UNA NUEVA FORMA DE DETERMINAR LA EFICIENCIA DE USO DEL FOSFORO EN AGRICULTURA

A.E. Johnston[1] y K. Syers[2]

Introducción

En una reciente revisión completa de la literatura hecha por Syers et al. (2008) sobre la eficiencia de uso del fósforo (P) en una amplia variedad de sistemas de cultivo, tipos de suelo y climas, se observó que la recuperación (eficiencia) del P aplicado como fertilizante más el P residual frecuentemente estaba entre 50 y 90 % cuando se mide con un método adecuado y en una apropiada etapa de tiempo. Este artículo discute más profundamente el comportamiento encontrado por esta revisión bibliográfica.

El porcentaje de recuperación de un nutriente, X, frecuentemente se calcula por el método de la diferencia:

$$\text{Recuperación (\%)} = \frac{\text{Absorción del cultivo con X} - \text{absorción del cultivo sin X}}{\text{Cantidad de X aplicada}} \times 100$$

Este método es generalmente apropiado para determinar la recuperación del nitrógeno (N) aplicado con los fertilizantes, pero su uso es más limitado para P y potasio (K). Porque?. El N inorgánico de los fertilizantes que contienen (o se transforman a) amonio o nitrato que no es utilizado por el cultivo rara vez permanece en el suelo como residuo. El nitrato que queda en el suelo luego puede perderse por lixiviación o denitrificación y el amonio por volatilización. Por esta razón, la recuperación del N aplicado se determina mejor por el método de la diferencia. Sin embargo, una muy pequeña o ninguna cantidad de P y K residual se pierden del suelo. En la mayoría de suelos, este remanente se acumula como una reserva de estos dos nutrientes.

Se puede usar el método directo, utilizando el isótopo ^{32}P, para medir el porcentaje de recuperación de P aplicado con los fertilizantes. El porcentaje de recuperación (eficiencia) obtenido por este método rara vez supera el 25 %. Sin embargo, se debe pensar en lo siguiente: si solamente 25 % del P en un cultivo proviene del P aplicado con los fertilizantes, el otro 75 % debe provenir de las reservas del suelo. Si se quiere mantener la fertilidad del suelo, cualquier P utilizado de las reservas debe ser reemplazado. Entonces, es razonable considerar que del total de P absorbido por el cultivo, parte del fertilizante recientemente aplicado y parte de las reservas del suelo (que se mantiene mediante aplicación de P), representa la recuperación del P a largo plazo. Johnston y Poulton (1977) propusieron otro método para medir la eficiencia de uso de P que luego fue ampliado por Syers et al. (2008) y que se denominó el "Método del Balance" en el cual el porcentaje de recuperación del P aplicado se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Recuperación (\%)} = \frac{\text{Remoción de P por el cultivo}}{\text{P aplicado}} \times 100$$

Este método tiene la ventaja de que toma en cuenta la recuperación del P de las reservas del suelo y que no necesita una parcela control sin aplicación de P.

Un segundo aspecto de la eficiencia de uso de P se relaciona con el reciente conocimiento del comportamiento del P en el suelo. En relación a la disponibilidad de P para que sea absorbido por las raíces de las plantas, Jonhston (2001) sugirió que el P presente en el suelo se encuentra en cuatro compartimentos. Además de definir los cuatro compartimentos caracterizados por la disponibilidad de P para absorción por las raíces de las plantas, los autores relacionaron los cuatro compartimentos con la extractabilidad del P por diferentes reactivos químicos. De esta forma, una medida de laboratorio del P disponible se puede relacionar con el P que absorve el cultivo en el campo. En la **Figura 1** se presenta un esquema del concepto.

La cantidad de P en cada uno de estos compartimientos está relacionada con la energía entre los sitios de enlace en la superficie o dentro de los constituyentes del suelo con capacidad de retener P y con la proporción de esos sitios en la matriz total del suelo.

El P es absorbido por las plantas como iones ortofosfato, principalmente $H_2PO_4^-$ y en menor cantidad HPO_4^{2-}. Hace tiempo se consideraba que el P que no fue utilizado por la planta se fijaba en el suelo en formas que ya no podían suplementar estos iones ortofosfato a la solución del suelo y, por lo tanto, este P ya no era disponible para absorción por las raíces de las plantas.

