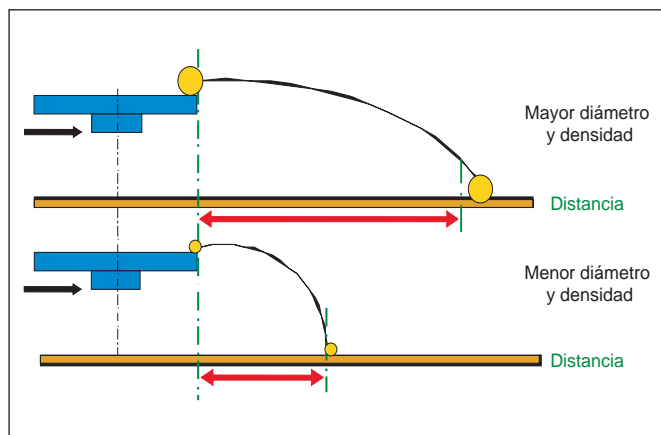


Figura 1. Esquema de la segregación de gránulos de fertilizantes con diámetros distintos utilizando la misma máquina aplicadora.

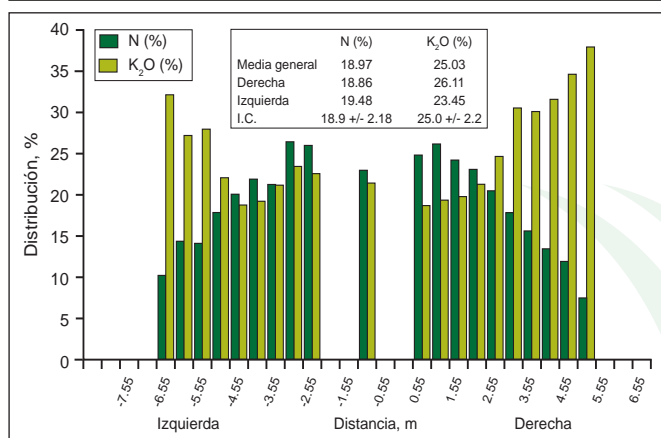


Figura 2. Efecto de la aplicación de una mezcla física de 22-00-22 (urea y cloruro de potasio) en la concentración de N y K en la zona de aplicación. El material se aplicó con un equipo dotado de un mecanismo de dosificación gravitacional y un mecanismo distribuidor de tipo pendular (Luz, P.H.C., datos no publicados).

Con respecto al estado físico, los fertilizantes se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos, pero en la agricultura Brasileña se utiliza más la forma sólida. Algunas empresas, principalmente en el sector cañero y algunas en los sectores de producción de papel, celulosa o cítricos utilizan fertilizantes líquidos. La principal ventaja de los fertilizantes líquidos es la mejor distribución, pues no están sujetos a segregación. Los fertilizantes en estado gaseoso están representados por el amoníaco anhidro que tiene menor costo por unidad de nutriente, sin embargo, este fertilizante no se utiliza en Brasil.

Según las normas del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento de Brasil (MAPA por sus siglas en Portugués), la granulometría de los fertilizantes, evaluada por medio de tamices clasifica los materiales en seis grupos (Tabla 1). Por regla general, los fertilizantes tienen los nutrientes en la forma más soluble, por lo tanto, más disponibles para la planta,

para cumplir con las exigencias físico-químicas del sistema suelo-planta. En este sentido, además del tamaño de las partículas es importante también la granulación. Los gránulos tienen un mejor desempeño con respecto a fluidez, higroscopicidad y endurecimiento, pues tienen una menor superficie de contacto de exposición al medio.

En el caso de los fertilizantes, la segregación puede producirse en el transporte, en el manipuleo de los productos [sacos de 50 kg o contenedores grandes (big bags) de 500 a 1 000 kg] y en la aplicación en el campo como se demuestra en el esquema presentado en la Figura 1. En ambos casos, el problema se vuelve aún mayor con el uso de productos que tienen más de un nutriente (mezclas N-P-K), o también con la aplicación de productos simples. Cuando un fertilizante que tiene gránulos de tamaños distintos se somete a lanzamiento mecánico, pueden ocurrir variaciones en la dosis de los nutrientes en la zona de aplicación. Para probar esto, se evaluó la variación transversal de la composición química de una mezcla física 22-00-22 compuesta de urea y cloruro de potasio aplicada con un equipo con un mecanismo de dosificación gravitacional y un mecanismo distribuidor de tipo pendular (Figura 2, Luz, P.H.C., datos no publicados). Los resultados demostraron una variación significativa de los contenidos de N y K a lo largo de la zona de aplicación causada por la variación en el peso de los gránulos de urea (más livianos) y de los de cloruro de potasio (más pesados).

La dureza de los gránulos es función de la materia prima utilizada en la fabricación del insumo y de la humedad del ambiente. Dadas las condiciones se pueden formar terrones muy duros que pueden afectar la disolución del material y que pueden ser difíciles de romper. Los terrones que se quiebran fácilmente se pueden disolver también con facilidad, mientras lo contrario sucede con los terrones duros. La dificultad con la que se quiebran los terrones está relacionada con los cuidados en el apilamiento del material y con su comportamiento de los dosificadores volumétricos, principalmente los helicoidales. La facilidad de disolución está relacionada con la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

La condición de fluidez, tema ya discutido para las enmiendas, está asociada con la granulometría y la humedad del producto. En el caso particular de los fertilizantes, la fluidez está íntimamente ligada con la higroscopicidad. Aun cuando los fertilizantes normalmente tienen buenas condiciones de fluidez debido a las características físico-químicas de los gránulos, estas condiciones están sujetas a la humedad del aire, ya que la humedad relativa crítica de los diversos materiales es variable y por eso tienen dificultad de fluir por los dosificadores y distribuidores. Además de afectar la

distribución en el campo, la absorción de agua por los fertilizantes lleva al apelmazamiento, principalmente durante el almacenamiento, lo que afecta la distribución del material en el campo.

Formas de aplicación

Las tres principales formas de aplicación de enmiendas y fertilizantes son: a) al voleo, b) en fajas y c) en líneas abajo y a un lado de las semillas. La adopción de uno u otro tipo de aplicación está relacionada con el producto a ser aplicado, con el cultivo y con el sistema de producción.

En el caso de la cal, yeso y fosfatos, que deben ser incorporados luego, generalmente se recomienda la aplicación del material en el área total utilizando equipos de distribución al voleo como se indicará más adelante. En condiciones de cultivos perennes, existe la posibilidad de aplicar las enmiendas y los fertilizantes en fajas en las zonas de la superficie del suelo donde se quiere intervenir. Para esto se utiliza equipo de aplicación al voleo con un dispositivo específico para direccionar el producto a la faja predeterminada. Este direccionador puede regular el largo, ancho y posición de la faja de aplicación.

Por otro lado, la forma de aplicación de fertilizantes más utilizada es la localización en banda continua a lo largo del surco, lo que direcciona la distribución del producto a las hileras de siembra del cultivo buscando colocar los fertilizantes al alcance del sistema radicular de las plantas. La aplicación puede hacerse a la siembra o en cobertera cuando el cultivo está creciendo en el campo.

Equipos de distribución

Cuando se pretende discutir la tecnología de aplicación de enmiendas y fertilizantes se debe prestar especial atención al equipo a utilizarse. A continuación se discuten los principales aspectos del equipo de aplicación de enmiendas y fertilizantes, destacándose los componentes de mayor interés.

Equipos de aplicación al voleo

La maquinaria destinada a la aplicación de cal, yeso y fosfatos pertenece al grupo de aplicadores de enmiendas. Estos equipos pueden ser arrastrados por tractor o pueden ser autónomos como los camiones con cubeta aplicadora.

En la **Figura 3** se presenta un esquema general de los aplicadores de enmiendas con sus principales constituyentes. Se dará énfasis al distribuidor y al dosificador porque éstos afectan directamente el desempeño del sistema.

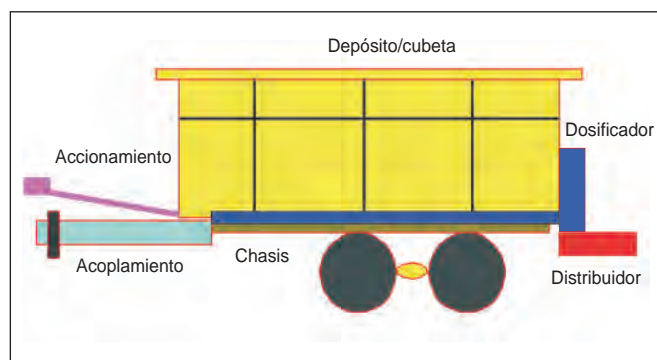


Figura 3. Esquema de los elementos constituyentes de un aplicador de enmiendas.

El mecanismo dosificador es el responsable del flujo del producto del depósito al distribuidor, o sea, por la dosis de la enmienda o fertilizante. De acuerdo con Mialhe (1986), el mecanismo dosificador puede ser gravitacional o volumétrico.

En el dosificador gravitacional el flujo del producto del reservorio al distribuidor ocurre por gravedad, siendo auxiliado, en algunos casos, por un agitador mecánico que opera sobre un orificio de apertura regulable. En el mercado Brasileiro se encuentran dosificadores gravimétricos con un distribuidor pendular, centrífugo con uno o dos discos.

Por otro lado, el dosificador volumétrico promueve un flujo, con un determinado volumen de producto, que es controlado de manera continua y que es retirado del fondo del depósito y encaminado hacia el distribuidor. Los principales tipos de mecanismos volumétricos son: a) estera, b) roseta y c) plato giratorio. Los dosificadores volumétricos son accionados por elementos mecánicos que mantienen la regularidad del vaciado. Los elementos mecánicos son accionados, a su vez, por los siguientes sistemas mecánicos: a) rueda de tierra, b) toma de potencia del tractor y c) motor hidráulico.

Actualmente, el principal avance tecnológico de los dosificadores es el accionamiento por motor hidráulico, lo que permitió el desarrollo de la tecnología de aplicación en dosis variables. Esto permite que el vaciado de la enmienda o el fertilizante varíe en función de la rotación del motor hidráulico, que a su vez responde a un comando de un sistema electro-mecánico enviado por un computador que procesa los mapas de recomendación de fertilización. Estos mapas de recomendación son el producto de muestreo georeferenciado de la fertilidad del suelo, diferente de la forma tradicional de muestreo, es decir, en zigzag, que lleva a la aplicación de dosis fijas en toda el área.

El mecanismo de distribución es el responsable de la aplicación efectiva del producto que viene del dosificador. La aplicación puede hacerse al suelo o a la planta, en caída libre o por lanzamiento mecánico que

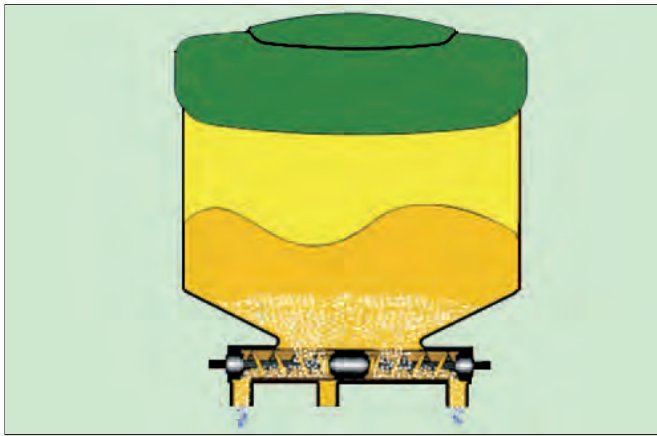


Figura 4. Esquema de un distribuidor de fertilizantes en línea con dosificador de tipo helicoidal.

da origen a un perfil transversal de aplicación que se discutirá posteriormente. Los principios de distribución clasifican a los distribuidores en los siguientes tipos: a) caída libre, b) fuerza centrífuga y c) movimiento pendular (Mialhe, 1986).

El distribuidor de caída libre promueve la distribución de la enmienda por acción de la gravedad. El producto cae libremente sobre la superficie del suelo, ya sea en líneas espaciadas a 10 o 15 cm, que es lo más común, o en fajas estrechas. Los principales representantes en el mercado de este distribuidor son conocidos como tipo caja, pudiendo estar asociados con un dosificador gravimétrico o volumétrico con estera transversal.

El distribuidor centrífugo se caracteriza por el lanzamiento radial de la enmienda utilizando uno o dos discos (rotores) horizontales. Estos discos poseen aletas dispuestas radialmente, fijas o no, de forma recta o curvilínea. En el mercado Brasileiro se conocen como distribuidores centrífugos con uno o dos discos y se utilizan ampliamente para la aplicación de enmiendas, principalmente cal. Estos dispositivos normalmente son halados por un tractor. Una tendencia que se observa en los cultivos que necesitan preparación de suelo en grandes áreas por una sola vez, como la caña de azúcar, es la instalación de un depósito con un mecanismo dosificador tipo estera central sobre los ejes de un camión, haciéndose de esta forma un aplicador autopropulsado. La principal ventaja de este tipo de equipo es el alto rendimiento y versatilidad de la aplicación de diversos productos como cal, yeso y fuentes de fósforo.

El distribuidor de tipo pendular es aquel que posee un tubo horizontal, ligado a un mecanismo que tiene un movimiento pendular. Lo utilizan productores medianos y pequeños porque se trata de un equipo de poca inversión, pero tiene poca capacidad de carga debido a que se acopla a los tres puntos de toma de fuerza del tractor y además debe estar asociado con dosificadores gravimétricos.

Equipos de aplicación en línea

Los distribuidores en línea generalmente están asociados con la aplicación de fertilizantes, colocándolos al lado y debajo de la semilla o a un lado o encima de las líneas del cultivo. El mecanismo distribuidor, generalmente de caída libre, tiene un tubo de salida individual en cada línea. El mecanismo dosificador puede ser de los siguientes tipos: a) helicoidal con rosca sin fin, b) roseta, c) plato giratorio de discos horizontales rotativos, d) correas continuas y e) cilindros acanalados.

El mecanismo dosificador en línea más utilizado actualmente por los fabricantes es el de tipo helicoidal (**Figura 4**), que consta de un tornillo sin fin colocado abajo del depósito de fertilizantes y que es accionado por un sistema de transmisión por engranajes que permite el vaciado del fertilizante en función de las especificaciones de la hélice, en relación a los diámetros internos y externos y al paso o distancia entre las espirales, además de la velocidad de accionamiento.

