

# Manejo nutricional para alta productividad de cultivos e impacto ambiental reducido\*

Antonio P. Mallarino<sup>1</sup>

## Introducción

El manejo responsable de los nutrientes de las plantas es muy importante debido a la volatilidad de las relaciones de precios grano: fertilizante y la preocupación pública acerca del deterioro de la calidad de agua debido al exceso de pérdida de nutrientes desde los campos. Las fluctuaciones impredecibles de los precios de granos y de fertilizantes, y las regulaciones reales o percibidas de los gobiernos, complican las decisiones de fertilización. Sin embargo, el público desinformado y muchos agentes reguladores del gobierno ven la reducción de las dosis de fertilizante como una forma efectiva de disminuir la pérdida de nutrientes desde los campos y el deterioro de la calidad del agua, especialmente cuando se aplican abonos de origen animal. Reducir las dosis de aplicación de nutrientes a través de todas las condiciones no es una buena decisión de manejo, esto puede reducir los ingresos económicos de los productores y no necesariamente reducir la pérdida de nutrientes de los campos de manera significativa.

Los conceptos básicos más relevantes del manejo de nutrientes para incrementar la eficacia en la producción de cultivos, sin aumentar o inclusive reduciendo el deterioro de la calidad del agua, son diferentes para los nutrientes de alta movilidad en el suelo como el nitrógeno (N, principalmente en la forma de nitratos -  $\text{NO}_3^-$ ) y los de baja movilidad como fósforo (P) y potasio (K). Este artículo se enfoca en las consideraciones para los nutrientes menos móviles, discutiendo principalmente el caso del P, ya que las pérdidas de K no resultan en problemas de calidad de agua. La eutrofización de fuentes de agua dulce debido a excesos de P es un serio inconveniente en países desarrollados y en algunas áreas de países en desarrollo. Por lo tanto, los productores y consultores agrícolas deberían conocer los conceptos fundamentales del uso de los análisis de suelo y las prácticas de aplicación, y necesitan entender que no hay una sola mejor forma de interpretar los valores de análisis de suelos y decidir dosis de aplicación de nutrientes. Los organismos encargados de regular el manejo de nutrientes también deberían comprender la importancia de reglas flexibles ya que no existe una sola mejor práctica de manejo de nutrientes.

## El análisis de suelos: una herramienta de diagnóstico útil pero imperfecta

El análisis de suelos para P y K es una herramienta útil para el diagnóstico y debería ser utilizada para decidir las dosis de fertilización. Comparado con los altos precios

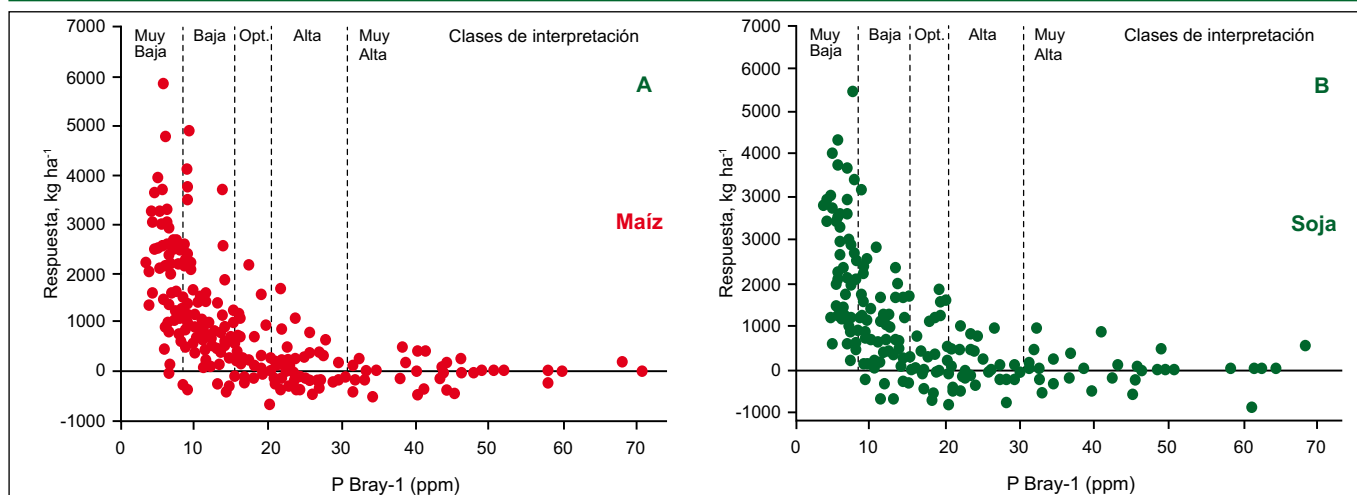
de los cultivos y fertilizantes durante la última década, el muestreo y análisis de suelos se han convertido en una de las prácticas menos costosas y de uso más justificado. Las metodologías de análisis de suelos intentan medir una cantidad de nutriente que es proporcional a la cantidad disponible para los cultivos, y la cantidad medida podría diferir entre suelos con propiedades contrastantes. Además, los distintos análisis para un nutriente suelen proveer diferentes resultados que pueden expresarse en una variedad de formas. Por lo tanto, los métodos de análisis de suelos necesitan ser calibrados para utilizarse en una región específica. Los procesos de calibración incluyen determinar el nivel o rango que separa los suelos con alta y baja o nula probabilidad de respuesta (nivel o rango crítico) y la dosis de fertilización apropiada para cada valor o rango (Dahnke y Olson, 1990). La mayoría de los países y los estados de EE.UU. establecen categorías que abarcan desde niveles muy bajos a muy altos o excesivos. Determinar el nivel o rango crítico no es un proceso claro y preciso, y pueden utilizarse una gran variedad de ecuaciones matemáticas para determinarlos. Todas las ecuaciones incluyen un sesgo y un significativo nivel de incertidumbre, y los cálculos se pueden orientar a lograr máximos rendimientos o máximos retornos económicos. Niveles críticos muy diferentes se pueden establecer dependiendo de muchos supuestos y consideraciones (Mallarino y Blackmer, 1992). Además, reconocido explícitamente o no, los científicos introducen sus propios sesgos acerca de las consideraciones más importantes y la filosofía de manejo más apropiada. La **Figura 1** muestra, como ejemplo, la correlación del análisis de suelo de P con la respuesta de maíz y soja a la aplicación de P en Iowa, y las actuales clases de interpretación.