1 Centro de Investigación de Rothamsted, Harpenden, Herts., AL5 2JQ, Reino Unido. Correo electrónico: Johnny.johnston@bbsrc.ac.uk.
2 Universidad de Naresuan, Phitsanulok, Tailandia. Correo electrónico: keiths@nu.ac.th

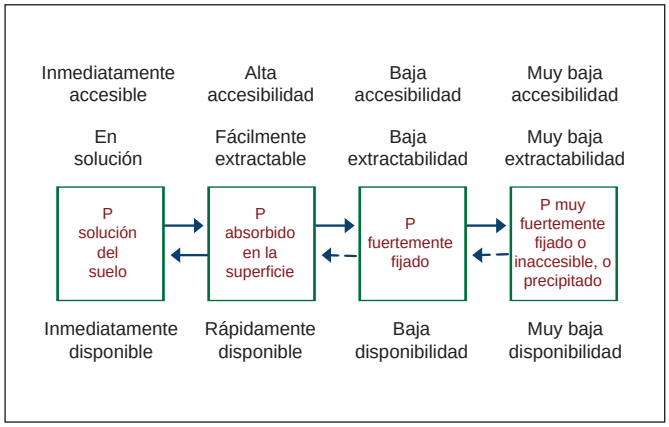

Figura 1. Representación esquemática de los cuatro compartimentos, extractabilidad y disponibilidad del P en el suelo.

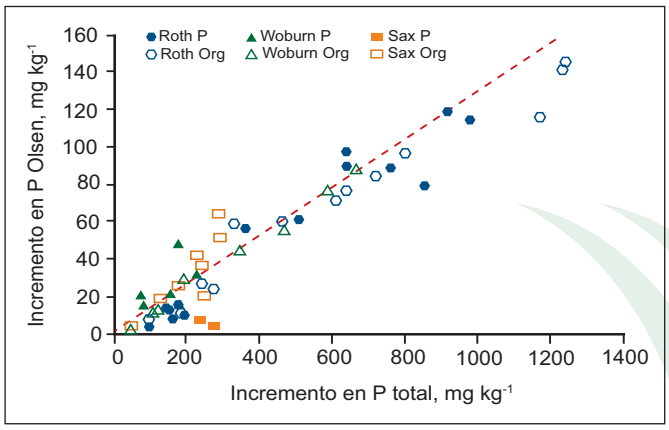

Figura 2. Relación entre el P total y el P extraído con Olsen (la línea punteada representa 13 % del P añadido y que fue extraído con el método Olsen).

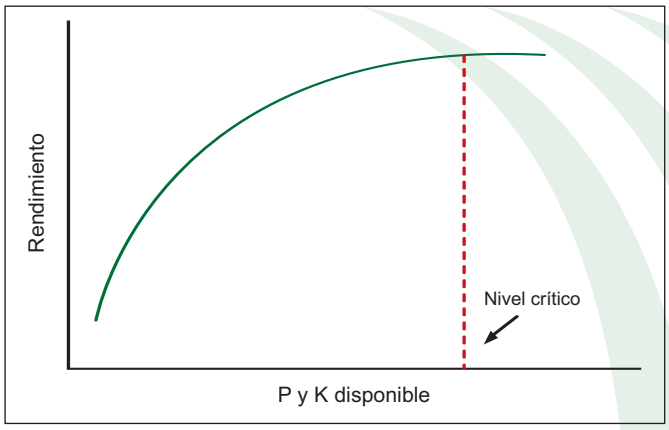

Figura 3. Cuánto P debe estar presente en el compartimento de fácil disponibilidad?

Sin embargo, en la década de 1950 empezaron a aparecer en experimentos de campo indicios que demostraban que cuando se habían acumulado reservas suficientemente altas de P en el suelo provenientes de pasadas aplicaciones de fertilizantes o residuos de corral, estas reservas del suelo pueden proveer de suficiente P para mejorar los rendimientos de los cultivos.

El aspecto más importante de la **Figura 1** es la transferencia reversible del P entre la solución del suelo, el compartimiento de P fácilmente disponible y el compartimiento de P menos disponible. Datos que soportan estas aseveraciones con experimentos de campo fueron publicados por Syers et al. (2008). El análisis de rutina del P disponible mide el P en la solución del suelo y el P que se encuentra en el compartimiento de P fácilmente disponible. El método de análisis de suelo utilizado no es importante. Lo esencial es que los datos obtenidos caractericen en forma precisa el suelo en términos de la respuesta del cultivo ya sea al P proveniente del suelo o al P aplicado como fertilizante.

La transferencia reversible de P entre los tres primeros compartimentos implica un equilibrio entre el P presente en los mismos. Datos que demuestran el incremento de P extraído con Olsen y el P total fueron obtenidos con varios experimentos a largo plazo conducidos en un suelo arcillo limoso en Rothamsted, un suelo franco arenoso en Woburn y un suelo franco arcillo arenoso en Saxmundham. En todos los tipos de suelo existe una relación lineal común entre el incremento en P extraído con Olsen y el incremento del P total (**Figura 2**).

En forma similar, un experimento conducido en Carolina del Norte, Estados Unidos, McCollum (1991) demostró que después de añadir P por 9 años en un total de 1 228 kg P ha^{-1}, solamente alrededor del 20 % fue extraído por el método de Mehlich 1.