Los dosificadores de rotores dentados fueron muy utilizados en las sembradoras de grano pequeño y se colocaban al fondo del depósito de fertilizantes. Se compone de un rotor dentado, dispuesto de modo horizontal, que gira sobre una placa de apoyo que contiene un orificio de salida para el fertilizante. El vaciado del material depende de la velocidad de rotación del rotor y de una lengüeta ajustable que controla el espesor de la capa de fertilizante que es empujada por los dientes del rotor.

El dosificador de disco rotativo horizontal se utilizó mucho en los surcadores y abonadoras utilizadas en caña de azúcar. El equipo consta de un disco rotativo liso acoplado a un engranaje de corona que gira contra una lengüeta raspadora que direcciona el fertilizante a una copa colectora y de allí al tubo de salida.

Agricultura de precisión

El sistema de aplicación de enmiendas y fertilizantes predominante en la agricultura Brasileira es el convencional, es decir, se trabaja con parámetros que representen la fertilidad del suelo lo que genera una recomendación constante para toda el área. La aplicación se realiza en dosis fijas usando una técnica de fertilización que se basa en la media de la fertilidad del área a intervenir. Si se considera que el suelo es por naturaleza variable en sus atributos químicos, la aplicación de enmiendas y fertilizantes en dosis fijas no toma en cuenta esa variabilidad y, de esta forma, subestima o sobreestima la dosis de enmiendas o fertilizantes a aplicarse en un determinado lote de producción. Uno de los pre-requisitos para la implantación de un sistema de agricultura de precisión

es considerar la variabilidad espacial de los atributos físico-químicos del suelo para aplicar los insumos en dosis variables.

El mapeo de los atributos de suelos y plantas se hace por medio de levantamientos sistemáticos de las características que se pretende estudiar. El levantamiento debe ser geo-referenciado, es decir en cada punto de muestreo debe tener información sobre longitud, latitud y altitud. Los sistemas de posicionamiento global (GPS) son la base de la agricultura de precisión, ya que permiten utilizar los mismos lectores posicionales en cualquier parte del globo terrestre y gracias a esto, el georeferenciamiento de los puntos de muestreo dejó de ser una tarea difícil y complicada.

Fundamentalmente, la agricultura de precisión consiste en una serie de acciones que tienden a reducir las ineficiencias y aumentar el retorno económico de la producción agrícola. La adopción de técnicas de agricultura de precisión solo tiene sentido cuando el agricultor hace todo el esfuerzo para reducir la eficiencia existente en la producción agrícola. Los factores limitantes y la aplicación excesiva o deficiente de los insumos de la producción son identificadas a través de técnicas de agricultura de precisión. Una forma común de ineficiencia resulta cuando la productividad de un determinado lote se encuentra limitada por algún factor que podría ser controlado con adecuada administración (Balastreire, 2000).

Mapeo de la fertilidad del suelo

Los fertilizantes son necesarios en la producción agrícola, pero no siempre los mismos fertilizantes son adecuados para todos los tipos de suelos y para todos los cultivos. Esta heterogeneidad puede ocasionar situaciones en las cuales la exigencia nutricional del cultivo no es atendida por falta de nutrientes o puede haber un desperdicio de recursos por exceso de fertilización.

El mapeo de la fertilidad del suelo es una de las principales herramientas de la agricultura de precisión. Consiste en el muestreo detallado de los suelos y de la producción del cultivo con el uso de equipos y técnicas modernas (GPS, cuatriciclo, muestreador automático y software compatible). El principio básico se fundamenta en relacionar los resultados de los análisis químicos y físicos del suelo con su posición geográfica obtenida con el GPS durante el proceso de muestreo (Balastreire, 2000).

La geoestadística es un método común de estudiar la variabilidad espacial. La geoestadística se fundamenta en la teoría de las variables regionalizadas que asume que los valores de una propiedad del suelo están de alguna forma relacionados con su distribución espacial.

De esta forma, las observaciones tomadas a cierta distancia deben ser más semejantes que aquellas tomadas a distancias mayores (Vieira et al., 1997, citado por Balastreire, 2000). Guedes Filho (2009) utilizó esta herramienta en un área con rotación de cultivos bajo siembra directa por 23 años y observó que si bien los atributos químicos presentaban, en promedio, contenidos que eran adecuados para el desarrollo de los cultivos, su variabilidad espacial justificó el manejo diferenciado de las aplicaciones de cal y fertilizantes.

El uso de técnicas de agricultura de precisión con la finalidad de manejar la variabilidad de los atributos de la fertilidad del suelo introduce un hecho nuevo en las labores de campo, en la medida que deja de considerarse determinadas áreas agrícolas como uniformes para dividir las en zonas de manejo más pequeñas que posean características propias que afectan los índices de producción agrícola. Estas zonas pasan a ser analizadas individualmente en cuanto al tipo y cantidad de fertilizantes a recibir (Saraiva, 2000).

Aplicación de dosis variables

La aplicación de fertilizantes en dosis variables tiene el potencial de optimizar el uso de fertilizantes y minimizar los impactos negativos de la actividad agrícola en el ambiente. Aun cuando esta técnica ya es utilizada a gran escala, todavía no existen muchos estudios que comprueben los efectos positivos de esta técnica para el agricultor y para el ambiente.

El manejo localizado, objetivo final de la agricultura de precisión, no es exclusivamente una consecuencia directa de la utilización de equipos dotados de sensores, sistemas de posicionamiento y sistemas computarizados de control de aplicación de insumos. Es más bien la integración de éstos y otros sistemas de generación, análisis y utilización de aquella información que refleje la variabilidad que puede ser tratada en forma localizada. En este sentido, son relevantes los recursos geoestadísticos para analizar la variabilidad espacial, los sistemas y sensores para mapeo de la producción, los sistemas de información geográfica (SIG) y el GPS. Existen además otras tecnologías que favorecen el desarrollo de la tecnología de dosis variable como los controladores de aplicación de insumos en una barra de luz que permite a los operadores manejar el espaciado entre los pases de la máquina de aplicación.

Todo esto le posibilita al productor manejar y variar las dosis de aplicación de fertilizantes de acuerdo con las diferencias en producción del cultivo y las diferencias en los parámetros del suelo. Al contrario de la aplicación de dosis uniformes de fertilizantes y enmiendas, que pueden resultar en áreas con aplicaciones de dosis más bajas o más altas de las necesarias, la aplicación de dosis

Tabla 2. Recomendaciones de enmiendas y fertilizantes para la hacienda Tamanduá (Agroindustrial El Dorado), Uberlandia, Mato Grosso, Brasil, por el sistema tradicional de muestreo de suelo y diseño de recomendaciones de fertilización.

Lote	Lote ha	----- Cal ----- t ha ⁻¹	Total (t)	----- Yeso ----- t ha ⁻¹	Total (t)	---- Fósforo (P ₂ O ₅) ---- kg ha ⁻¹	Total (t)	---- Potasio (K ₂ O) ---- kg ha ⁻¹	Total (t)
AI	77.3	1.0	77.3	0	0	100	7.7	75	5.8
AII	93.9	0.5	47.0	0	0	100	9.4	75	7.0
BI	102.9	1.0	102.9	0.5	51.5	100	10.3	60	6.2
BII	136.3	1.0	136.3	0.5	68.2	100	13.6	75	10.2
C	160.1	1.0	160.1	0.5	80.1	100	16.0	60	9.6
D	100.1	1.5	150.2	0.5	50.1	100	10.0	60	6.0
Total	670.6		673.8		249.9		67.0		44.8

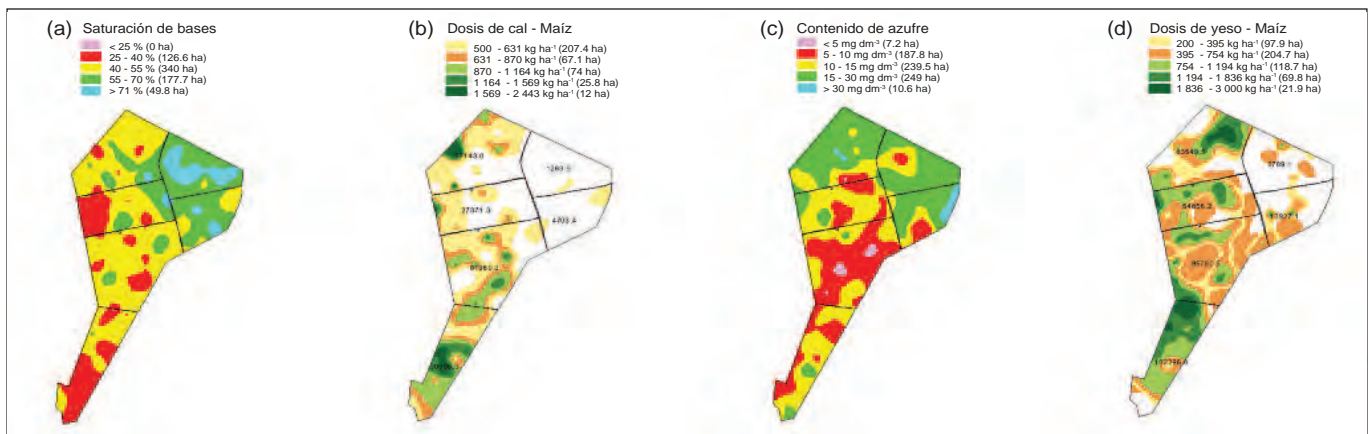


Figura 5. Mapas de variabilidad espacial: a) saturación de bases en la capa de 10 a 20 cm de profundidad, b) recomendaciones de cal, c) contenido de azufre, en la capa de 10 a 20 cm de profundidad y d) recomendaciones de aplicación de yeso para la hacienda Tamanduá (Agroindustrial El Dorado), Uberlandia, Mato Grosso, Brasil (APAGRI, datos no publicados).

variables puede favorecer la producción al aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes, con la simultánea reducción del potencial de contaminación ambiental (Robert, 1993, citado por Machado et al., 2004).

En estudio de caso conducido por Agroindustrial El Dorado en Uberlandia, Mato Grosso, Brasil, con el cultivo de maíz, evidenció los beneficios de la agricultura de precisión con la aplicación de dosis variables de insumos. En la **Tabla 2** se presentan las dosis promedio de cal, yeso, P y K que se aplicaron antes de la siembra utilizando el sistema tradicional de evaluación de la fertilidad del suelo. Se observa que las dosis son únicas para todos los lotes de la hacienda, a pesar que se tomaron muestras de suelo en cada lote.

En la misma hacienda se realizó un muestreo de suelos en una grilla de 4 hectáreas y se georeferenció cada sitio de muestreo para la posterior interpolación de los resultados y la generación de mapas de fertilidad y de prácticas correctivas. Las **Figuras 5 y 6** presentan los mapas de variabilidad espacial de algunos atributos del suelo, como saturación de bases (SB) y los contenidos

de S, P y K, así como los mapas de recomendaciones de aplicación de cal, yeso, P y K en dosis variables obtenidas de los resultados de los análisis de suelos provenientes del muestreo georeferenciado. Aun cuando se tenía el mapa de contenidos de S, la recomendación de la aplicación de yeso se hizo basándose en los contenidos de aluminio (Al) y en la saturación de bases de la capa superficial del suelo. La recomendación de aplicación de cal, P y K fue la misma que con la metodología tradicional.

Se observa que el suelo presentó una gran variabilidad de los atributos químicos presentados. Por esta razón, las dosis de enmiendas recomendadas también variaron significativamente, inclusive en áreas que no necesitaban de la aplicación de cal y yeso (**Tabla 3**). Aun cuando se observa una variación mayor en las dosis máxima y mínima en el sistema de agricultura de precisión, comparado con el sistema tradicional que aplica una dosis única en todo el lote.

De esta manera, el sistema de agricultura de precisión adoptado en la hacienda generó una economía de 411 t de cal, 3 t de P₂O₅ y 3 t de K₂O en comparación con el

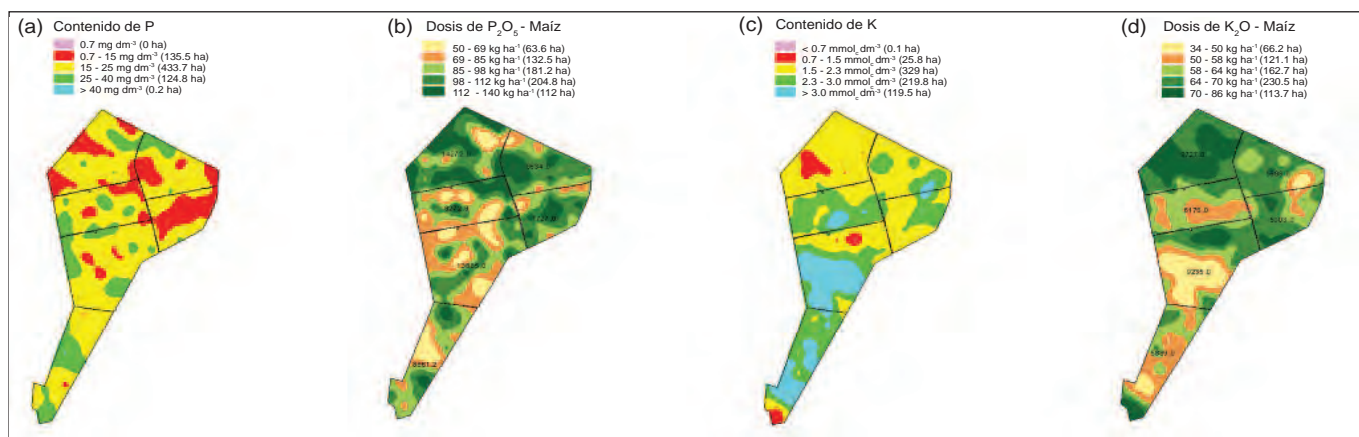


Figura 6. Mapas de variabilidad espacial: a) contenido de fósforo (resina) de la capa de 10 a 20 cm de profundidad, b) recomendaciones de fósforo (kg ha^{-1} de P_2O_5), c) contenido de potasio en la capa de 10 a 20 cm de profundidad y d) recomendaciones de aplicación de potasio (kg ha^{-1} de K_2O) para la hacienda Tamanduá (Agroindustrial El Dorado), Uberlandia, Mato Grosso, Brasil (APAGRI, datos no publicados).

Tabla 3. Recomendaciones de cal, yeso, fósforo y potasio para la hacienda Tamanduá (Agroindustrial El Dorado), Uberlandia, Mato Grosso, Brasil, por el sistema de agricultura de precisión (APAGRI, datos no publicados).