## Conceptos para la interpretación de análisis de suelos y recomendaciones de fertilización

Los conceptos y filosofías para las interpretaciones de análisis de suelos y recomendaciones de fertilización varían a través de los estados de EE.UU. y los países. Algunos enfatizan la rentabilidad a corto plazo de los nutrientes aplicados, altos retornos económicos por unidad de nutriente, y reducido riesgo de sobre-aplicación aceptando un riesgo moderado de pérdida de rendimiento. Este concepto, suele estar referido a la filosofía de "suficiencia". Esta requiere de la utilización precisa y frecuente del análisis de suelo, y en general es más recomendable para suelos con una gran capacidad de retener el P o K aplicado en formas que no son disponibles para los cultivos (alta capacidad de "fijación"). Otros enfatizan la rentabilidad a largo plazo de

<sup>1</sup> Department of Agronomy, Iowa State University - Ames, Iowa, EE.UU. Correo electrónico: [apmallar@iastate.edu](mailto:apmallar@iastate.edu)

\* Traducción al español del trabajo presentado en el XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-20 de Abril de 2012. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.



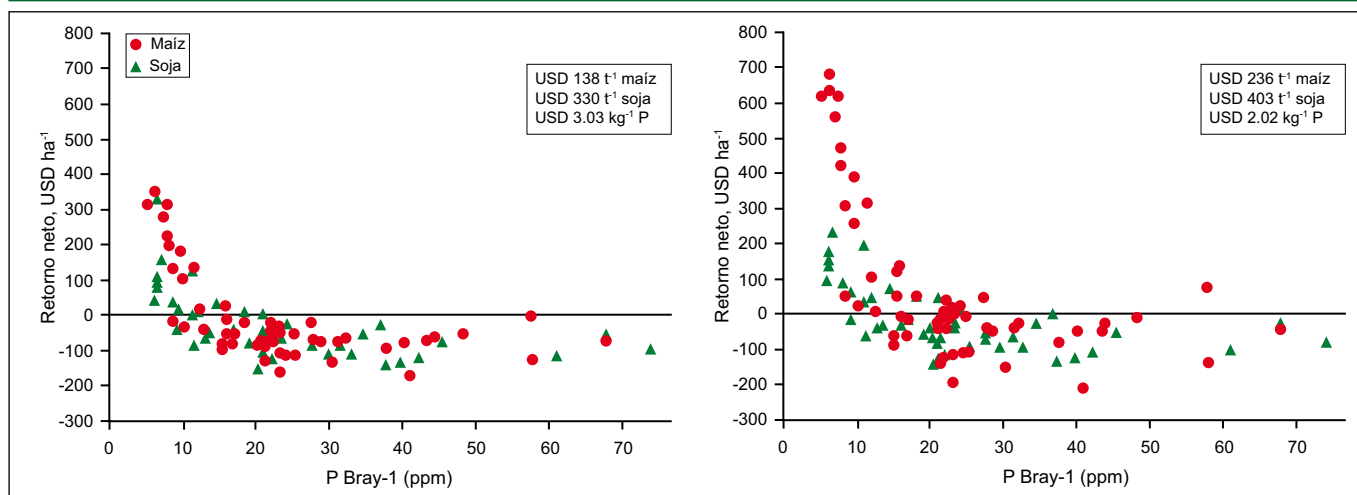
**Figura 1. Relación entre la respuesta en rendimiento en grano de maíz (A) y soja (B) a la fertilización fosforada y los valores del análisis de suelo de P (P Bray-1; 0-15 cm). Los datos fueron tomados de Dodd y Mallarino (2005) y las clases de interpretación de Sawyer et al. (2002).**

la fertilización, maximizar el retorno económico a largo plazo, el mantenimiento de niveles de análisis de suelo óptimos o ligeramente superiores a este, y la reducción de riesgo de pérdida de rendimiento debido a una fertilidad insuficiente. Este concepto, suele referirse a la filosofía de "construir y mantener". Esta puede no requerir análisis de suelo frecuentes, y en general, es recomendable para suelos que retienen pero no necesariamente "fijan" demasiado del P o K aplicado, y requiere del conocimiento de dosis de fertilizantes necesarias para mantener los niveles de análisis de suelo, que usualmente se basan en la remoción de P o K con o sin ajustes empíricos.

La mayoría de las interpretaciones de análisis de suelo, a menudo combinan aspectos de ambas filosofías de interpretación. Las interpretaciones y recomendaciones de nutrientes suelen diferir incluso con respuestas del cultivo y análisis de suelo aproximadamente similares, debido a que la filosofía y los supuestos de las mismas hacen que las recomendaciones también difieran. Las dosis de aplicación de P y K recomendadas para suelos con bajos niveles en el análisis en Iowa (Sawyer et al., 2002), se basan en datos de la respuesta de los cultivos, y están diseñadas para ser rentables y minimizar el riesgo de pérdida de rendimiento para una amplia gama de suelos donde la probabilidad de respuesta de los cultivos es muy alta. Estas dosis aumentarán gradualmente los niveles de análisis del suelo, a la categoría de valores óptimos, para lo cual la recomendación de fertilizantes se ha diseñado con el objetivo de mantener un nivel óptimo basado en estimaciones de extracción de P o K por los cultivos. La construcción moderada de niveles de análisis de suelo ocurre incluso con dosis óptimas económicas aplicadas a suelos con bajos niveles. Esto se explica por la absorción parcial de la planta, reciclando en el suelo con los residuos, y las propiedades del suelo que mantienen el P y K aplicado en formas disponibles para el cultivo a través del tiempo.

La mayoría de los suelos de Iowa y el cinturón maicero de EE.UU., no tienen propiedades químicas y mineralógicas