Varias importantes preguntas prácticas se presentan al analizar este concepto del comportamiento de P del suelo y del P añadido con el fertilizante.

La primera pregunta es: Cuánto P debe estar presente en el compartimento de P fácilmente disponible para asegurar rendimiento óptimo?

Cuando el rendimiento del cultivo está relacionado con el P fácilmente disponible medido por el análisis de rutina, el rendimiento se incrementa rápidamente al inicio y luego más lentamente hasta que llega a una meseta (curva de respuesta asintótica, **Figura 3**). El nivel de P disponible en el suelo al cual se logra el rendimiento asintótico se puede considerar como el nivel crítico de P para ese cultivo. Por debajo del nivel crítico, la falta de P disponible resulta en pérdida de rendimiento. La aplicación de P para llegar a niveles más altos del nivel crítico se haría solamente para mantener un nivel no limitante de P en el suelo y no se espera una respuesta directa en rendimiento.

Ejemplos de curvas de respuesta de rendimiento con P extraído con Olsen de los experimentos de Rothamsted se presentan en la **Figura 4**. Aún cuando el rendimiento máximo de los tres cultivos [remolacha azucarera

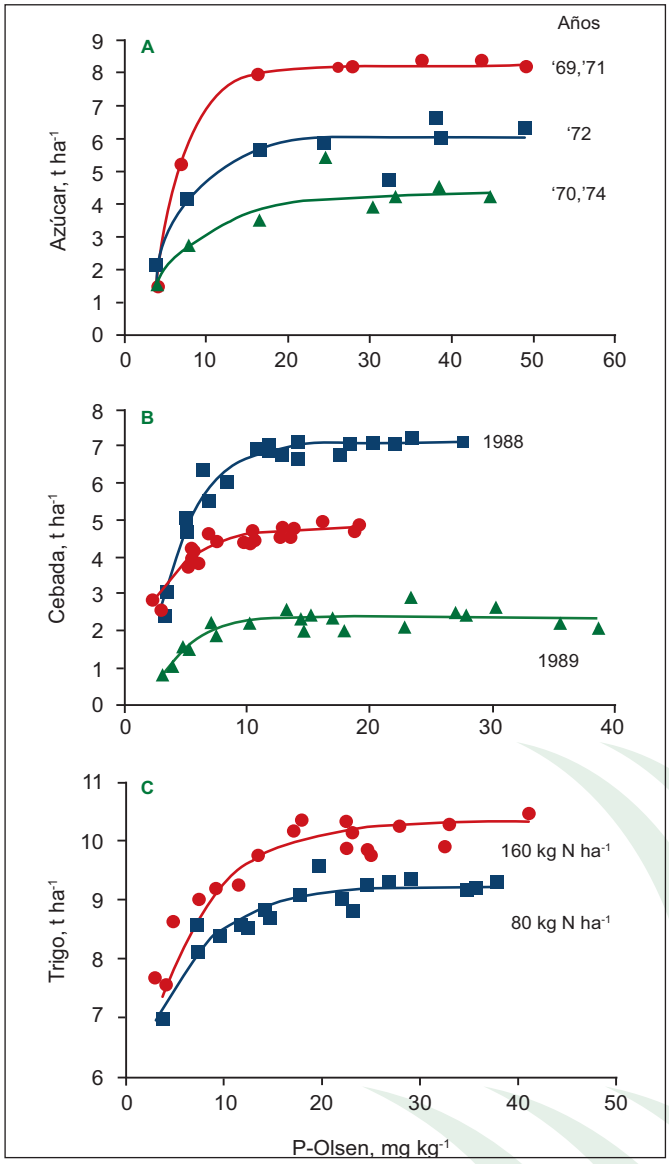

Figura 4. Ejemplo de los niveles críticos para varios cultivos.

(rendimiento de azúcar), cebada de primavera y trigo de invierno] fue diferente entre años debido a factores climáticos o a la cantidad de N aplicado, el nivel crítico varió muy poco. Para lograr el rendimiento asintótico más alto no se requiere una concentración más alta de P extraído con Olsen en los 25 cm superficiales del suelo.

La segunda pregunta es: Cuánto P se debe añadir para incrementar el P disponible al nivel crítico?