Información	Cal	Yeso	Fósforo (P_2O_5)	Potasio (K_2O)
Area de aplicación (ha)	355.3	476.2	670.7	670.7
Dosis mínima (kg ha^{-1})	500	200	50	34.4
Dosis máxima (kg ha^{-1})	2 443	3 000	140	85.6
Consumo (t)	263.4	369.2	63.6	42.0

zada de enmiendas y fertilizantes.

Parámetros de evaluación

Para facilitar el entendimiento de las variables relacionadas con el desempeño de los equipos de aplicación de enmiendas y fertilizantes es pertinente revisar los siguientes conceptos:

- ◆ **Vaciado** – Masa o cantidad de producto liberada por unidad de tiempo, se expresa en kg min^{-1} , t h^{-1} .

- ◆ **Dosis** – Masa o cantidad de producto aplicado por unidad de área, se expresa en kg ha^{-1} , t ha^{-1} .

- ◆ **Simetría** – Se refiere al posicionamiento del producto en relación a los ejes de aplicación, es decir, indica que la cantidad de producto que se ha aplicado al lado izquierdo sea igual a la aplicada al lado derecho. El coeficiente de simetría (CS) se calcula de la siguiente forma:

$$CS = \frac{\text{Cantidad media del lado derecho (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Cantidad media del lado izquierdo (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

- ◆ **Segregación** – Es el proceso que ocurre en la distribución de las fracciones granulométricas originales del producto cuando éste se somete a lanzamiento mecánico, es decir, compara la distribución de las diferentes fracciones granulométricas del producto antes y después de la aplicación.

- ◆ **Perfil transversal** – Se refiere a la distribución del producto en sentido perpendicular al eje de aplicación, define el alcance total del eje. Para determinar este parámetro se utilizan colectores dispuestos transversalmente al sentido de desplazamiento del tractor (**Foto 1**).

sistema tradicional. Sin embargo, se usaron 119 t más de yeso (**Figura 7**). Estos datos demuestran que la agricultura de precisión puede generar economía de insumos en algunos casos, pero en otros puede aumentar su necesidad. Debe tenerse en mente que la principal ventaja de la agricultura de precisión es la de recomendar la cantidad adecuada de insumos para cada lote, considerando la variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo.

Desempeño de los equipos de aplicación

El desempeño de los equipos de aplicación de enmiendas y fertilizantes relaciona tanto parámetros de construcción como de operación (Coelho et al., 1992). Según Vitti y Luz (1997), en su discusión sobre el desempeño de la aplicación de enmiendas y fertilizantes, indican que muchas veces los agricultores vinculan la producción a los aspectos operacionales, o se preocupan solamente de la cantidad de trabajo realizada, pero en la mayoría de los casos no se preocupan del aspecto cuantitativo del servicio. Esta actitud puede llevar al fracaso al proceso de manejo químico del suelo para obtener altos rendimientos. Esto normalmente ocurre por desconocimiento de algunos parámetros de evaluación, como el perfil transversal y longitudinal, simetría y segregación. En la **Figura 8** se presentan los principales parámetros, cuantitativos y cualitativos, para la evaluación de la aplicación meca-

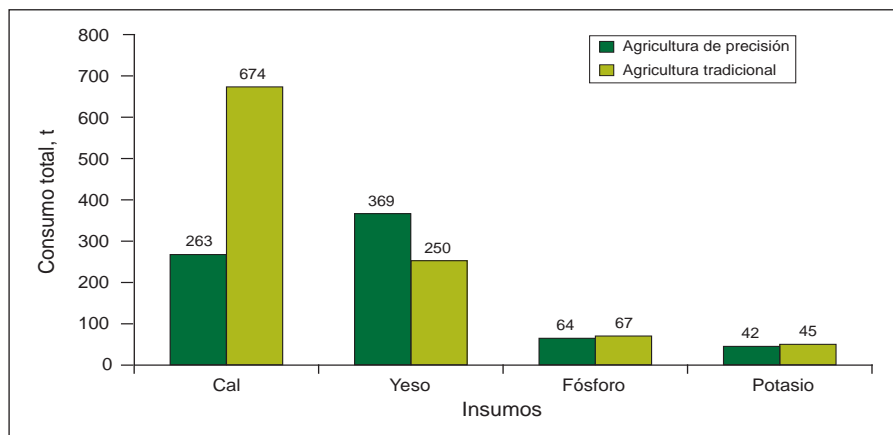


Figura 7. Comparación de las necesidades de insumos entre el sistema tradicional de muestreo del suelo y el sistema de agricultura de precisión (grilla de 4 ha) en una hacienda de 671 ha en el municipio de Uberlandia, Mato Grosso, Brasil.

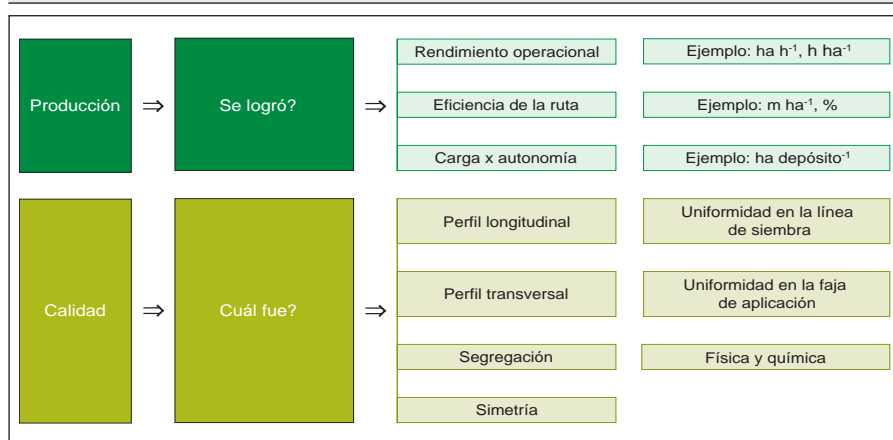


Figura 8. Aspectos cuantitativos y cualitativos de la aplicación mecánica de enmiendas y fertilizantes.

◆ **Perfil longitudinal** – Se refiere a la distribución del producto en el sentido de desplazamiento del equipo (**Foto 1**). Se determina colocando colectores paralelos al eje de aplicación.

Metodología de evaluación

Se debe enfatizar que la metodología de evaluación que se describe en este artículo para evaluar la calidad de la distribución de enmiendas y fertilizantes analiza parámetros en las condiciones reales de aplicación de los productos en el campo, en la propiedad del agricultor. No se refiere a los ensayos que hacen los fabricantes en condiciones controladas con equipos nuevos.

Una serie de factores pueden incidir en la evaluación de la calidad en el campo como la velocidad y dirección del viento, condiciones del terreno, condiciones del equipo de aplicación o del tractor, operador, condiciones de los productos (granulometría, humedad). En lo posible, se debe intentar minimizar estos efectos. Al planear una evaluación de la calidad de aplicación se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- ◆ **Sitio para la evaluación** – Buscar un sitio plano con un suelo bien preparado.
- ◆ **Condiciones del equipo** – El objetivo es evaluar la calidad de la distribución de los insumos en las condiciones reales de aplicación. Se sugiere realizar el mantenimiento básico de los equipos y repararlos cuando fuese necesario buscado disminuir las interferencias en la evaluación. Obviamente, los equipos en mal estado pueden producir resultados sin valor.
- ◆ **Entrenamiento** – Entrenar a los operadores para que utilicen la misma marcha y la misma velocidad en todas las pasadas sobre los colectores.
- ◆ **Dirección del viento** – Siempre que sea posible se debe direccionar los colectores de modo que se sitúen en forma transversal a la dirección del viento predominante.
- ◆ **Calidad del producto** – Verificar que los productos estén en condiciones normales de uso, sin excesiva humedad y sin terrones.

La información que se debe recolectar en cada proceso de evaluación de la aplicación son: a) dirección predominante e intensidad del viento, b) temperatura media y humedad relativa, c) marcha utilizada por el tractor y rotaciones del motor durante la evaluación (deben ser las mismas que se utilizan en el campo durante las aplicaciones), d) número de pasadas del conjunto tractor-aplicador sobre los colectores, lo que representa las repeticiones y e) media de la dosis programada para aplicación. Las etapas para conducir la evaluación son las siguientes:

◆ **Instalación de los colectores** – Los colectores deben instalarse en el sentido transversal y longitudinal a los pases del conjunto tractor-aplicador. Para la instalación de los colectores en sentido transversal se deben utilizar 100 colectores de 1.0 x 0.25 m (**Foto 2**). Se debe iniciar instalando los colectores del centro hacia los extremos, es decir, los primeros colectores se localizan en el centro de rodado del tractor. Normalmente se colocan dos colectores en esa posición. Dejar espacio suficiente para las ruedas y continuar con la instalación de los colectores sin dejar espacio entre ellos. El largo del



Foto 1. Formas de evaluación del perfil transversal y longitudinal para determinar la calidad de distribución de enmiendas y fertilizantes.

perfil transversal es de 25 m (100 bandejas de 0.25 m) más el espacio que se deja para las ruedas del tractor. Este largo es suficiente para evaluar cualquier tipo de equipo y producto. En el sentido longitudinal (Foto 3) también es posible utilizar colectores de 1.0 x 0.25 m o cualquier otro tipo de colector. Es importante que estos colectores estén dispuestos en secuencia, uno al lado del otro, hasta completar una distancia de 25 m. En el interior de los colectores se coloca una tela fina para amortiguar el impacto de los gránulos y evitar que caigan fuera del colector.

- ◆ **Paso del conjunto tractor-aplicador** – Cargar el depósito del equipo con una cantidad media de producto. Con la misma marcha y rotación del motor y con la misma regulación del equipo que se utiliza normalmente para la aplicación en el campo iniciar el movimiento del conjunto tractor-aplicador 20 m antes de llegar a los colectores para regularizar la aplicación. Pasar sobre toda el área de los colectores. Repetir de 6 a 10 veces el paso sobre las bandejas. En cada una de esas pasadas se debe observar la velocidad del tractor. Anotar el tiempo utilizado para el recorrido (tiempo inicial al inicio de las bandejas y tiempo final al término de las bandejas), así como la distancia. Se sugiere también anotar la velocidad del viento en cada pasada, en cinco posiciones a lo largo del trecho de evaluación, debido a que las ráfagas de viento pueden comprometer la evaluación. Por ejemplo, si el perfil longitudinal tienen 25 m, anotar la velocidad del viento al inicio (0 m) y a los 6.25, 12.5, 18.75 y 25 m. El conjunto tractor-aplicador pasa solamente por el centro del perfil transversal. No es aconsejable hacer pasadas simulando la aplicación del producto en las franjas vecinas como ocurre en el campo, debido a que el traslape se simula en planillas electrónicas en el computador.



Foto 2. Detalle de la instalación de los colectores para recepción de muestras del perfil transversal.



Foto 3. Detalle de la instalación de los colectores para recepción de muestras del perfil longitudinal.



Foto 4. Detalle del equipo Hércules 24 000, de la Empresa Stara, con un mecanismo dosificador volumétrico tipo estera central y con un mecanismo distribuidor centrífugo con doble disco.

- ◆ **Pesaje de los colectores** – Colocar el producto recogido en cada colector en una bolsa plástica identificada y realizar el pesaje de la masa del producto en el laboratorio, evitando así la interferencia del viento. Si esto no es posible, se debe pesar cuidadosamente en el campo y registrar el peso para luego hacer los cálculos correspondientes. Si fuese necesario, se puede también hacer el análisis químico y granulométrico del producto colectado.

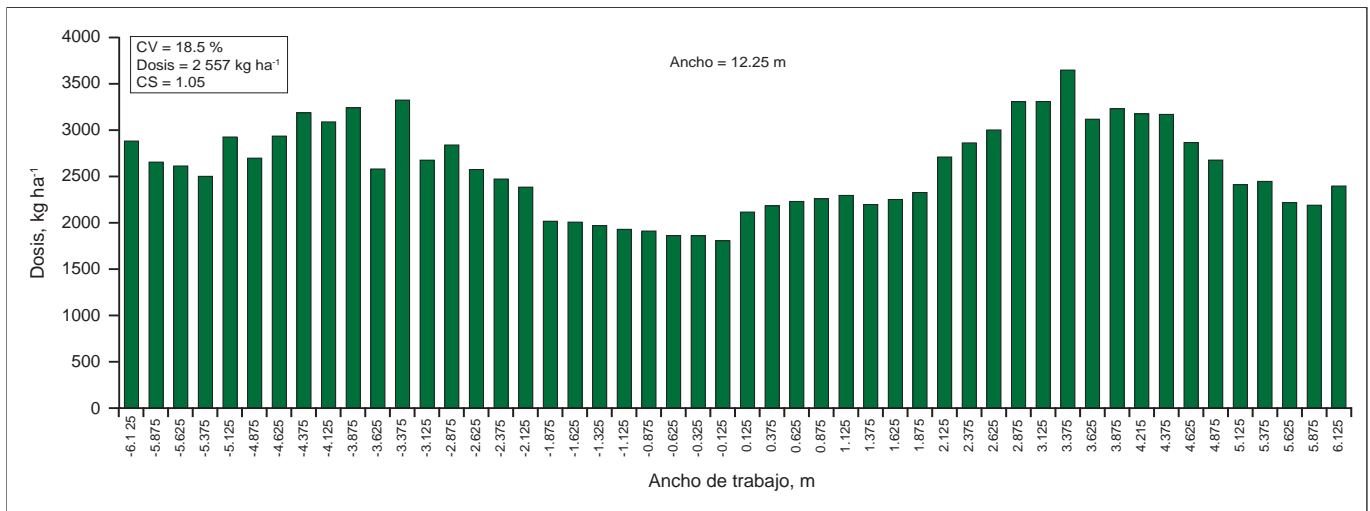


Figura 9. Perfil transversal de aplicación de cal con un equipo autopropulsado (Stara Hércules 24 000), con un ancho óptimo de trabajo de 12.25 m.

◆ **Evaluación de los resultados** – El perfil transversal permite obtener la siguiente información: a) dosis de aplicación media, b) ancho óptimo de trabajo, c) coeficiente de simetría, d) composición física y química, y d) segregación. El perfil longitudinal permite obtener: a) vaciado del dosificador, b) dosis media, máxima y mínima, c) variación de la dosis con una altura de carga (para esto debe anotarse la altura de la carga en cada pasada).