que se traduzcan en una transformación significativa del P o K aplicado en formas no disponibles (Dodd y Mallarino, 2005), como puede ocurrir en otras regiones. La mayoría de los suelos retienen P y K, pero esto no significa fijación en formas no disponibles para las plantas. Aunque los estudios indican que el 20% y el 30% del P o K aplicado es absorbido por un primer cultivo, el resto pasa a formar parte de una fracción del suelo que es o se vuelve disponible para los cultivos siguientes y se puede medir mediante análisis de suelo. Esto tiene dos consecuencias muy importantes. Una de ellas es que gran parte de los nutrientes aplicados pueden ser "depositados" en el suelo, y esto permite utilizar a largo plazo, el análisis de suelo y el manejo de los fertilizantes. Esto no es posible para N, y no puede ser eficiente para P o K en regiones donde una proporción importante de los nutrientes aplicados es retenida en los suelos en formas de poca disponibilidad para los cultivos. La otra consecuencia es que, en suelos con poca capacidad de "fijación", los métodos de aplicación de fertilizantes o productos que mejoran la eficiencia de uso de fertilizantes fosforados, no tienen el valor que pueden tener en los suelos con capacidad de fijación significativa. Esta es la razón por la cual las guías de manejo en el cinturón maicero rara vez sugieran el uso de métodos de ubicación para P o K, o el uso de productos que teóricamente aumentan la eficiencia del uso de nutrientes mediante la reducción de la reacción de P soluble, o fuentes de K en los suelos. Cientos de ensayos de campo realizados en Iowa y suelos similares de los estados vecinos han mostrado reducidas o nulas diferencias en el rendimiento de maíz (excepto los efectos de arranque en ciertas condiciones) o para soja manejada con siembra directa, labranza cero, labranza en franjas, o labranza en surcos, entre aplicaciones al voleo, en bandas poco profundas a la siembra y en bandas profundas. Sin embargo, las bandas pueden tener una ventaja cuando se aplican dosis bajas que limitan el rendimiento, y en otras regiones con clima más seco, o en suelos que realmente fijan el P aplicado.



**Figura 2. Retorno neto por aplicación de P para diferentes niveles de P en el suelo (P Bray-1; 0-15 cm) y relaciones de precios (Adaptado de Mallarino, 2009).**

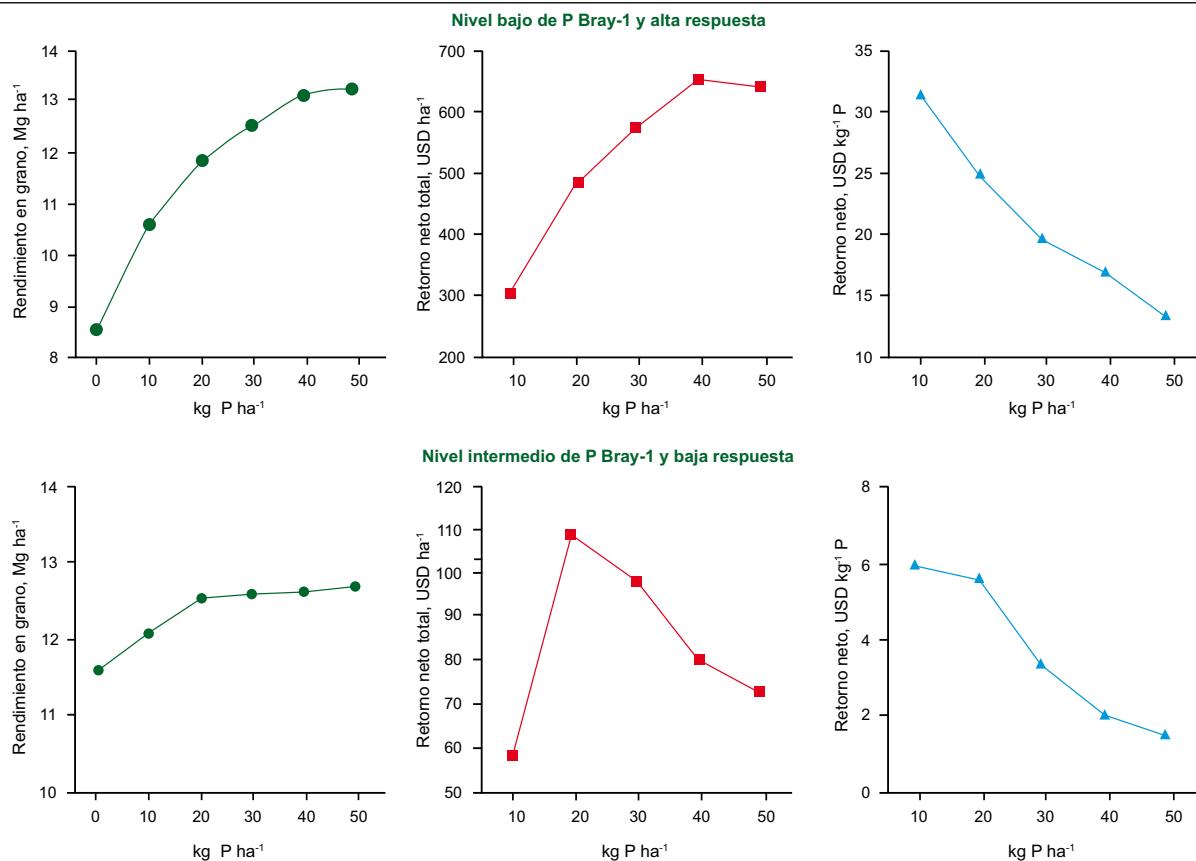
### Considerando las relaciones de precios grano/fertilizante y la incertidumbre

En la medida que se incrementan los niveles de nutrientes en los análisis de suelo, la probabilidad de incremento en rendimiento por fertilización y la magnitud de las respuestas de rendimiento o económicas, decrece. Las relaciones de precios influyen en la dosis de fertilizante que debería ser aplicado cuando se intenta optimizar la rentabilidad de la fertilización y la producción de los cultivos. No importan las filosofías de interpretación, los retornos netos de la fertilización son mayores en suelos con bajos niveles de análisis, decrecen con el incremento de los niveles en el suelo y, usualmente se convierten en negativos para las categorías Alta y Muy Alta. La fertilización de suelos con bajos niveles de análisis, usualmente resulta en retornos significativos debido a que la probabilidad de respuesta se incrementa. Los resultados experimentales de Iowa en la **Figura 2**, muestran los retornos netos por fertilización en función de los niveles del análisis de suelo y las relaciones de precios.

Las **Figuras 1 y 2** muestran el grado de incertidumbre que siempre existe cuando se relacionan los niveles de análisis de suelo con la respuesta del cultivo a la fertilización o la rentabilidad económica de la práctica. El análisis del suelo no está libre de error o incertidumbre, y los resultados pueden ser interpretados de maneras muy diferentes dependiendo de muchos factores. El error de muestreo debido a la gran variabilidad espacial y el sesgo del laboratorio son grandes, y deben ser reconocidos como una fuente de incertidumbre. La incertidumbre también se debe a las dificultades de predecir con exactitud las condiciones que limitan la respuesta a la fertilización, o inducen una respuesta mayor a la esperada. Por lo tanto, es muy importante que las recomendaciones proporcionen una idea de la probabilidad de respuesta para las diferentes categorías de análisis de suelo. La investigación de campo en Iowa, ha reportado porcentajes esperados promedio de probabilidad de respuesta a P o K dentro de cada categoría de análisis de suelo (**Figura 1**), siendo

aproximadamente el 80% en Muy Baja, el 65% en Baja, 25% en la Óptima, el 5% en Alta, y <1% para Muy Alta. Estas estimaciones se proporcionan en la publicación de las recomendaciones (Sawyer et al., 2002).