La respuesta a esta pregunta es específica para cada sitio. Por esta razón, es necesario trabajar mucho más en el asunto. El tipo y la densidad aparente del suelo, la profundidad de incorporación del P y la forma de muestreo influencian el resultado. Dos ejemplos muestran lo que se puede hacer. Un experimento que se inició en 1856 en un suelo franco arcillo limoso en la estación experimental de Rothamsted fue modificado para medir la cantidad de P requerida para incrementar el contenido de P-Olsen (Poulton and Johnston, comunicación personal). Los cinco tratamientos de P estudiados en el periodo 1856 a 1901 produjeron un rango estrecho de contenidos de P-Olsen en el suelo. El contenido de P en el suelo se incrementó entre 1986 y 1991 aplicando de 264 a 786 kg P ha^{-1}. El total de P aplicado y los promedios del balance de P y el contenido inicial y final de P-Olsen de los tratamientos evaluados se presenta en la **Tabla 1**. En los tratamientos en los cuales el contenido de P-Olsen inicial fue de 7 mg kg^{-1}, un balance positivo de 182 kg de P ha^{-1} incrementó el contenido de P en el suelo a 18 mg kg^{-1}. Se sembró cebada de primavera cada año (1986 a 1991).

De la curva de respuesta al P, la media del 95 % del rendimiento asintótico de grano fue 52.1 t ha^{-1} y el contenido de P-Olsen asociado con este punto fue 14

Tabla 1. Total de P añadido, balance de P 1986-1991 y P-Olsen en 1986 y 1991.

P añadido kg ha^{-1}	Balance de P[1] kg ha^{-1}	P-Olsen, mg kg^{-1} 1986	P-Olsen, mg kg^{-1} 1991
786	700	7	48
522	437	8	38
264	182	7	18

[1] **Cantidad de P aplicada sobre la remoción del cultivo.**

Tabla 2. Relación entre el P-Olsen, rendimiento máximo de trigo de invierno, P total removido en el grano más paja, P aplicado anualmente y porcentaje de recuperación del P aplicado estimado por el método del balance.

P-Olsen, mg kg^{-1}, en el 2004	9	14	23	31
Rendimiento de trigo, t ha^{-1}	7.1	7.8	7.9	7.9
P removido en el grano más paja, kg ha^{-1}	14	17	19	19
P aplicado anualmente, kg ha^{-1}	20	20	20	20
Porcentaje de recuperación del P aplicado*	70	85	95	95

* **Estimado por el método del balance.**

mg kg^{-1}. Es decir que, 182 kg de P ha^{-1} incorporados en los 25 cm superficiales del suelo en 6 años fueron suficientes para incrementar el contenido de P-Olsen sobre el nivel crítico. En el experimento conducido por McCollum (1991), se determinó el contenido de P-Melhich 1 en los 15 cm superficiales de un suelo franco arenoso al inicio del periodo de 9 años en los cuales se aplicó P. Al inicio del experimento el suelo estaba alrededor del nivel crítico para maíz (18 a 22 g $(m^3)^{-1}$ y mayor que el nivel crítico para soya. Se aplicó dosis de 0 a 1 120 kg P ha^{-1}. El incremento en P-Melhich 1 fue lineal y 10 kg P ha^{-1} incrementaron el contenido de P-Mehlich 1 en 1 g $(m^3)^{-1}$.

La tercera pregunta es: Cuánto P es necesario para mantener el nivel crítico?

Se continuó con el experimento en Rothamsted, pero no se aplicó P entre 1993 y 1999. En 1999 el contenido de P-Olsen estaba en un rango de 2 a 31 mg kg^{-1} de modo de que se podrían obtener respuestas en rendimiento al P. Desde el año 2002 al 2006 se cultivó trigo de invierno y se aplicaron 20 kg P ha^{-1} cada año para reemplazar el P con el grano y la paja en las parcelas que recibieron P de 1986 a 1991. Estas adiciones mantuvieron los niveles P-Olsen en el suelo.

Los datos de este experimento que el máximo rendimiento de grano se obtuvo cuando el contenido de P en el suelo estaba al nivel crítico y cuando este nivel se mantuvo reemplazado el P removido en la cosecha, de esta forma, la eficiencia de uso de las aplicaciones anuales de P era mayor al 90 % (**Tabla 2**).

La **Tabla 2** demuestra que el rendimiento máximo fue de 7.9 t ha^{-1} con un contenido de 31 mg de P-Olsen kg^{-1}. El

rendimiento se redujo en suelos con menos de 14 mg P kg^{-1}, lo que representa pérdida para el agricultor. El mantener el P-Olsen al nivel crítico reemplazando el P removido en la cosecha resulta en una eficiencia de uso de P de alrededor de 95 % de P aplicado anualmente. En forma similar, en el experimento descrito por McCollum (1991), el reemplazo de P removido en la cosecha mantuvo el nivel crítico de P-Mehlich 1 en el suelo.

Bibliografía

Johnston, A.E. and P.R. Poulton. 1977. Rothamsted Experimental Station Report for 1976, Part 2:53-85.

Johnston, A.E. 2001. Principles of crop nutrition for sustainable food production. Proceeding 459. York, UK, International Fertilizer Society. 39 pp.

McCollum, R.E. 1991. Agron. J. 83:77-85.

Syers, J.K., A.E. Jonhston, and D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. FAO, Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18. Rome, Italy. ★