Para evaluar los resultados se debe considerar como aceptable un coeficiente de variación (CV) de 15 % para fertilizantes y 20 % para enmiendas cuando el mecanismo de distribución distribuye el producto al voleo y de 5 % para fertilizantes y 10 % para enmiendas cuando el dispositivo es de caída libre. En relación al coeficiente de simetría, son aceptables valores entre 0.9 y 1.1. Con respecto a las dosis, son aceptables variaciones entre 5 y 10 %, pero se debe tener como meta el llegar a variaciones del 2 a 3 % de la dosis media.

velocidad del viento al momento de la prueba de 8.0 km h⁻¹. La velocidad media de desplazamiento fue de 11.2 km h⁻¹. Se utilizó cal dolomítica que el día de aplicación tuvo 1.8 % de humedad. El equipo estaba regulado para aplicar 2.0 t ha⁻¹.

Los datos se trabajaron en hojas de cálculo electrónicas simulando diversas opciones de traslape. Se observó que el ancho óptimo de trabajo, es decir, el ancho de trabajo más grande que proporcione el menor CV (15 a 20 %) fue de 12.25 m (**Figura 9**). El coeficiente de simetría fue (CS) de 1.05, adecuado para este tipo de producto.

El perfil longitudinal de esta evaluación evidenció que las dosis máxima, mínima y media fueron de 2 295, 1 375 y 1 875 kg ha⁻¹, respectivamente, con un CV de 13.2 % (**Figura 10**).

Estos datos demuestran que el equipo tiene buena calidad de aplicación de la cal en las condiciones de la prueba, obteniendo un excelente rendimiento de trabajo, teniendo en consideración una velocidad media de trabajo de 11.2 km h⁻¹ y un ancho de trabajo de 12.25 m.

Resultados experimentales

Aplicación de cal

Se condujo una prueba de aplicación de cal en la Central San Manuel, municipio de San Manuel, San Pablo, Brasil, los días 5 y 6 de marzo del 2007. Se utilizó un equipo autopropulsado marca Stara, modelo Hércules 24 000 (**Foto 4**), con un mecanismo de dosificación volumétrica tipo estera central y con un mecanismo distribuidor centrífugo con doble disco. El día de la prueba la temperatura media era de 29.2 °C, humedad relativa de 42 % y

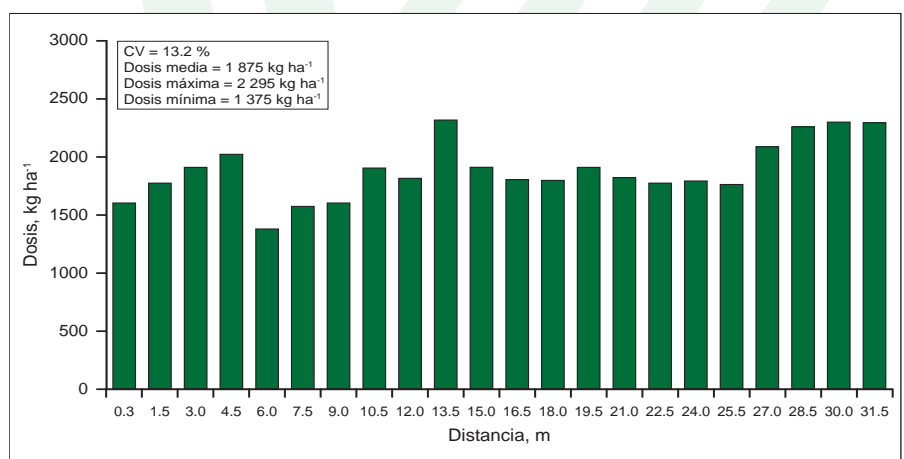


Figura 10. Perfil longitudinal de aplicación de cal con un equipo autopropulsado (Stara Hércules 24 000).

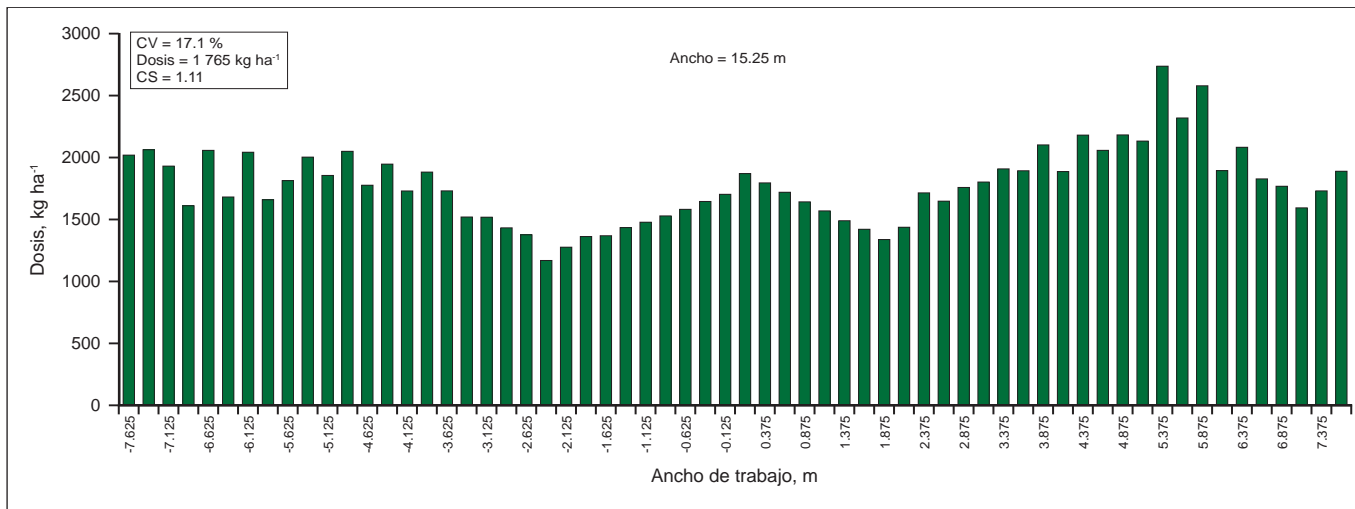


Figura 11. Perfil transversal de la aplicación de yeso con un equipo autopropulsado (Stara Hércules 24 000), con un ancho óptimo de trabajo de 15.25 m.

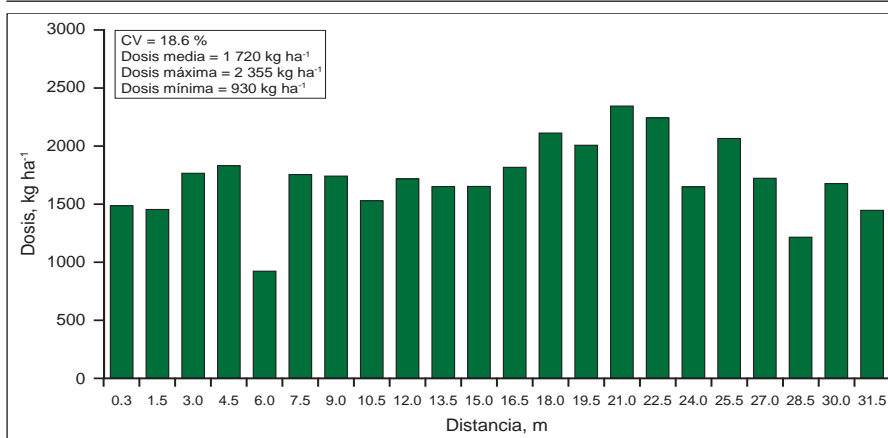


Figura 12. Perfil longitudinal de la aplicación de yeso con un equipo autopropulsado (Stara Hércules 24 000).

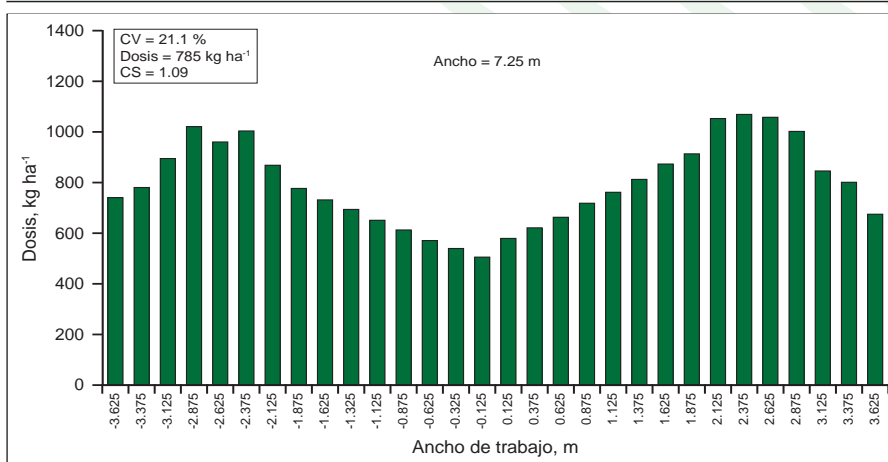


Figura 13. Perfil transversal de la aplicación de roca fosfórica Gafsa con un equipo autopropulsado (Stara Hércules 24 000), con un ancho óptimo de trabajo de 7.25 m.

la humedad relativa de 32 % y la velocidad del viento de 10.7 km h⁻¹.

Se observó que el implemento fue eficiente para la aplicación de yeso agrícola, que presenta la desventaja de tener alta humedad, lo que normalmente dificulta la aplicación en el campo.

Adoptando el mismo procedimiento usado para el cálculo del traslape de la cal, se observó que el ancho óptimo de trabajo para los traslapes de yeso fue de 15.25 m, con un CV de 17.1 % y un CS de 1.11. En estas condiciones, la dosis media fue de 1 765 kg ha⁻¹ (Figura 11).

En la prueba longitudinal las dosis máxima, mínima y media fueron de 2 355, 930 y 1 720 kg ha⁻¹, respectivamente, con un CV de 18.6 % (Figura 12). Es decir, la variación en dosis a lo ancho de la faja de aplicación fue mayor que para la cal, lo que está relacionado con la mayor humedad del yeso agrícola que dificulta el fluido del producto en el mecanismo distribuidor del equipo.

Aplicación de fósforo

Aplicación de yeso

El día 5 de marzo del 2007 se realizó una prueba de aplicación de yeso agrícola con el mismo equipo descrito anteriormente. Se utilizó yeso con 15 % de humedad en un equipo regulado para aplicación de 2 t ha⁻¹ de producto. La temperatura media fue de 34 °C,

Se condujo una prueba utilizando el equipo antes descrito con roca fosfórica Gafsa, con una humedad de 5.1 % el día de la aplicación. La temperatura media fue de 32 °C, la humedad relativa de 38 % y la velocidad media del viento de 3.1 km h⁻¹. La velocidad media de desplazamiento, que estaba regulada para aplicar 520 kg

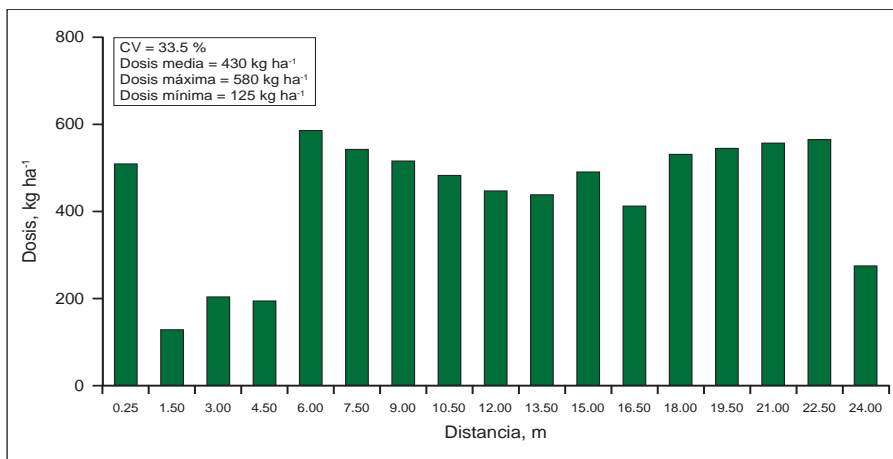


Figura 14. Perfil longitudinal de la aplicación de roca fosfórica Gafsa con un equipo autopulsado (Stara Hércules 24 000).



Foto 5. Detalle de los equipo evaluados en la prueba de aplicación de fertilizantes: a) con mecanismo distribuidor pendular, b) mecanismo centrífugo con un disco, c) mecanismo centrífugo con dos discos cóncavos, y e) mecanismo centrífugo con dos discos planos.

deba a un taponamiento momentáneo de la salida del producto a su paso por los primeros colectores, lo que finalmente acabó comprometiendo los resultados. Como la dosis de roca es normalmente pequeña, es necesario disminuir la altura del mecanismo dosificador, lo que facilita el taponamiento. Como esta es una situación que normalmente ocurre en el campo, se debe verificar constantemente que el producto esté fluyendo por mecanismo dosificador, ya que este tipo de equipo presenta limitaciones para trabajar con bajas dosis de insumos.

Aplicación de fertilizantes

Se condujo un estudio de tecnología de aplicación de fertilizantes en la Facultad de Zootecnia e Ingeniería de Alimentos de la USP, en Pirassununga, San Pablo, Brasil, con el objetivo de verificar la interacción entre diferentes aplicadores y cuatro tipos de cloruro de potasio (KCl) provenientes de diferentes partes del mundo. Los aplicadores probados fueron: a) centrífugo con dos discos planos (Rotaflow), b) centrífugo con dos discos cóncavos (Superflow), c) centrífugo con un disco (Soft), y e) pendular (Royalflow). Los tipos de KCl evaluados provenían de Rusia, Canadá, Israel y Alemania. En la Foto 5 se presenta el detalle de los equipos evaluados. Todos los equipos tenían un mecanismo dosificador de caída libre. Los productos de diferente origen utilizados en las pruebas se obtuvieron directamente de los navíos en el puerto, luego de la importación, para eliminar los efectos

de la descarga y transporte en las propiedades físicas de los fertilizantes.

de la descarga y transporte en las propiedades físicas de los fertilizantes. Todas las pruebas fueron conducidas en condiciones ambientales normales, con temperaturas que variaron entre 24 y 34 °C, humedad relativa entre 30 y 50 %, velocidad de viento de 0.2 a 1.22 km h⁻¹ y velocidad de desplazamiento entre 7.5 a 8.3 km h⁻¹.

ha⁻¹ de producto, fue de 11.8 km h⁻¹ durante las 10 pasadas del equipo sobre los colectores. Se observó que el ancho óptimo de trabajo fue de 7.25 m, el cual es bastante inferior al obtenido con la cal y el yeso, debido a la menor dosis de aplicación de roca fosfórica. El CV fue menor a 21.1 % y el CS fue de 1.09 (Figura 13).