La aplicación de fertilizantes en dosis más bajas de lo necesario para lograr el máximo rendimiento neto, resultará en un mayor retorno por unidad de nutriente aplicado. Esto se debe a la relación curvilínea habitual hacia una forma de meseta de la respuesta del cultivo en los valores altos de fertilidad o de análisis de suelo. La **Figura 3** muestra un ejemplo del aumento de rendimiento de grano y los ingresos netos de la fertilización en un suelo con bajo P. La rentabilidad total máxima se alcanza a una dosis inferior a la que maximiza el rendimiento, la diferencia entre ambas dosis depende de las relaciones de precios. Mayores dosis disminuyen la rentabilidad total, y las dosis excesivamente altas pueden incluso dar lugar a respuestas económicas negativas. Por lo tanto, los productores deben estudiar cuidadosamente si deben reducir, y cuánto, las dosis de aplicación a los suelos con bajo nivel en el análisis. Una buena decisión requiere la consideración de muchos factores, que incluyen la filosofía de manejo de negocios del productor. Una dosis baja de aplicación puede incrementar el retorno por unidad de fertilizante aplicado, pero puede limitar el rendimiento, el retorno total de la inversión en fertilizantes, y la rentabilidad total para el sistema de producción. Con una baja magnitud o probabilidad de respuesta del cultivo, el riesgo de un exceso de la aplicación de fertilizantes es mucho mayor (**Figura 3**). En algunas regiones, se pueden lograr niveles similares de rendimiento con bajos niveles en el análisis de suelo mediante la aplicación reducida en bandas, en comparación con la fertilización al voleo. Sin embargo, la investigación en muchos campos ha demostrado que raramente este sea el caso en los suelos de Iowa y la zona maicera (Bordoli y Mallarino, 1998; Borges y Mallarino, 2000; Kaiser et al., 2005). A pesar de ello, la aplicación en bandas puede ser un buen método para aplicar P de manera uniforme y precisa, y se puede utilizar junto con otras prácticas de manejo que generan beneficios (tales como la labranza en franjas o insecticida aplicado sobre el surco).



**Figura 3. Respuesta en rendimiento de maíz a la fertilización fosfatada, ingresos netos totales, e ingresos por unidad de P aplicado (suponiendo USD 167 t<sup>-1</sup> para grano de maíz y USD 3.03 kg<sup>-1</sup> de P) en suelos de categoría “baja” e “intermedia” de P Bray-1.**

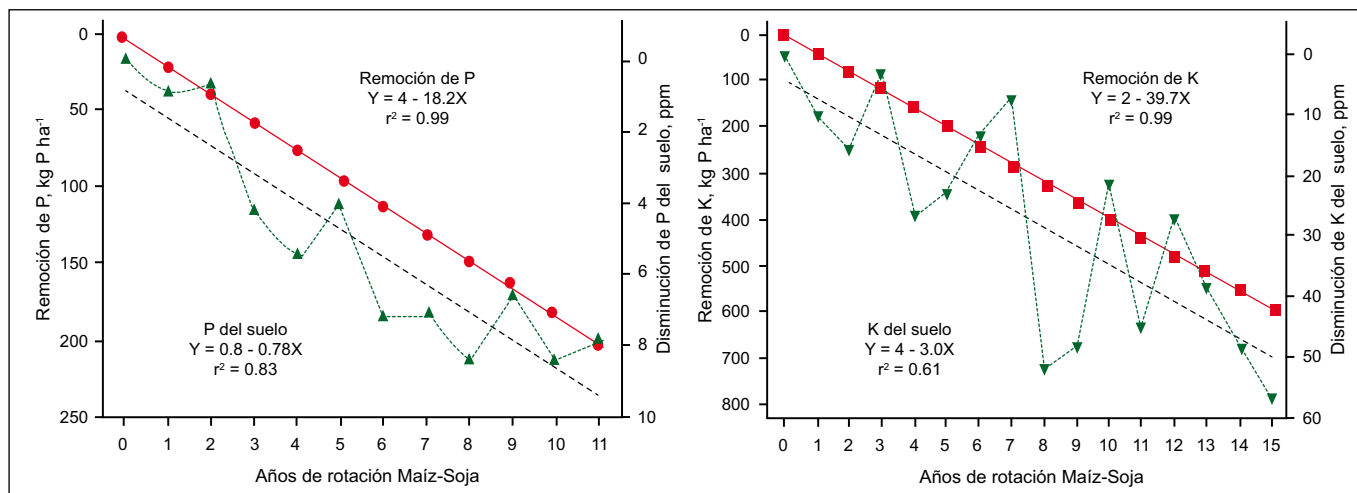
En los suelos con altos niveles en el análisis, la probabilidad de una pérdida de la inversión en la fertilización de un cultivo es alta debido a que la probabilidad de respuesta en producción es baja o nula. En estos casos, una disminución en los niveles del suelo, también puede reducir el riesgo de deterioro de la calidad del agua. Por lo tanto, evitar la fertilización innecesaria en los suelos con altos niveles es el cambio más rentable que un productor puede utilizar en épocas de precios altos o inciertos. Algunos creen que permitir esta reducción podría no ser una buena decisión de negocios porque los precios de los fertilizantes pueden ser aún mayores en el futuro. Este es un tema que cada productor debe considerar, pero en general no es una buena decisión en el manejo de nutrientes. Sin embargo, la toma de decisiones para niveles intermedios no es simple, y no hay una sola respuesta válida para todas las condiciones.

### ¿Qué nivel de análisis de suelo debería ser mantenido?

La aplicación de fertilizantes o estiércol y la extracción de P o K con la cosecha de los cultivos, son los factores más importantes que determinan el cambio en los niveles de dichos nutrientes en los análisis de suelo de muchas regiones a través del tiempo. Los niveles de rendimiento varían considerablemente y, por lo tanto, tienen un gran impacto en la extracción de nutrientes. La investigación ha demostrado que se puede mantener un nivel aproximado al óptimo de análisis de suelo, mediante la aplicación de

P o K en dosis equivalentes a la remoción por parte de los cultivos, siempre y cuando los niveles de rendimiento supuestos y las concentraciones de nutrientes de los productos cosechados sean los apropiados (Mallarino et al., 2011). Sin embargo, la **Figura 4** muestra que la relación entre la remoción de P y el análisis de P en el suelo, es clara y congruente sólo en un periodo de años y puede ser muy variable e incongruente de año en año. La investigación ha demostrado que la variación en los niveles de producción no afecta los niveles críticos de P o K, o solo los incrementa en una magnitud muy pequeña, por lo menos en los niveles más altos de rendimiento que se observan actualmente en Iowa. Por otro lado, el tener en cuenta el nivel de rendimiento, especialmente en maíz, es muy importante para aumentar los niveles de P y K en el suelo hacia valores deseados y para mantener estos niveles respondiendo a la extracción.

Aunque el concepto de fertilización de mantenimiento de P o K está bien establecido en los EE.UU., aún es poco conocido por algunos productores y consultores agrícolas de EE.UU. y otros países. El uso de este concepto es una de las evidencias más claras de la filosofía de manejo de la fertilidad. Por ejemplo, el mantenimiento de un nivel de nutrientes en el análisis de suelo no es considerado por una filosofía estricta de nivel de suficiencia. Las recomendaciones a menudo no especifican el criterio utilizado para establecer el rango de valores a mantener, ni el beneficio económico de la fertilización de mantenimiento. Las recomendaciones de Iowa indican



**Figura 4. Tendencia de los niveles de análisis de suelo y la remoción por cosecha de P y K, para rotaciones maíz-soja a través del tiempo en parcelas que no recibieron fertilización con P o K (promedios de 5 sitios de Iowa). Los símbolos rojos indican remoción por cosecha y los verdes el nivel de P o K del suelo.**

claramente que el objetivo de la fertilización basada en la extracción por cosecha es mantener un rango (Óptimo) de valores en el suelo, que resulta en una probabilidad del 25% de obtener pequeñas respuestas. Por lo tanto, estas dosis de aplicación están diseñadas para mantener los valores de análisis de suelo y eliminar la deficiencia de nutrientes, pero no necesariamente para maximizar los beneficios de la fertilización de un cultivo. El descenso del análisis de suelo sin suficiente aplicación de P o K, es pequeño en un año y gradual en el tiempo (Figura 4). Por lo tanto, un productor podría reducir o demorar la aplicación de fertilizantes para esta categoría de análisis de suelo, dependiendo de varios factores. La aplicación de una dosis más baja puede ser razonable cuando la relación de precios fertilizante/grano es mayor de lo habitual, el suministro de fertilizantes es escaso, o los fondos limitados son requeridos para otros insumos de producción más importantes. Por otro lado, algunos productores pueden creer que un 25% de probabilidad de ocurrencia de una pérdida de rendimiento, incluso siendo pequeñas, no es aceptable teniendo en cuenta los altos costos de otros insumos o los costos fijos de producción. Por otra parte, las percepciones acerca de la cosecha del próximo año y los precios de los fertilizantes, pueden alentar a los productores para no aplicar la fertilización de mantenimiento o una dosis de construcción.

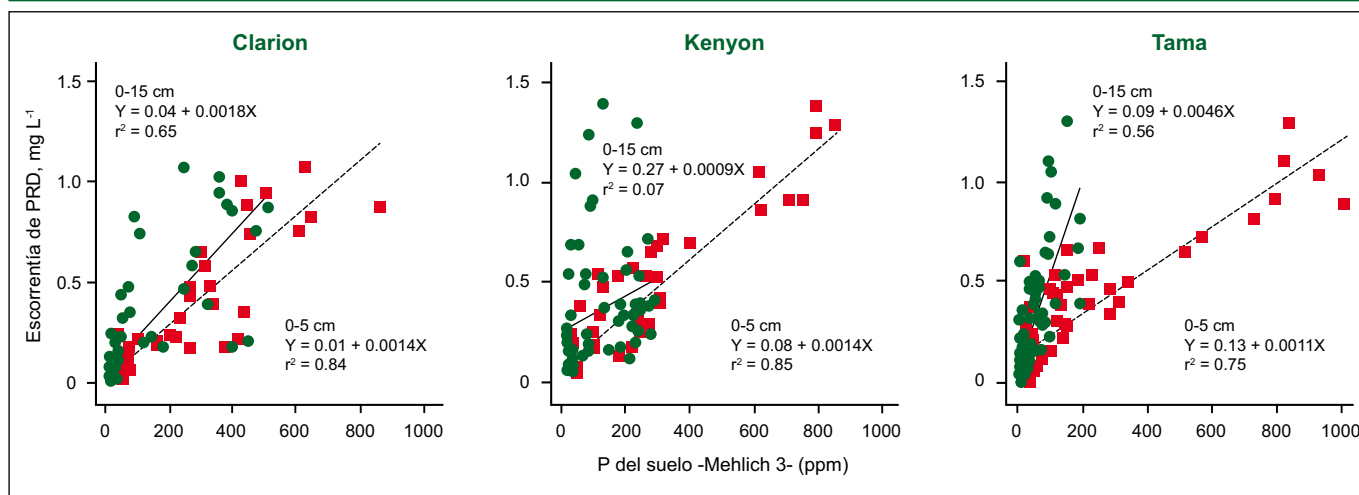
### Consideraciones de tenencia de la tierra y riesgo

La tenencia de la tierra y el enfoque de manejo empresarial del productor son de gran influencia en la cantidad de P y K que se aplica, principalmente, con valores de análisis de suelo cercanos a los niveles óptimos. La tenencia de la tierra no es una consideración para la economía de la fertilización nitrogenada, pero debe ser una consideración clara para el manejo de P y K, debido a los efectos residuales de la aplicación y la posibilidad de manejarlos a largo plazo, mencionada anteriormente. Hace muchos años, Fixen (1992) demostró que las tasas de interés y la tenencia de la tierra pueden tener un gran impacto en el nivel de análisis de suelo considerado óptimo para los

cultivos. La reducción de las dosis de fertilización con P y K en los suelos con bajos niveles, con una tenencia segura de la tierra, no es una buena decisión de negocios porque hay una alta probabilidad de respuesta de rendimiento, incrementa el riesgo de pérdida de rendimiento y de beneficios limitados del sistema de producción y, por otra parte, un exceso de aplicación a un cultivo no significa un exceso en la rotación. Incluso con tenencia incierta de la tierra, no se recomienda una reducción en la dosis de P y K en estos suelos, pues existe una alta probabilidad de respuestas de gran magnitud. Sin embargo, con tenencia incierta de la tierra, y niveles óptimos de análisis de suelo, la dosis de fertilización de mantenimiento puede ser reducida debido a que hay una baja probabilidad de respuesta de los cultivos. Si la reducción de la dosis de aplicación de nutrientes se prolonga en el tiempo, sin embargo, el total de ingresos netos por la fertilización y la productividad futura pueden ser limitados. Por lo tanto, con la tenencia de la tierra incierta y de alto riesgo, las decisiones sobre el mantenimiento de un nivel o rango deseable de análisis de suelo, dependen principalmente de la probabilidad de respuesta para ese rango y la actitud del productor hacia el riesgo.