La prueba longitudinal evidenció una elevada variación en las dosis de roca a lo largo de los colectores. Las dosis máxima, mínima y promedio fueron de 580, 125 y 430 kg ha⁻¹, respectivamente, con un CV de 33.5 % (Figura 14). Esa elevada variación probablemente se

deba a un taponamiento momentáneo de la salida del producto a su paso por los primeros colectores, lo que finalmente acabó comprometiendo los resultados. Como la dosis de roca es normalmente pequeña, es necesario disminuir la altura del mecanismo dosificador, lo que facilita el taponamiento. Como esta es una situación que normalmente ocurre en el campo, se debe verificar constantemente que el producto esté fluyendo por mecanismo dosificador, ya que este tipo de equipo presenta limitaciones para trabajar con bajas dosis de insumos.

En la Tabla 4 se presentan los valores de mayor ancho de trabajo con CV < 20 % (los equipos Royalflow y Soft no obtuvieron CV < 20 % con KCl proveniente de Rusia). Los resultados permiten concluir que la mayor

Tabla 4. Parámetros del perfil transversal y longitudinal de la aplicación de cuatro tipos de KCl y de cuatro tipos de aplicadores.

Aplicadores	Origen	----- Perfil transversal -----				----- Perfil longitudinal -----			
		AT m	CV %	CS	RO ha h ⁻¹	CV %	----- Dosis (kg ha ⁻¹) ----- Máxima Mínima Media		
Pendular	Rusia	6.3	31.7	1.83	2.9	4.9	575	485	535
	Canadá	9.3	18.4	0.71	5.0	7.6	645	460	550
	Israel	9.3	19.1	1.19	4.8	5.9	535	420	478
	Alemania	6.8	19.9	0.84	3.3	7.1	600	530	589
	Media	7.9	22.3	1.14	4.0	6.4	589	474	538
Centrífugo con un disco	Rusia	8.3	30.5	1.66	4.1	6.5	220	170	194
	Canadá	11.8	19.7	1.19	6.4	5.9	345	265	310
	Israel	12.3	18.8	0.80	6.9	9.7	265	140	234
	Alemania	9.3	18.6	1.28	4.8	10.0	245	175	208
	Media	10.4	21.9	1.23	5.6	8.0	269	188	237
Centrífugo con dos discos cóncavos	Rusia	14.3	17.9	1.18	7.9	4.0	284	236	261
	Canadá	12.3	19.8	1.34	6.3	5.5	310	240	280
	Israel	13.3	17.5	1.08	7.2	4.3	241	196	221
	Alemania	12.3	16.4	1.24	6.4	4.0	248	211	228
	Media	13.0	17.9	1.21	6.9	4.5	271	221	248
Centrífugo con dos discos planos	Rusia	14.3	13.5	0.86	8.3	12.3	285	165	335
	Canadá	14.3	12.6	0.87	8.5	11.5	390	235	321
	Israel	14.3	11.0	0.92	8.3	11.9	350	195	270
	Alemania	14.3	12.1	0.90	8.3	9.6	300	200	259
	Media	14.3	12.3	0.89	8.3	11.3	331	199	271

AT = ancho de trabajo, CV = coeficiente de variación, CS = coeficiente de simetría, RO = rendimiento operacional (calculado considerando una eficiencia de trabajo de 65 % para un ancho de trabajo de menor de 12 m y de 70 % para mayor de 12 m.

fuente de variación de la calidad de aplicación fueron los equipos evaluados antes que las fuentes de KCl. El equipo pendular (Royalflow) es el menos tecnificado de los equipos probados y fue el que presentó el peor desempeño, con menor ancho de trabajo, elevado CV y bajo rendimiento operacional (**Tabla 4**).

Para la evaluación del desempeño de la calidad de aplicación, tanto de los aplicadores como de los fertilizantes, se consideraron los siguientes parámetros y criterios: CV igual o menor de 20 %, CS valores entre 0.9 y 1.1, AT el mayor valor alcanzado, y RO el mayor valor alcanzado.

El equipo Soft (dosificador centrífugo con un disco) también presentó resultados poco satisfactorios para todos los productos probados. Cabe indicar que los equipos de aplicación con esos mecanismos de distribución son ampliamente usados en la agricultura Brasileña, especialmente por los productores de bajo nivel de tecnificación.

Los equipos con mecanismo de distribución centrífugo con dos discos (Rotaflow y Superflow) presentan un mejor desempeño para todos los productos evaluados. El desempeño de estos equipos fue superior a los Soft y Royalflow, permitiendo una faja de trabajo de buen ancho y bajo CV, lo que les confiere un alto rendimiento operacional (**Tabla 4**).

En el perfil transversal, el equipo Superflow presentó menor CV en relación al Rotaflow. En el perfil longitudinal el Rotaflow presentó un menor CV, evidenciando mayor homogeneidad de la aplicación a lo largo de la línea de aplicación. Esto puede deberse a la mejor tecnología incorporada al sistema de discos giratorios del Rotaflow. Con este sistema de distribución los gránulos de fertilizantes ya están en rotación cuando alcanzan las aspas de los discos, lo que acelera más los gránulos en una trayectoria horizontal, disminuyendo el efecto del viento en la distribución del producto.

Analizando la **Figura 15** se observa que la adopción de equipos con mayor nivel de tecnología permite aumentar

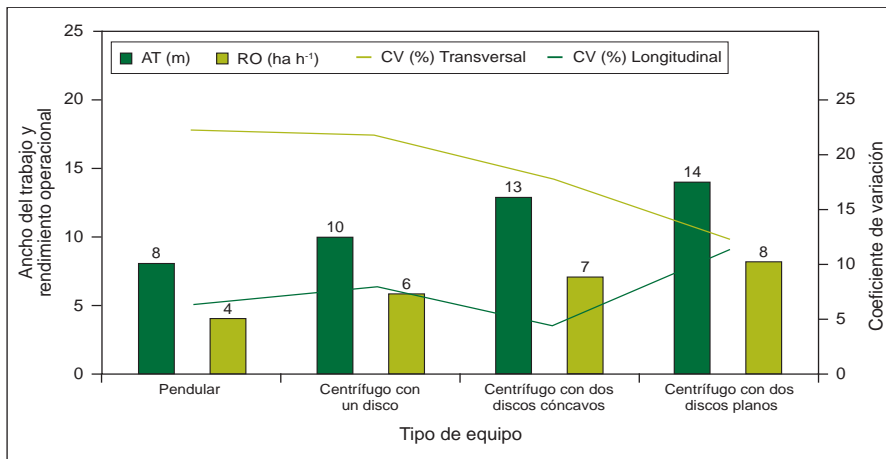


Figura 15. Ancho de trabajo (AT), rendimiento operacional (RO) y coeficiente de variación (CV) de los perfiles transversales y longitudinales de cuatro equipos de aplicación de cloruro de potasio. Se consideró una eficiencia de trabajo de 65 y 70 % para el cálculo del RO.

deben realizar pruebas de aplicación en forma frecuente con cada tipo de producto y máquina a ser utilizada en la aplicación, junto con el constante entrenamiento de los operadores en el campo.

Finalmente, se recomienda a los productores que para el exitoso manejo de la fertilidad del suelo se debe mantener una constante preocupación por mejorar el funcionamiento del equipo y la calidad de distribución de los insumos en el campo, aspectos que muchas veces no son tomados en cuenta por el sector productor.

Bibliografía

el ancho de trabajo y el rendimiento operacional, además de mejorar la calidad de distribución de los fertilizantes debido a la reducción de los CV de aplicación, cuando se considera el perfil transversal de la evaluación.

Considerando el conjunto de parámetros utilizados para la evaluación de la calidad de la aplicación de este estudio, se observó que el KCl proveniente de Israel tuvo el mejor desempeño entre los productos evaluados, seguido por los materiales de Alemania, Rusia y Canadá.

Consideraciones finales

El éxito del manejo de la fertilidad del suelo, visto desde el punto de vista de la optimización de entrega de nutrientes a los cultivos, depende de la tecnología de aplicación de enmiendas y fertilizantes. A pesar de su importancia, la mayoría de las veces este aspecto ha sido relevado a segundo plano.

Las pruebas de aplicación reflejaron los avances tecnológicos de los aplicadores a lo largo de los últimos años. Los principales avances en tecnología de aplicación de enmiendas y fertilizantes son: el mecanismo dosificador tipo helicoidal, los equipos autopropulsados, los sensores de barra de luz que utilizan GPS para permitir un ancho fijo de trabajo, el mapeo de la fertilidad del suelo para la generación de mapas de aplicación de dosis variable y el uso de controladores para manejar la aplicación de los insumos.

Los resultados de las pruebas de aplicación demostraron que no es aconsejable generalizar las recomendaciones de ancho y la velocidad de trabajo y el tipo de equipo a usarse para todos los insumos. Las variaciones en las condiciones ambientales, de los insumos y del equipo afectan la calidad de la aplicación. Por esta razón, se

Balastreire, L.A. 2000. O estado da arte da agricultura de precisão no Brasil. Piracicaba. 224 p.

Coelho, J.L.D., J.P. Molin, e C.D. Gadanha. 1992. Avaliação do desempenho operacional de mecanismos dosadores-distribuidores na aplicação do fosfogesso. In: Seminário sobre o uso do gesso na agricultura, 2. Uberaba. Anais... São Paulo: Ibrafos. p. 83-103.

Guedes Filho, O. 2009. Variabilidade espacial e temporal de mapas de colheita e atributos do solo em um sistema de semeadura direta. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

Luz, P.H.C. 1995. Efeitos de modos de aplicacao e incorporação de calcário e gesso em pomares de citros. 151 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Machado, P.L.O.A., A.C.C Bernardi, e C.A. Silva. 2004. Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 209 p.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2007. Instrução Normativa, n. 5 de 23 de fevereiro de 2007. Definições e normas sobre as especificações e as garantias, tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes minerais destinados à agricultura. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br>

Mialhe, L.G. 1986. Características das máquinas distribuidoras de calcário de fabricação nacional. In: Simpósio sobre aplicação de calcário na agricultura, 1., Campinas, SP. Anais... Campinas: Fundação Cargill. p. 41-56.

Saraiva, A.M., C.E. Cugnasca, e A.R. Hirakawa. 2000. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. In: Borém, A., M.P. Giudice, D.M. Queiroz, E.C. Mantovani, L.R. Ferreira, F.X.R. Valle, e R.L.R. Gomide. Agricultura de precisão. Viçosa: UFV, 2000. p. 109-145.

Vitti, G.C., P.H.C. Luz. 1997. Calagem e uso do gesso agrícola em pastagens. In: Favoretto, V., L.R.A. Rodrigues, e T.J.D. Rodrigues, (Eds.). Simpósio sobre ecossistema de pastagens. Jaboticabal: FCAV/UNESP. □

MAGNESIO: EL ELEMENTO OLVIDADO EN LA PRODUCCION DE CULTIVOS

Ismail Cakmak y Atilla M. Yazici*

Introducción

El magnesio (Mg) interviene en varias funciones vitales para la planta. Los procesos metabólicos y reacciones en las cuales interviene el Mg son: 1) Fotofosforilación (formación de ATP en los cloroplastos), 2) fijación fotosintética del dióxido de carbono (CO₂), 3) síntesis de proteínas, 4) formación de clorofila, 5) recarga del floema, 6) partición y asimilación de los productos de la fotosíntesis, 7) generación de las formas reactivas de oxígeno y 8) fotooxidación de los tejidos de las hojas. En consecuencia, varios procesos fisiológicos y bioquímicos críticos para la planta se alteran cuando existe deficiencia de Mg, afectando el crecimiento y el rendimiento de la planta. En la mayoría de los casos la intervención del Mg en procesos metabólicos radica en la activación de numerosas enzimas. Una importante enzima activada por Mg es la ribulosa-1.5-bisfosfato (RuBP) carboxilasa, que es una enzima básica en el proceso de fotosíntesis y la enzima más abundante en la tierra.

El amarillamiento en forma de clorosis intervenal en las hojas viejas de la planta es uno de los síntomas típicos del estrés causado por la deficiencia de Mg (**Foto 1**). Se conoce que hasta el 35 % del total de Mg en las plantas está ligado a los cloroplastos (**Figura 1**). Sin embargo, la presencia de los síntomas de deficiencia de Mg es altamente dependiente de la intensidad de la luz. La alta intensidad de la luz incrementa la clorosis intervenal y la presencia de manchas de color rojizo en las hojas (**Foto 2**). Por esta razón, las bien documentadas diferencias de la expresión visual de la deficiencia de Mg entre especies, así como la concentración foliar crítica, pueden estar relacionadas con la intensidad de la luz en un ambiente de crecimiento particular.

Se considera que el daño en las hojas en las plantas deficientes en Mg expuestas a alta intensidad de luz se debe a la mayor generación de especies de oxígeno altamente reactivas (muy nocivas) en los cloroplastos, lo que inhibe la fijación fotosintética del CO₂. Aparentemente, las plantas que crecen bajo condiciones de alta intensidad de luz tienen un mayor requerimiento de Mg que las plantas que crecen bajo condiciones de baja intensidad de luz.

El problema creciente de la deficiencia de Mg

A pesar del conocido papel del Mg en varias funciones críticas en las plantas, es sorprendente la poca

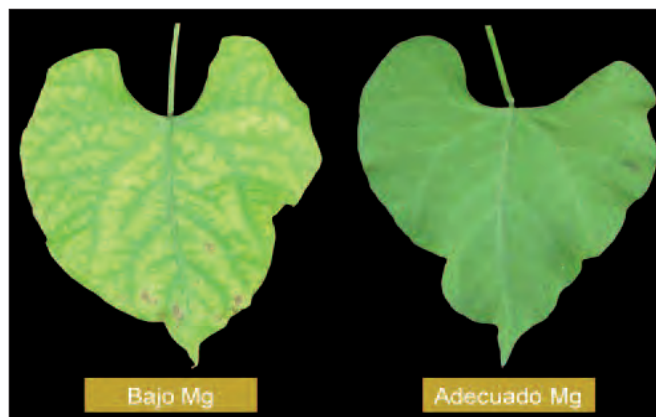


Foto 1. A la izquierda de la foto se presentan síntomas de deficiencia de Mg en hojas de frijol común.

investigación conducida sobre el papel de este nutriente en el rendimiento y en la calidad de los cultivos. Por esta razón, a menudo se ha considerado al Mg como el elemento olvidado. Sin embargo, la deficiencia de Mg ha pasado a ser un importante factor limitante en los sistemas de producción intensivos, especialmente en suelos fertilizados solo con nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Existe una preocupación creciente por el agotamiento del Mg en suelos dedicados a agricultura de alta productividad.