### Análisis de suelo de P y efectos de la dosis de aplicación en la calidad de agua

Las normas relativas a la protección de la calidad del agua por pérdida excesiva de P desde los campos también pueden afectar las decisiones sobre la aplicación de fertilizante o estiércol. Dosis de aplicación altas que aumentan la concentración de P del suelo a niveles mucho más altos que los niveles óptimos para los cultivos, aumentan el riesgo de pérdida de P y la eutrofización de los cuerpos de agua superficiales. El P suele ser el nutriente que limita y controla el crecimiento de algas en cuerpos de agua dulce. La eutrofización se produce cuando el crecimiento excesivo de algas y la reducción de los niveles de oxígeno del agua debido a los altos niveles de nutrientes resulta en desequilibrios en los ecosistemas acuáticos, muerte de peces, aumento de



**Figura 5. Relación entre el P reactivo disuelto (PRD) en escorrentía y el nivel de P medido en análisis de suelo para los estratos 0-5 cm (cuadrados rojos) y 0-15 cm (círculos verdes), en suelos de Iowa manejados con rotación maíz-soja y labranza convencional o siembra directa.**

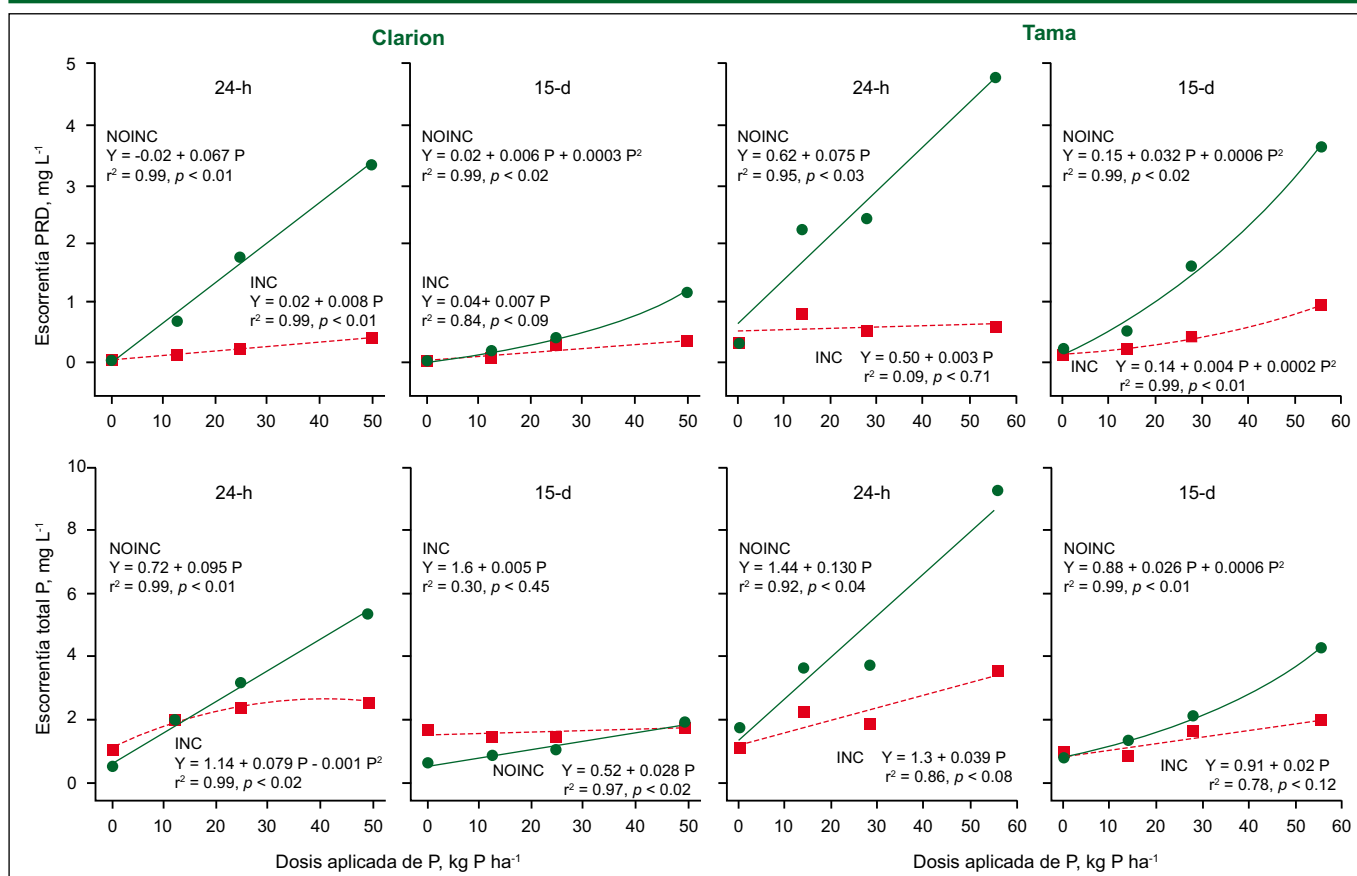
microorganismos productores de toxinas, y la reducción del valor estético de los lagos o arroyos. La producción de ganado resulta en grandes cantidades de estiércol que es una fuente valiosa de nutrientes para la producción de altos rendimientos de los cultivos, y se puede utilizar para minimizar el uso de fertilizantes inorgánicos y conservar las fuentes de nutrientes no renovables. Los análisis de suelo de P son a menudo muy elevados en los ámbitos donde se aplica estiércol sin tener en cuenta las necesidades de nutrientes de los cultivos o basándose en las necesidades de N de los cereales. Este es especialmente el caso para el estiércol de aves de corral (baja relación N:P) y para cualquier estiércol aplicado en maíz continuo o trigo.