Debido al alto potencial de lixiviación de cationes y a la interacción de éstos con el aluminio (Al) en los suelos altamente meteorizados, la deficiencia de Mg es crítica en suelos ácidos. Uno de los más documentados mecanismos de adaptación de la planta a suelos ácidos es la liberación por las raíces de aniones orgánicos ácidos. Estos aniones orgánicos quelatan el Al tóxico formando complejos Al-ácido orgánico que neutralizan la fitotoxicidad del Al. Se ha documentado ampliamente el hecho de que se requiere de Mg para que la planta pueda liberar efectivamente los iones orgánicos ácidos para modificar una rizosfera cargada de Al tóxico (Yang et al., 2007). Al igual que el Mg, el calcio (Ca) es también importante para aliviar la toxicidad de Al en suelos ácidos. Sin embargo, el Mg puede proteger la planta contra la toxicidad de Al cuando se lo añade en niveles micromoleculares, mientras que el Ca ejerce su papel protector en concentraciones milimolares (Silva et al., 2001). Todo esto indica que el Mg tiene efectos muy específicos en la protección de la planta contra la toxicidad de Al.

* Tomado de: Cakmak, I. and A.M. Yazici. 2010. Magnesium: A Forgotten Element in Crop Production. *Better Crops* 94(2):23-25. Los doctores Cakmak y Yazici son profesores de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales, Universidad de Sabanci, Estambul, Turquía. Correo electrónico: cakmak@sabanciuniv.edu

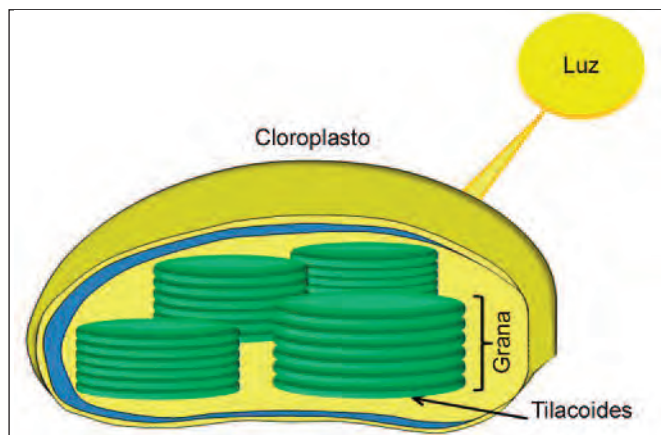


Figura 1. Los cloroplastos son los organelos que alojan los tilacoides, compartimentos que contienen Mg donde la energía de la luz se transforma en energía química a través del proceso de la fotosíntesis.

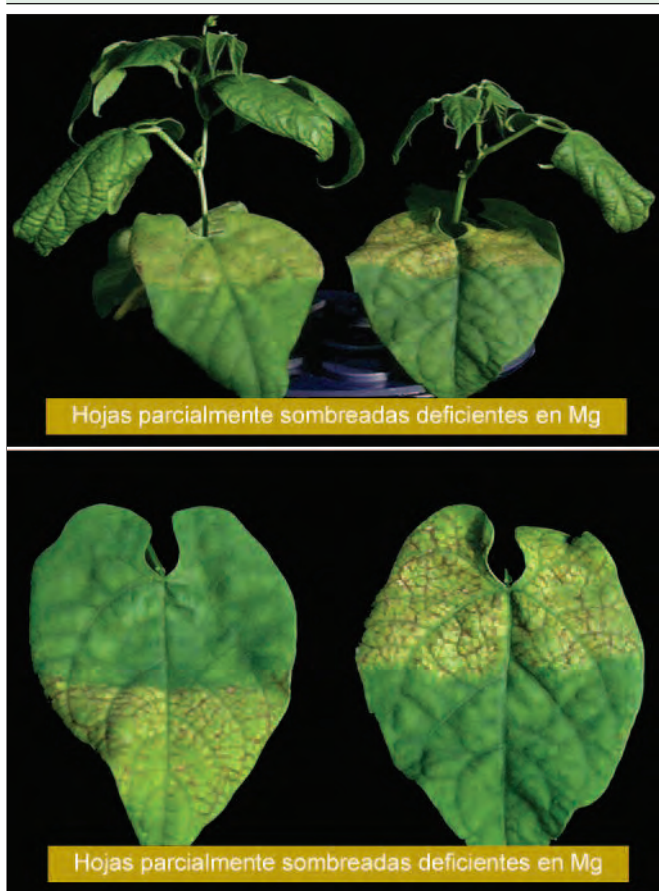


Foto 2. Clorosis en las hojas de frijol común en plantas deficientes en Mg cultivadas en alta intensidad de luz. La parte verde de las hojas estuvo parcialmente sombreada con papel filtro. La alta intensidad de luz no causó ninguna clorosis en la hoja cuando el suplemento de Mg fue adecuado (Cakmak y Kirkby, 2008).

Primeras reacciones a la deficiencia de Mg

En vista de las diversas funciones del Mg, es común la pregunta de cuál sería la función o estructura de la planta que se ve afectada primero cuando existe deficiencia de Mg. La respuesta más común a esta pregunta es que primero se afecta el nivel de clorofila, o la fotosíntesis o

la síntesis de proteínas. Existen estudios publicados por Cakmak et al. (1994a,b) en frijol común, por Hermans et al. (2004) en remolacha azucarera y por Hermans y Verbruggen (2005) en Arabidopsis que proveen una respuesta clara y convincente a esta pregunta, como se discute a continuación.

Hermans et al. (2004) cultivaron remolacha azucarera con un nivel adecuado y uno bajo de Mg y midieron los siguientes parámetros: 1) crecimiento de la planta, 2) fijación fotosintética de CO₂, 3) concentración de clorofila, 4) transporte fotosintético de electrones y 5) concentración de sacarosa en las hojas. Los resultados obtenidos fueron claros. Se observó que existía una alta acumulación de sacarosa en las hojas totalmente expandidas de las plantas deficientes en Mg antes que se presente cualquier cambio notorio en los cuatro primeros parámetros. Las hojas deficientes en Mg acumularon hasta cuatro veces más sacarosa en comparación con las hojas que tenían contenido adecuado de Mg, indicando que existe una severa inhibición del transporte de la sacarosa de las hojas hacia otros órganos de la planta cuando existe deficiencia de Mg.

Cakmak et al. (1994a,b) estudiaron el efecto de la nutrición con Mg en los siguientes factores: 1) crecimiento de la raíz y de la parte aérea de la planta, 2) concentración y distribución de carbohidratos entre la raíz y los órganos de la parte aérea de la planta y 3) exportación de sacarosa por el floema. Este estudio se realizó utilizando frijol y trigo. Los resultados mostraron que existe una pronunciada inhibición del crecimiento de la raíz antes que se observe un cambio notable en el crecimiento de la parte aérea de la planta y en la concentración de clorofila. En consecuencia, la relación parte aérea:raíz se incrementó en las plantas deficientes en Mg (**Foto 3**). Este temprano efecto negativo de la deficiencia de Mg en el crecimiento de la raíz, antes de que se desarrolle una clorosis visible en las hojas, es un aspecto crítico para los agricultores por la importancia de un buen sistema radicular en el rendimiento de la planta. Por esta razón, se debe prestar especial atención al estado de la nutrición con Mg antes que se presente cualquier síntoma de deficiencia en la planta.

La acumulación de carbohidratos en las hojas completamente expandidas es un fenómeno común en las plantas deficientes en Mg. Cakmak et al. (1994a,b) encontraron que la acumulación de Mg fue 3.5 y 9 veces más alta en plantas que empezaban a presentar deficiencia y en plantas bajo severa deficiencia, respectivamente, en comparación con plantas con adecuado suministro de Mg. Las hojas deficientes en Mg también contenían elevadas cantidades de almidón y azúcares reductores. En las plantas de frijol que tuvieron



Foto 3. Crecimiento de plantas de frijol común (superior) y trigo (inferior) con suplemento bajo y adecuado de Mg.

un bajo suplemento de Mg por 12 días solamente se encontró el 1 % del total de carbohidratos de la planta ubicados en la raíz, mientras que en las plantas con adecuado Mg este valor fue de 16 %. Todos estos resultados claramente indican una severa inhibición en la exportación de azúcares por el floema de las hojas deficientes en Mg.

Se colectaron exudados del floema de plantas de frijol con bajo y adecuado suplemento de Mg para estudiar el papel de la nutrición con este nutriente en el movimiento de la sacarosa de la hoja a otras partes de la planta. La deficiencia de Mg provoca severa y muy prematura inhibición en el transporte de sacarosa en el floema (Figuras 2 y 3). Se observó una relación inversa entre la concentración de sacarosa en la hoja y la tasa de sacarosa exportada en el floema durante los 12 días que duró el tratamiento de bajo Mg. El efecto inhibitorio de la

deficiencia de Mg en el transporte de sacarosa vía floema se presentó antes de que aparezca cualquier efecto adverso en el crecimiento de la parte aérea de la planta. La reposición de Mg a las plantas deficientes restauró la exportación de sacarosa en 12 horas.

Estos resultados sugieren que los efectos del Mg en el transporte de la sacarosa por el floema no están relacionados con ningún efecto secundario. El mecanismo por el cual la deficiencia de Mg afecta el transporte de sacarosa por el floema no se conoce completamente, pero aparentemente está relacionado con las bajas concentraciones del complejo Mg-ATP en los sitios donde la sacarosa se carga en el floema. Es consenso general que se requiere Mg-ATP para la apropiada función de la H⁺-ATPasa, una enzima que provee energía para los procesos de carga del floema y mantiene el transporte de la sacarosa entre las células del floema.

Importancia práctica de presencia temprana de deficiencia de Mg

La alta acumulación de carbohidratos, junto con la inhibición de la exportación de sacarosa, de las hojas deficientes en Mg, muestra la importancia de mantener una adecuada nutrición con Mg durante los periodos de intenso transporte de carbohidratos de las hojas a las células en crecimiento en otros sitios de la planta. Se requiere suficiente Mg para maximizar el transporte de carbohidratos hacia los órganos receptores (como raíces y semillas) para promover rendimientos altos. El mantenimiento de una adecuada nutrición con Mg en los estadios tardíos del ciclo de cultivo es también esencial para minimizar la generación de especies de radicales oxígeno dañinos y el daño fotooxidativo en los cloroplastos. La aplicación tarde de Mg en el ciclo por medio de aspersión foliar podría ser una práctica útil en ciertas circunstancias. El efecto negativo en el crecimiento de la raíz causado por la deficiencia de Mg puede tener serio impacto en la absorción de nutrientes y el agua, especialmente bajo condiciones de suelos marginales.

El producir biomasa como una fuente de energía renovable es una alternativa prometedora. Sin embargo, la productividad de estos sistemas es directamente dependiente de: 1) la capacidad de las plantas para fijar CO₂ en carbono orgánico (C), 2) translocación del C asimilado a otros órganos de la planta y 3) utilización del C asimilado en los órganos receptores para su crecimiento. Todos estos pasos son específicos y están controlados por Mg. Por esta razón, se debe prestar atención al estado nutricional de las plantas utilizadas en la producción de biocombustibles para lograr alta producción de biomasa y una adecuada partición del C asimilado a los órganos de la planta donde son necesarios (como granos y raíces).

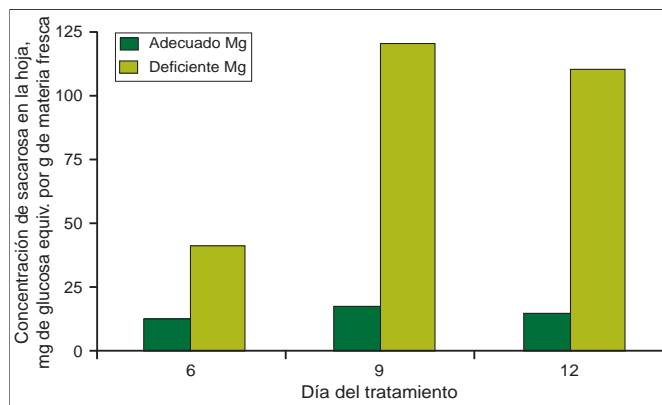


Figura 2. Concentración de sacarosa en plantas de frijol cultivadas con adecuado Mg o con bajo Mg por 12 días (Cakmak et al., 1994b).

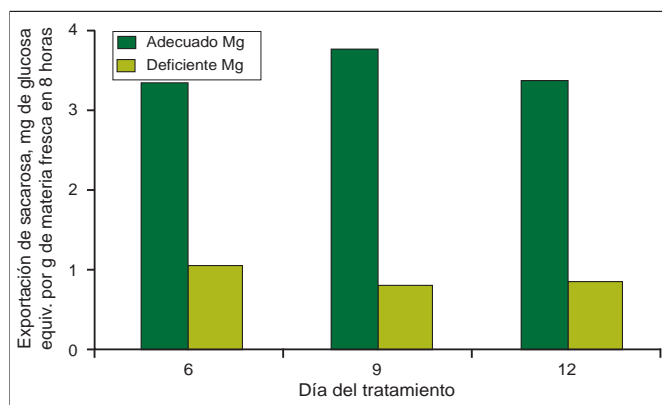


Figura 3. Tasa de exportación de sacarosa en plantas de frijol cultivadas con adecuado Mg o con bajo Mg por 12 días (Cakmak et al., 1994b).

Se conoce desde hace mucho tiempo que el Mg tiene un papel esencial en la formación de la clorofila y la fotosíntesis. Sin embargo, creciente evidencia indica que órganos receptores (como las raíces en crecimiento y las semillas en desarrollo) se afectan severamente cuando existe deficiencia de Mg. El Mg ha sido un elemento olvidado en la producción de cultivos por demasiado tiempo, pero su papel vital en la nutrición vegetal es cada vez más reconocido.

Agradecimientos

Parte de los resultados presentados en este artículo se obtuvieron en trabajo de investigación colaborativo con K+S Kali GmbH (Kassel, Alemania).

Bibliografía

- Cakmak, I., C. Hengeler, and H. Marschner. 1994a. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency. *J. Exp. Bot.* 45:1245–1250.
- Cakmak, I., C. Hengeler, and H. Marschner. 1994b. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. *J. Exp. Bot.* 45:1251–1257.
- Cakmak, I. and E.A. Kirkby. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiol. Plant.* 133:692-704.
- Hermans, C., G.N. Johnson, R.J. Strasser, and N. Verbruggen. 2004. Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. *Planta* 220:344–355.
- Silva, I.R., T.J. Smyth, D.W. Israel, C.D. Raper, and T.W. Ruffy. 2001. Magnesium is more efficient than calcium in alleviating aluminum rhizotoxicity in soybean and its ameliorative effect is not explained by the Gouy-Chapman-Stern model. *Plant Cell Physiol.* 42:538-545.
- Yang, J.L., J.F. You, Y.Y. Li, P. Wu, and S.J. Zheng. 2007. Magnesium enhances aluminum-induced citrate secretion in rice bean roots (*Vigna umbellata*) by restoring plasma membrane H⁺-ATPase activity. *Plant and Cell Physiol.* 48: 66–74. □

FUENTES DE MAGNESIO

Robert Mikkelsen*

Introducción

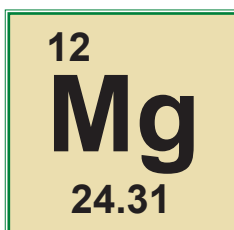
El magnesio (Mg) es un constituyente común de muchos minerales, llegando a comprender el 2 % de la corteza terrestre. Este elemento es también un componente común del agua de mar (1 300 ppm). El Mg está presente en forma divalente (Mg^{2+}) en la naturaleza, pero se lo puede procesar hasta obtener metal puro. Debido a que el Mg es un tercio más liviano que el aluminio (Al) se lo utiliza en aleaciones de bajo peso para aviones y automóviles. El Mg en forma de polvo metálico se quema cuando se expone al aire. China es el más grande productor de Mg como metal, aun cuando los Estados Unidos y la Antigua Unión Soviética también producen cantidades significativas del metal.

La importancia del Mg para la nutrición humana y vegetal es conocida. Este artículo discute el comportamiento del Mg en el suelo y describe las fuentes más comunes de Mg utilizadas en la nutrición de las plantas.

El Mg en los minerales primarios y secundarios

Varios minerales ferromagnesianos (como el olivino, piroxeno, anfíbol y mica) son las principales fuentes de Mg en las rocas ígneas básicas. Los minerales secundarios como la dolomita ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$), magnesita ($MgCO_3$), talco [$(Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$] y el grupo de las serpentinas [$(Mg_3Si_2O_5(OH)_4$] son derivados de estos minerales primarios.

El nombre suelo de serpentina se utiliza para denominar a aquellos suelos que tienen altas cantidades de serpentina, especialmente suelos que no han sido fertilizados. En estos suelos de serpentina ultramáficos (de abundante Mg), la alta concentración de Mg afecta el crecimiento de las plantas. Sin embargo, las concentraciones de Mg disponible para las plantas no se pueden predecir adecuadamente basándose solamente en la composición del material parental debido a las diferencias en las tasas de meteorización de los minerales y la lixiviación del Mg. En algunos casos, la contribución de los minerales no satisface la demanda total de Mg del cultivo durante el ciclo de crecimiento y es insuficiente para prevenir las deficiencias en plantas y animales.



Magnesio no intercambiable y Mg intercambiable

El Mg se localiza dentro de los minerales arcillosos del suelo o está asociado con el intercambio de cationes en la superficie de las arcillas. Arcillas como la clorita, vermiculita y montmorillonita han pasado por una etapa intermedia de meteorización y todavía contienen cierta cantidad de Mg como parte de la estructura interna del cristal. La tasa de liberación de Mg de estas arcillas es generalmente baja. La illita puede contener también Mg, pero la tasa de liberación es aún más lenta. Los detalles de la mineralogía y meteorización de estas arcillas se pueden consultar en la literatura.

La liberación gradual del Mg no intercambiable se ha demostrado en varias condiciones, pero la contribución es generalmente pequeña comparada con las cantidades de Mg requeridas para mantener altos rendimientos por varios años. Este Mg no intercambiable podría provenir de la capa de octaedros de las arcillas así como del material ubicado entre estas capas. En agricultura de baja productividad, el Mg de lenta liberación puede ser suficiente para reponer el nutriente a la solución del suelo y satisfacer las demandas de Mg de la planta.



Figura 1. El ciclo del Mg en suelos agrícolas.

* Tomado de: Mikkelsen, R. 2010. Soil and Fertilizer Magnesium. Better Crops 94(2):26-28.

El doctor Mikkelsen es el director de la oficina regional del International Plant Nutrition Institute (IPNI) para el Oeste de los Estados Unidos. Correo electrónico: rmikkelsen@ipni.net

En el rango de suelos alcalinos a ligeramente ácidos, el Mg es generalmente segundo en abundancia después del calcio (Ca) en los sitios de intercambio catiónico. Los iones de Mg se parecen al Ca en su comportamiento en las reacciones de intercambio iónico. Estas reacciones de intercambio de cationes son generalmente reversibles, aun en situaciones donde cationes adsorbidos (retenidos) más fuertemente pueden ser reemplazados por manipulación de la solución del suelo.

Para volverse soluble, el Mg adsorbido en las partículas de arcilla debe ser reemplazado por un catión presente en la solución del suelo. Las reacciones de intercambio de cationes son estequiométricas, es decir que deben mantener el balance de cargas. Por ejemplo, se requieren dos iones de potasio (K^+) para reemplazar un solo ión de Mg^{2+} . Las reacciones de intercambio son muy rápidas, pero el factor limitante es generalmente la difusión del catión del sitio de intercambio en la arcilla a la solución del suelo o de la solución del suelo al sitio de intercambio.

Ciertas arcillas, como la vermiculita, tienen especial afinidad por el Mg soluble. El ion Mg hidratado encaja bien entre las láminas parcialmente expandidas de la vermiculita, haciendo de esta arcilla un excelente retenedor de Mg. Una proporción excesiva de Mg en los sitios de intercambio puede provocar la degradación de la condición física del suelo. Debido a que los cationes de Mg tienen un radio de hidratación más grande que el Ca, las fuerzas de atracción que normalmente tienden a agregar los colides del suelo se reducen, particularmente si existe una sobre abundancia de Mg. La alta proporción de Mg en los sitios de intercambio resulta en la dispersión de las arcillas, condición que reduce la porosidad y la tasa de infiltración del suelo. Esta condición es común en los suelos de serpentina.

Condiciones que causan pérdidas de Mg

Cuando la remoción de Mg de los suelos es mayor que la tasa de liberación de las fuentes minerales y de la adición de fertilizantes, la concentración de Mg en la solución y en los sitios de intercambio se reduce. Esta situación de bajo contenido de Mg es más frecuente en suelos arenosos con bajo Mg intercambiable y en suelos que reciben aplicaciones repetidas de calcita. Esta condición también se presenta por la competencia con otros cationes como K. La producción sostenida de cultivos requiere mantener el balance entre el suplemento de Mg y la remoción del nutriente en la cosecha y la salida de Mg por lixiviación y escorrentía.

Remoción en el cultivo – Existe un amplio rango de datos sobre remoción de Mg en los cultivos publicados en la literatura, dependiendo del suplemento de Mg del suelo, las condiciones de crecimiento, la especie de

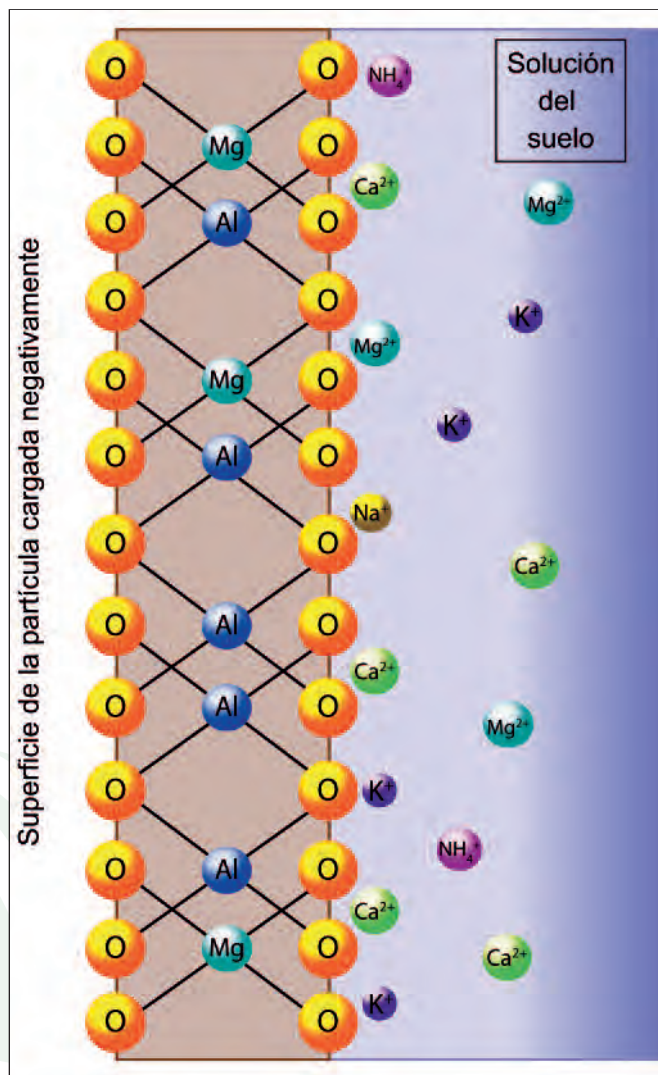


Figura 2. Las arcilla 2:1 contienen Mg como constituyente de su estructura entre las láminas y como catión intercambiable en los filos de la arcilla.

planta cultivada y los niveles de rendimiento. Por ejemplo, un cultivo de remolacha azucarera de alto rendimiento puede tomar hasta $90 \text{ kg de Mg ha}^{-1}$, las pasturas y el maíz de ensilaje pueden remover hasta $56 \text{ kg de Mg ha}^{-1}$. En general, los cereales remueven cantidades menores de Mg a la cosecha comparado con tubérculos y muchos frutales. De todas las formas de pérdida de Mg, la remoción en cosechas abundantes es la condición deseada.

Pérdidas por lixiviación – La pérdida de cationes del suelo por lixiviación puede resultar en una significativa declinación de la disponibilidad de nutrientes a través del tiempo. La magnitud de la pérdida de Mg de la zona radicular a zonas más profundas en el suelo varía mucho dependiendo de las propiedades del suelo, la cantidad de agua pasando por el perfil y las condiciones locales. En ciertas condiciones se reportan solamente pérdidas de unos pocos $\text{kg de Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras que en otras condiciones las pérdidas pueden ser superiores a los $110 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

La fertilización con otros cationes, como K^+ y Ca^{2+} , frecuentemente incrementa la solubilidad del Mg en el suelo por el intercambio en la superficie de las arcillas, proceso que al final hace que el Mg sea más susceptible a la lixiviación. Las reducciones en Mg intercambiable a menudo se correlacionan con la cantidad de sales añadidas como fertilizante o como enmienda. Un indeseado enriquecimiento de los sitios de intercambio con K puede presentarse en suelos donde el Ca y el Mg se lixivian después de la repetida aplicación de K. Las pérdidas de nitrato por lixiviación aceleran las pérdidas de Mg, especialmente en los sitios donde se depositan la orina y majada de los animales en los pastos.

Pérdidas por erosión – La superficie del suelo es la zona que generalmente contiene la mayor cantidad de materia orgánica y nutrientes. El agua que se escurre del campo puede arrastrar valiosa materia orgánica y nutrientes asociados con las partículas de suelo que la escorrentía saca del campo. El minimizar la escorrentía del campo mediante el uso de técnicas de conservación, como el diseño de zonas de amortiguamiento, ayudan a reducir las pérdidas de Mg, protegiendo al mismo tiempo los cuerpos de agua cercanos de la contaminación con sedimentos.

Interacciones – Las deficiencias de Mg no son comunes en suelos arenosos de bajo pH donde el Al domina los sitios de intercambio de cationes. Sin embargo, la asimilación de Mg se deprime en presencia de Al^{3+} , porque este elemento afecta el crecimiento de las raíces y además compite con otros cationes por los sitios de absorción en las raíces.

Altas concentraciones de K intercambiable pueden tener un efecto adverso en la disponibilidad de Mg para las plantas. La competencia entre estos dos cationes por los sitios de absorción en las raíces parece ser la primera causa de esta situación, aun cuando el alto K puede también impedir la translocación del Mg dentro de la planta. Se considera que la baja concentración de Mg en los pastos, condición que se presenta luego de la fertilización con K, está relacionada con la tetania de los pastos, anomalía que se presenta cuando el contenido de Mg en la sangre del ganado es bajo. El Mg es esencial para la activación de enzimas y de otros procesos fundamentales en el metabolismo de los animales.

Fuentes de Mg

Existen excelentes fuentes de Mg que pueden satisfacer las demandas del cultivo. La aplicación superficial de las fuentes solubles de Mg es generalmente una buena práctica, pero se recomienda la incorporación en el suelo de los materiales menos solubles. Debido a que no existen serias implicaciones ambientales asociadas con el uso agrícola de Mg, no se necesitan precauciones

especiales. La contribución de Mg con la lluvia es menor a $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Los fertilizantes portadores de Mg comunes se dividen en dos clases: fuentes solubles y fuentes semi solubles. El tamaño de las partículas de las fuentes de Mg semi solubles determina en gran parte la tasa de disolución, mientras que este factor no es importante en las fuentes solubles.

Fuentes de Mg solubles (con solubilidad aproximada a 25 °C)

Kieserita – $MgSO_4 \cdot H_2O$; 17 % Mg – La kieserita es el sulfato de magnesio monohidratado obtenido de minas localizadas en Alemania. Como portador de Mg y azufre (S), la kieserita tiene múltiples aplicaciones en la agricultura y en la industria (360 g L^{-1}).

Kainita – $MgSO_4 \cdot KCl \cdot 3H_2O$; 9 % Mg – La kainita es la mezcla de sulfato de magnesio y cloruro de potasio. Comúnmente se usa como fuente de K, pero es útil cuando se necesitan tanto K como Mg (solubilidad variable).

Langbeinita – $2MgSO_4 \cdot K_2SO_4$; 11 % Mg – Fuente de Mg ampliamente utilizada que también aporta K y S. Este mineral es una excelente fuente de varios nutrientes. Si bien es totalmente soluble, la langbeinita se disuelve más lentamente que otras fuentes de Mg y no se aconseja utilizarla a través de sistemas de riego (240 g L^{-1}).