El concepto de calibración de análisis de suelos para la producción agrícola, también se aplica a la interpretación para el riesgo de deterioro de la calidad del agua. El significado de un determinado nivel de análisis de suelo, en términos de pérdida de nutrientes y el impacto sobre el crecimiento de algas, puede variar mucho entre las distintas profundidades de muestreo, métodos de análisis de suelo, las propiedades del suelo, el transporte de agua hacia los recursos hídricos, y las propiedades de los cuerpos de agua receptores. Las relaciones entre la concentración de P en la escorrentía superficial y el análisis de suelo muestran que el escurrimiento de P, generalmente se incrementa linealmente con el aumento del nivel en el análisis de suelo. La **Figura 5**, muestra cómo el nivel de P Mehlich-3 en el suelo, el tipo de suelo y la profundidad de muestreo afectan la concentración de P disuelto en la escorrentía superficial. El muestreo superficial del suelo, mejora en gran medida las relaciones en comparación con la profundidad de muestreo común de 0-15 cm, y esto se observó tanto para los campos cultivados como no cultivados (datos no mostrados). Sin embargo, el aumento del riesgo de pérdida de P, se vuelve claro y constante para los valores de análisis de suelo mayores de 30 a 40 ppm (0-15 cm de profundidad), que es el límite entre las clases de interpretación Alta y Muy Alta del análisis de suelo para dicho extractante. Los experimentos que analizan la

pérdida de P a través del drenaje sub-superficial, indican que la pérdida significativa comienza a producirse a un nivel de P del suelo cuatro a cinco veces mayor que los niveles óptimos de los cultivos (datos no mostrados). Por lo tanto, tanto la economía de la producción de los cultivos, como las preocupaciones ambientales, deben desalentar las estrategias de aplicación de fertilizantes fosfatados que aumentan el P extractable del suelo, en este caso con Mehlich-3, a niveles mucho más altos que los niveles óptimos para los cultivos.

Una pregunta frecuente es cómo se relacionan los métodos comúnmente utilizados para el análisis de P del suelo, con aquellos métodos diseñados para medir las formas de P más relevantes en el crecimiento de las algas. La investigación en Iowa ha mostrado una buena correlación entre las metodologías de análisis de rutina de P del suelo, y varios de los llamados "métodos ambientales" para análisis de P (Atia y Mallarino, 2002; Klatt et al., 2003; Allen y Mallarino, 2006; Allen et al., 2006). Se encontraron resultados similares en otros estados de los EE.UU. y, por lo tanto, los análisis de suelo de rutina utilizados para la producción agrícola, también se utilizan para las evaluaciones de riesgo de deterioro de la calidad del agua. Sin embargo, en algunas condiciones ambientales, los análisis de P en el suelo (por ejemplo, índices de saturación) predicen mejor los impactos del P sobre la calidad del agua. Estas condiciones incluyen suelos con propiedades extremas y niveles de P en el suelo varias veces superiores a los óptimos para los cultivos.

La incorporación del P en el suelo, sin aumentar significativamente la erosión, reduce la concentración de P en o cerca de la superficie, y puede reducir las pérdidas de P por escurrimiento. La investigación de campo en Iowa durante las últimas dos décadas, ha demostrado que la incorporación en el suelo, o el bandeo profundo, y la inyección del fertilizante o abono fosfatado en el suelo, no mejoran los rendimientos de los cultivos en comparación con aplicación al voleo, pero pueden reducir de manera significativa los eventos de escorrentía después de su aplicación en terrenos



**Figura 6. Efecto de la dosis de P, su incorporación o no, y el tiempo simulado de precipitación (24 horas, 15 días), sobre las concentraciones de P total y PRD de escorrentía para dos suelos en Iowa. INC: estiércol de cerdo incorporado (cuadrados rojos); NOINC: estiércol de cerdo no incorporado (círculos verdes). Adaptado de Allen y Mallarino (2008).**

con pendiente. Sin embargo, esto no es necesariamente el caso de eventos de escorrentía lenta, o cuando la labranza o la operación de incorporación resultan en una mayor erosión del suelo. La muestra que la incorporación de P en el suelo (en este caso con arado de disco) reduce la pérdida del nutriente por eventos de escorrentía que ocurren poco después de las aplicaciones. Sin embargo, incluso con un retraso de unos días, el efecto de la incorporación es mucho menor (o nulo), o aumenta la pérdida de P a bajas dosis de aplicación. Resultados similares fueron observados en investigaciones con bajas dosis de aplicación de fertilizantes inorgánicos y otros tipos de abonos. Por lo tanto, la incorporación o el bandeado profundo de P en el suelo pueden reducir el riesgo de pérdida de P por escorrentía superficial y la erosión cuando la operación no aumenta la erosión del suelo o la pérdida de agua y, sobre todo, en temporadas con probables eventos de escorrentía. Esto es importante porque la siembra directa tiene muchas ventajas, y la consideración de la probabilidad de eventos de escorrentía para el calendario de aplicación de P puede disminuir la pérdida potencial del nutriente debido a la ausencia de incorporación al suelo.

### Herramientas integrales de evaluación de riesgos para fósforo

Las consideraciones económicas no justifican las dosis de fertilizantes fosfatados mayores que lo necesario para optimizar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, la utilización de N de abonos y la consideración de los costos de transporte del estiércol a grandes distancias, pueden

justificar la aplicación de éste a los suelos con altos niveles en el análisis de suelo, cuando los factores del sitio determinan un bajo riesgo de pérdida de P. Este es el motivo por el cual los factores del transporte afectan las pérdidas de suelo y agua de los campos, y a menudo son más importantes que el nivel de P en el suelo y la dosis de aplicación en la determinación del movimiento de P a los recursos hídricos por erosión, escorrentía superficial o del subsuelo. Esta es la razón por la que las herramientas de evaluación de riesgos o los índices de P fueron desarrollados. En los EE.UU., el índice P se requiere como parte del proceso de planificación del manejo de nutrientes por agencias reguladoras federales o estatales, cuando se aplica estiércol o cualquier fuente de P dentro de las cuencas con la calidad del agua deteriorada.