Cloruro de magnesio – $MgCl_2$; 25 % Mg – Generalmente vendido como líquido por su alta solubilidad, este material es frecuentemente usado como componente de los fertilizantes líquidos (560 g L^{-1}).

Nitrato de magnesio – $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$; 9 % Mg – Ampliamente usado en horticultura para suplir Mg junto con una fuente soluble de nitrógeno (N) (1250 g L^{-1}).

Sulfato de magnesio (sal de Epsom) – $MgSO_4 \cdot 7H_2O$; 9 % Mg – El nombre sal de Epsom se deriva del nombre del depósito geológico del material localizado en Epsom, Inglaterra. Es un mineral común subproducto de la purificación de otras sales. Es una fuente de Mg similar a la kieserita, excepto que contiene siete moléculas de agua (357 g L^{-1}).

Schoenita – $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$; 6 % Mg – Se usa más como fuente de K, sin embargo es también una fuente soluble de Mg (330 g L^{-1}).

Residuos animales y compostas – La concentración de Mg en estos materiales orgánicos es baja comparada con las fuentes minerales. Sin embargo, altas dosis de aplicación pueden suplir cantidades significativas de Mg al suelo. Se considera que el Mg en estos materiales

es totalmente disponible para la planta durante el ciclo de cultivo.

Materiales para aplicación foliar – Estos materiales pueden contener uno o más de los materiales solubles presentados arriba. Los materiales de especialidad contienen EDTA, lignosulfonato y otros agentes complejantes para mejorar la absorción foliar. Las aplicaciones foliares son efectivas para corregir las deficiencias de Mg, pero generalmente deben repetirse para mantener el crecimiento óptimo de la planta y se consideran solamente una solución temporal que se utiliza mientras se mejora el contenido de Mg del suelo.

Fuentes de Mg semi solubles

Dolomita – $MgCO_3 \cdot CaCO_3$; 6 a 20 % Mg – La concentración de Mg puede variar considerablemente dependiendo de la fuente geológica. La dolomita pura contiene de 40 a 45 % de $MgCO_3$ y 54 a 58 % de $CaCO_3$. Sin embargo, materiales con una concentración de 15 al 20 % de $MgCO_3$ (4 a 6 % de Mg) son comúnmente conocidos como cal dolomítica. La dolomita es a menudo más barata que las fuentes comunes de Mg, pero es un material de lenta disolución, especialmente si no se usa en suelos ácidos.

Dolomita hidratada – $MgO \cdot CaO / MgO \cdot Ca(OH)_2$; 18 a 20 % Mg – Este producto se fabrica calcinando la cal dolomítica para formar MgO y CaO. Luego se hidrata para formar cal dolomítica hidratada que puede contener solamente óxido de calcio hidratado o puede también contener óxido de magnesio hidratado. Estos compuestos se disuelven más rápido que la dolomita sin tratar.

Oxido de magnesio – MgO; 56 % Mg – Este material que solo contiene magnesio y oxígeno se forma calentando el $MgCO_3$ para sacar el carbono. Contiene la más alta concentración de Mg de los fertilizantes comunes, pero es insoluble. Se debe aplicar con anticipación y en partículas finas para que pueda ser útil para la planta.

Estruvita – $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$; 10 % Mg – La estruvita se produce principalmente durante la recuperación de fósforo (P) de los residuos de corral y de los residuos de las plantas de tratamiento municipales. Si bien es de lenta disolución, la estruvita es también una valiosa fuente de N y P, nutrientes que no se encuentran en otras fuentes de Mg.

Las prácticas de fertilización continúan intensificándose a medida que se demandan rendimientos más altos. El Mg es un nutriente esencial para las plantas que frecuentemente no se toma en cuenta y que puede limitar el crecimiento del cultivo. Se debe usar el análisis de suelos como herramienta para identificar las potenciales deficiencias de Mg. Existen excelentes fuentes de Mg que los agricultores pueden utilizar cuando son necesarias. □

REPORTE DE INVESTIGACION RECIENTE

EVALUACION DE LA EFICACIA DE FERTILIZANTES DE ALTA EFICIENCIA COMO OPCIONES DE MITIGACION DE LAS EMISIONES DE N₂O Y NO DE SUELOS AGRICOLAS

Akiyama, H., X.Y. Yan, and K. Yagi. 2010. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. Global Change Biology 16(6):1837-1846.

Los campos agrícolas son una importante fuente antropogénica de las emisiones de óxido nitroso (N₂O) y óxido nítrico (NO) a la atmósfera. Aunque muchos estudios de campo han probado la eficacia de posibles opciones de mitigación de estas emisiones, la efectividad de cada opción varía con los sitios debido a factores ambientales y de manejo. Para combinar estos resultados y evaluar la eficacia general de los fertilizantes de alta eficiencia [inhibidores de la nitrificación (IN), fertilizantes recubiertos con polímeros (FRP) e inhibidores de la ureasa (IU)] sobre las emisiones de N₂O y NO, se realizó un meta-análisis de los datos de varios experimentos de campo (113 bases de datos de 35 estudios), publicados en revistas revisadas por pares hasta el 2008. Los resultados indicaron que los IN redujeron de manera significativa las emisiones de N₂O (media: -38 %, intervalo de confianza al 95 %: -44 % a -31 %) en comparación con los fertilizantes convencionales. Los FRP también redujeron significativamente las emisiones de N₂O (-35 %, -58 % a -14 %), mientras que los IU no fueron efectivos en la reducción de N₂O. Los IN y FRP también redujeron significativamente las emisiones de NO (-46 %, -65 % a -35 %; -40 %, -76 % a -10 %, respectivamente). La eficacia de los IN fue relativamente consistente a través de los diversos tipos de inhibidores y usos de la tierra. Sin embargo, el efecto de los FRP mostró resultados contrastantes a través de varios tipos de suelo y usos de la tierra. Estos fertilizantes fueron significativamente eficaces en Gleysols imperfectamente drenados con pastizales (-77 %, -88 % a -58 %), pero no fueron eficaces en Andisoles bien drenados con cultivos de secano. Debido a que los datos disponibles de FRP estuvieron dominados por ciertas regiones y tipos de suelo, se necesitan datos adicionales para evaluar su eficacia de manera más confiable. Los IN fueron efectivos en la reducción de las emisiones de N₂O de fertilizantes químicos y orgánicos. Por otra parte, el consistente efecto de los IN indica que éstos son una excelente opción de mitigación de las emisiones de N₂O y NO. □

DETERMINACION DEL FOSFORO DISPONIBLE POR TRES METODOS DE EXTRACCION DE UN OXISOL TROPICAL DE BRASIL TRATADO CON YESO

da Silva, R.C., S.H. Chien and L.J. Prochnow. 2010. Available phosphorus evaluated by three soil tests in a Brazilian tropical Oxisol treated with gypsum. Soil Science 175(5):233-239.

Se utilizaron los métodos de extracción Mehlich-1, resina-HCO₃ y papel impregnado con Fe (Pi) para determinar el P disponible en un Oxisol de Brasil al que se aplicó yeso, enmienda que se prefiere en lugar de la cal para reducir la toxicidad por Al en el subsuelo. El suelo fue incubado en el laboratorio con cantidades hasta de 75 g de fosfoyeso (FY, 0.3 % de P total) kg⁻¹ de suelo, yeso natural y yeso de grado reactivo, añadiéndose además hasta 100 mg de P kg⁻¹ de suelo en forma de superfosfato triple (SFT) o como roca fosfórica (RF). Por otro lado, se cultivó maíz en invernadero, por dos ciclos consecutivos, en un suelo tratado con 50 mg de P kg⁻¹ en forma de SFT y FY y dosis de hasta 75 g de PY kg⁻¹ de suelo. Los resultados del experimento de incubación mostraron que el P extraído con Mehlich y Pi se incrementó con el aumento de la dosis de FY en los tratamientos con SFT, RF y el control. La extracción con resina-HCO₃ subestimó el contenido de P disponible con SFT y RF, debido a la reacción de la resina-HCO₃ con el yeso. La extracción con Mehlich-1 sobreestimó el P disponible de RF comparado con el SFT, debido a la excesiva disolución de la RF provocada por la solución Mehlich-1 que es muy ácida. La extracción con Pi subestimó el P disponible de RF en los tratamientos de yeso natural y de grado reactivo debido a que del Ca proveniente del yeso suprime la disolución de RF. Los resultados, en términos del efecto del FY en el P disponible, fueron similares en las pruebas de incubación y el estudio de invernadero. Las extracciones con Mehlich y Pi se correlacionaron bien con el P adsorbido por el maíz, mientras que con el P extraído con la resina no se observó esta respuesta. □

CURSOS Y SIMPOSIOS

1. Conferencia Mundial de Fertilizantes

Organiza : TFI
Lugar y Fecha : San Francisco, Calif, USA
 Septiembre 12-15, 2010
Información : TFI
 : Tel.: 1 202 962 0490
 : vsutton@tfi.org
 : www./www.tfiworld.org

2. Taller Internacional Sobre Diseño e Implementación de Estrategias de Mercadeo de Agro-insumos

Organiza : IFDC
Lugar y Fecha : Muscle Shoals, Alabama, USA
 Octubre 4-15, 2010
Información : IFDC
 : Tel.: +1 256 381 6600
 : Fax.: +1 256 381 7408
 : hrd@ifdc.org
 : www.ifdc.org

3. XII Congreso Nacional y V Internacional de la Ciencia del Suelo

Organiza : UNSA y SPCS
Lugar y Fecha : Arequipa – Perú
 Octubre 11-15, 2010
Información : SPCS
 : Fax: 51 54 281 299
 : suelosarequipa@unsa.edu.pe
 : www.unsa.edu.pe/suelos

5. XXXV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo

Organiza : SMCS
Lugar y Fecha : Mexicali - Baja California Norte
 Octubre 25-29, 2010
Información : SMCS
 : Lic. Jairo Ramirez Rodriguez
 : webmaster@smcs.org.mx
 : www.smcs.org.mx

5. XV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo

Organiza : SCCS
Lugar y Fecha : Pereira, Risaralda, Colombia
 Octubre 27-29, 2010
Información : SCCS
 : Tel.: 57 1 2113383
 : Fax.: 57 1 2113185
 : oficinappal@sccsuelo.org
 : www.sccsuelo.org

6. Taller Internacional Sobre Granulado de Fertilizantes y Alternativas de Producción de NPK

Organiza : IFDC
Lugar y Fecha : Bangkok, Tailandia
 Octubre 27-29, 2010
Información : IFDC
 : Tel.: 1 256 381 6600
 : hrd@ifdc.org
 : www.ifdc.org

7. XIX Reunión Internacional ACORBAT - 2010

Organiza : ACORBAT
Lugar y Fecha : Medellin - Colombia
 Noviembre 8-12, 2010
Información : ACORBAT
 : Tel.: 574 448 2910
 : Fax.: 574 331 0494
 www.comunicacioneseffectivas.com

8. XVI Conferencia de la Organización Internacional de la Conservación de Suelos

Organiza : ISCO
Lugar y Fecha : Santiago de Chile - Chile
 Noviembre 8-12, 2010
Información : ISCO
 : info@iscochile2010.cl
 www.iscochile2010.cl

9. XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo

Organiza : SECS
Lugar y Fecha : Sto. Dgo. de los Tsáchilas - Ecuador
 Noviembre 17-19, 2010
Información : SECS
 : lmartinez@ute.edu.ec
 : calvache@uio.satnet.net
 : jespinoso@ipni.net
 : www.secsuelo.org

10. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo

Organiza : SLCS
Lugar y Fecha : Mar del Plata, Argentina
 Abril, 2012
Información : SLCS
 : Fax: 52 55 1113 2614
 : slcsorg@slcs.org.mx
 : www.slcs.org.mx/congresos.htm

PUBLICACIONES DISPONIBLES

	<p>* Uso Eficiente de Nutrientes. Esta publicación resume el estado del conocimiento con respecto a la eficiencia de uso de nutrientes en las Américas y discute el contexto contemporáneo dentro del cual se deben manejar los nutrientes.</p>	<p>\$ 15.00</p>
	<p>* Nutrición y Fertilización del Mango. Esta publicación ofrece información básica para el manejo de la nutrición y fertilización del mango tomando en cuenta las particulares características de desarrollo de este cultivo en el trópico.</p>	<p>\$ 15.00</p>
	<p>* Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Publicación didáctica sobre uso y manejo de suelos y fertilizantes con datos y ejemplos de diferentes partes del mundo</p>	<p>\$ 15.00</p>
	<p>* Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 1: Vivero. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 1 cubre el manejo del vivero para producir plántas de calidad que deben estar disponibles para la siembra en el campo en el momento requerido.</p>	<p>\$ 15.00</p>
	<p>* Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 2: Fase Inmadura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 2 cubre el manejo de la fase inmadura de la plantación para lograr una población uniforme de palmas productivas en cada bloque del campo.</p>	<p>\$ 15.00</p>
	<p>* Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 3: Fase Madura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 3 cubre el manejo de la fase madura de la plantación para lograr rendimientos sostenidos de racimos de fruta fresca a través de toda la etapa productiva del cultivo.</p>	<p>\$ 15.00</p>

PUBLICACIONES DISPONIBLES

	<p>* Manual de Nutrición y Fertilización del Café. Este manual presenta conceptos modernos del manejo de la nutrición y fertilización del cafeto como herramienta para lograr rendimientos altos sostenidos.</p>	<p>\$ 10.00</p>
	<p>* Manual de Nutrición y Fertilización de Pastos. Esta publicación ofrece a las personas envueltas en la producción ganadera una visión amplia del potencial productivo, de los requerimientos nutricionales y de los factores limitantes impuestos por el ambiente tropical a la producción de forrajes.</p>	<p>\$ 10.00</p>
	<p>* Nutrición de la Caña de Azúcar. Este manual de campo es una guía completa para la identificación y corrección de los desórdenes y desbalances nutricionales de la caña de azúcar. El tratamiento completo de la materia y las excelentes ilustraciones hacen de este manual una importante herramienta de trabajo en la producción de caña.</p>	<p>\$ 8.00</p>
	<p>* Estadística en la Investigación del Uso de Fertilizantes. Publicación que presenta conceptos actuales de diseño experimental e interpretación estadística de los datos de investigación de campo en el uso de fertilizantes.</p>	<p>\$ 6.00</p>
	<p>* Fertilización del Algodón para Rendimientos Altos. En esta publicación se discuten una serie de aspectos para ayudar al investigador a tomar la decisión más adecuada en cuanto a fertilización, teniendo en cuenta todos los factores que pueden afectar el cultivo en condiciones locales.</p>	<p>\$ 5.00</p>