Los índices de P desarrollados en Iowa, y en la mayoría de los estados de EE.UU., no son modelos de transporte de P completos, pero son herramientas cuantitativas prácticas que proporcionan estimaciones razonablemente buenas del riesgo de pérdida y que pueden ser utilizados por los agricultores y consultores agrícolas avanzados. La mayoría de los índices de P que se han implementado incluyen una serie de características de los sitios relacionados con la fuente, el transporte y el manejo de P. Estas características (o factores) pueden incluir el potencial de erosión del suelo, la clase de escurrimiento del agua, el análisis de P en el suelo, y la dosis y métodos de aplicación de P de los fertilizantes y fuentes orgánicas, entre otros. Los primeros índices de P fueron cualitativos, y los diferentes factores se consideraban aditivos. A cada factor se le asignó una calificación relativa

de potencial de pérdida de P, con un valor numérico correspondiente, y un coeficiente de ponderación que se asigna a cada factor para reflejar su importancia relativa en contribuir a la pérdida del nutriente. El índice P se calculó multiplicando cada calificación potencial por su factor de ponderación correspondiente y sumando los resultados. El valor del índice para un campo individual se coloca en una categoría (por ejemplo, muy bajo a muy alto) con las interpretaciones y las recomendaciones correspondientes para el manejo del nutriente. Las versiones recientes del índice, desarrollado para determinadas regiones o estados, incluyen otros factores, y otra forma de estimación de las categorías de pérdida potencial de P para obtener el índice de P. Los factores adicionales en algunos de los índices de P incluyen la distancia al cuerpo de agua; la labranza, la vegetación, o el manejo del pastoreo; la hidrología del sitio (por ejemplo, pendiente y la longitud, la frecuencia de las inundaciones, clase de drenaje, drenaje subterráneo, etc.); y estimaciones del grado de saturación de P en el suelo.

El índice de P para Iowa utiliza un enfoque múltiple para combinar las fuentes y factores de transporte con tres componentes principales basados en los mecanismos de transporte de P más relevantes. Estos componentes son la erosión (P en sedimentos y partículas), la escorrentía, y el drenaje profundo (agua y P disuelto). Cada componente provee una estimación aproximada (o proporcional) a la cantidad de P transportado desde los campos a través de cada mecanismo de transporte que sería biológicamente disponible para ecosistemas acuáticos. Las salidas desde estos tres componentes se suman para obtener una aproximación general del total del P transportado biológicamente disponible. El número resultante (uno por campo o por cada unidad de manejo) es colocado en una de las cinco clases de riesgo (desde muy bajo a muy alto). Estas categorías se basan en conocimientos actuales sobre el impacto de las cargas de P en la eutrofización de los recursos hídricos. Para más detalles del índice de P para Iowa, ver Mallarino et al. (2002) y USDA-NRCS (2004).

Por lo tanto, la aproximación del índice de P es más integral y completa que confiar solamente en el análisis de suelo de P o los umbrales de dosis de fertilización, debido a que estos no proveen estimaciones razonables del potencial de transporte del nutriente hacia los cursos superficiales de agua, ni condiciones para pérdidas potenciales altas. El índice es una herramienta de evaluación más racional, y puede ser utilizada para identificar las prácticas de manejo de nutrientes, suelos y agua que pueden reducir en gran medida las pérdidas de P y el deterioro de la calidad del agua.

## Bibliografía

Allen, B.L., y A.P. Mallarino. 2006. Relationships between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer or manure application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:454-463.

Allen, B.L., y A.P. Mallarino. 2008. Effect of liquid swine manure rate, incorporation, and timing of rainfall on phosphorus loss with surface runoff. *J. Environ. Qual.* 37:125-137.

Allen, B.L., A.P. Mallarino, J.G. Klatt, J.L. Baker, y M. Camara. 2006. Soil and surface runoff phosphorus relationships for five typical USA Midwest soils. *J. Env. Qual.* 35:599-610.

Atia, A.M., y A.P. Mallarino. 2002. Agronomic and environmental phosphorus testing for soils receiving swine manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1696-1705.

Bordoli, J.M., y A.P. Mallarino. 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agron. J.* 90:27-33.

Borges, R., y A.P. Mallarino. 2000. Grain yield, early growth, and nutrient uptake of no-till soybean as affected by the phosphorus and potassium placement. *Agron. J.* 92:380-388.

Dahnke, W.C., y R.A. Olson. 1990. Soil test correlation, calibration, and recommendation. pp. 45-71. In R.L. Westerman (ed.). *Soil testing and plant analysis*, 3rd ed. SSSA, Madison, WI.

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

Fixen, P. 1992. Role of land tenure and other factors in soil P interpretations. pp. 125-133. In North-Central Extension-Industry Soil Fertility Conf. Proceedings. Nov. 18-19. Vol. 8. Bridgeton, MO. <http://extension.agron.iastate.edu/nce>.

Kaiser, D.E., A.P. Mallarino, y M. Bermudez. 2005. Corn grain yield, early growth, and early nutrient uptake as affected by broadcast and in-furrow starter fertilization. *Agron. J.* 97:620-626.

Klatt, J.G., A.P. Mallarino, J.A. Downing, J.A. Kopaska, y D.J. Wittry. 2003. Soil phosphorus, management practices, and their relationship to phosphorus delivery in the Iowa Clear Lake agricultural watershed. *J. Env. Qual.* 32:2140-2149.

Mallarino, A.P. 2009. Long term phosphorus studies and how they affect recommendation philosophies. pp. 6-12. In North-Central Extension-Industry Soil Fertility Conf. Proceedings. Nov. 14-15. Vol. 25. Des Moines, IA. <http://extension.agron.iastate.edu/nce>.

Mallarino, A.P., y A.M. Blackmer. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agron. J.* 84:850-856.

Mallarino, A.P., B.M. Stewart, J.L. Baker, J.A. Downing, y J.E. Sawyer. 2002. Phosphorus indexing for cropland: Overview and basic concepts of the Iowa phosphorus index. *J. Soil Water Conserv.* 57:440-447.

Mallarino, A.P., R.R. Oltmans, J.R. Prater, C.X. Villavicencio, y L.B. Thompson. 2011. Nutrient uptake by corn and soybean, removal, and recycling with crop residue. p. 103-113. In *The Integrated Crop Management Conf. Proceedings*. Nov. 30 - Dec. 1, 2011. Iowa State Univ. Extension. <http://www.aep.iastate.edu/icm/proceedings/ICM11.pdf>.

Sawyer, J.E., A.P. Mallarino, R. Killorn, y S.K. Barnhart. 2002. General guide for crop nutrient recommendations in Iowa. Publ. Pm-1688 (reprinted in 2011). Iowa State Univ. Extension. Ames, IA. <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1688.pdf>.

United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS). 2004. Technical Note No. 25. The Iowa Phosphorus Index. Des Moines, IA. <http://www.ia.nrcs.usda.gov/technical/Phosphorus/phosphorusstandard.html>.