

REVISIÓN

Índice de sorción como estimador de la capacidad de retención de fósforo en suelos

Pose Nélide N¹, Zamuner Ester C¹

¹Unidad Integrada INTA-FCA UNMdP. CC 276, B7620EMA. Balcarce, Argentina. Correo electrónico: pose.nelida@inta.gob.ar

Recibido: 14/7/14 Aceptado: 20/9/16

Resumen

Los sistemas de producción agrícola y ganadera, con cantidades importantes de ingreso de fósforo (P) al suelo, pueden causar pérdidas de P hacia aguas superficiales. Las investigaciones en los últimos años se han orientado a los mecanismos de la retención de P en diferentes tipos de suelos y a buscar índices o parámetros que se asocien a requerimientos de fertilización y contaminación del medio ambiente. Tradicionalmente, los parámetros de retención de P se han estudiado mediante isotermas de adsorción y estimación de capacidad buffer. Dado que la técnica empleada es compleja y demanda bastante tiempo como para análisis de rutina, en investigaciones más recientes se propone como alternativa el índice de sorción de P (PSI). El presente trabajo tuvo como objetivo realizar una revisión bibliográfica, y analizar y discutir las variaciones en la técnica de determinación y en las ecuaciones de cálculo utilizadas por diferentes investigadores para cuantificar el PSI. La bibliografía muestra diferencias en la metodología para realizar el índice de un solo punto (relación suelo:solución, cantidad de P agregado, temperatura y tiempo de equilibrio, etc.) y en la ecuación para calcular el PSI. Estas diferencias no han permitido estandarizar la metodología, dificultando la comparación de resultados

Palabras clave: retención, riesgo ambiental, parámetros de fósforo

Summary

Sorption Index to Estimate Phosphorus Retention Capacity in Soils

Agricultural and livestock production systems, with significant amounts of input of phosphorus (P) to the soil, can cause losses of P to surface waters. Research in recent years has been focused on the mechanisms of P retention in different soil types, and searched indexes or parameters associated with fertilization requirements and environmental pollution. Traditionally, P retention parameters have been studied by adsorption isotherms and buffer capacity estimation. Since the technique employed is complex and time consuming for routine analysis, in recent research P Sorption Index (PSI) is proposed as an alternative. This work carried out a literature review, and analyzed and discussed the techniques and calculations used by different researchers to quantify the PSI. The literature shows differences in the methodology for performing the single-point index (soil: solution ratio, amount of P added, temperature and time at the equilibrium, etc.), and in the equation to calculate the PSI. These differences have failed to standardize the methodology, making it difficult to compare results.

Keywords: retention, environmental risk, phosphorus parameters

Introducción

El manejo del fósforo (P) en la agricultura es crítico para lograr sistemas de producción sustentables (Sharpley, 2010). Sin embargo, el P proveniente de la agricultura ha sido reconocido como un poluyente de aguas superficiales (Sims y Kleinman, 2005). Muchas regiones del mundo con producción de cultivos y ganado altamente desarrollada, han sido forzadas a evaluar la degradación de la calidad del agua por pérdidas de P. Aun cuando en Argentina la producción agrícola es menos intensiva, prevenir la degradación de calidad de agua relacionada a la pérdida de P es importante, ya que revertir la situación una vez instalada es difícil política y prácticamente. Esta situación incrementa la necesidad de generar información que permita identificar áreas con riesgo de pérdida de P y ajustar recomendaciones en aplicaciones de P al suelo, para lograr un balance entre la protección del medio ambiente y la producción agrícola sustentable (Pierzynski *et al.*, 2005).

La habilidad de un suelo para liberar al medio el P retenido en sus coloides depende de la capacidad de sorción de P del suelo y de la cantidad de P sorbido. Tradicionalmente, la capacidad de retención de P de un suelo era evaluada mediante isothermas de sorción. Esta metodología es compleja y requiere de mucho tiempo. Bache y Williams (1971) desarrollaron índices de P (PSI) que permiten determinar rápidamente la capacidad de sorción del suelo y demostraron que se correlacionan con la capacidad máxima de sorción de P, estimada a partir de isothermas completas. Para las determinaciones de los PSI se han empleado numerosas modificaciones respecto a las propuestas por Bache y Williams (1971), tanto en estudios con fines agronómicos como ambientales. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es recopilar, analizar y discutir la información publicada de los procedimientos para determinar el PSI. Esta información será importante al momento de decidir la estandarización de la técnica, que es de interés ambiental, ya que junto con los valores de P disponible, puede utilizarse para predecir riesgo potencial de pérdida de P en suelos.

Índices de sorción de fósforo

Numerosas investigaciones concluyen que se requiere de alguna determinación o índice que evalúe el poder de retención de fosfatos del suelo (Quintero, 2002; Ige *et al.*, 2005; Allen y Mallarino, 2006). La proporción o cantidad de P agregado mediante una solución de concentración conocida que es retenida por el suelo, puede ser utilizada para determinar diferentes índices de sorción de P.

Entre ellos se encuentra el EPC, que representa la concentración de P en solución en el punto de equilibrio entre la adsorción y desorción; el EBC, que es la capacidad tampón o buffer; el Pmax (máxima absorción de P) y K (constante de energía retención) calculados a partir de la ecuación de Langmuir; el GSP (grado de saturación de fósforo) entre otros, han sido utilizados para caracterizar la capacidad de retención de P del suelo (Herlihy y McCarthy, 2006; Quintero, 2002; Burkitt *et al.*, 2002; Pautler y Sims, 2000; Zamuner y Culot, 1999). Como una alternativa a las isothermas completas, Bache y Williams (1971) propusieron calcular, a partir del índice de un solo punto, el índice de sorción de P que permite estimar la capacidad de sorción de P de un suelo.

Este índice se calcula como el P sorbido al agregar 1500 mg P kg⁻¹ de suelo o como el cociente entre P sorbido y el logaritmo decimal de la concentración de P en equilibrio. Independientemente del modo de cálculo, obtuvieron buena correlación con la capacidad de sorción de P determinada a partir de isothermas de sorción completas en suelos con una amplia variedad de propiedades físicas y químicas (Mozaffari y Sims, 1994; Zhou y Li, 2001). Además de los diferentes modos de calcular el PSI, se han empleado varias metodologías para realizar el índice de un solo punto, con diferencias que incluyen profundidad del muestreo, tamaño de partícula de suelo, relación suelo:solución; formas de preparar la solución de P (manteniendo o no la fuerza iónica constante y electrolito soporte utilizado), temperatura y tiempo de equilibrio entre el suelo y la solución de P y método de cuantificación de la concentración de P en la solución.

En el Cuadro 1 se describen las variaciones utilizadas por los investigadores. Puede observarse que la mayoría de los autores utilizan similares metodologías con respecto al modo de secado y tamaño de malla del tamiz. Las muestras de suelo deben ser secadas al aire (25 a 30 °C) y molidas para pasar un tamiz de 2 mm (Coale, 2009). Con respecto a la profundidad de muestreo, en la mayoría de los casos, fueron superficiales de hasta 20 cm, sin encontrar diferencias en la elección de la profundidad tanto para trabajos con fines ambientales (Sharpley, 1995; Axt y Walbridge, 1999; Pautler y Sims, 2000; Mc Dowell y Condrón, 2004; Börling *et al.*, 2004; Siddique y Robinson, 2004; Allen y Mallarino, 2006; Cassons *et al.*, 2006; Amarawansa e Indraratne, 2010) como en los que tuvieron fines agronómicos (Daly *et al.*, 2001; Ige *et al.*, 2005, 2007; Gutierrez Boem *et al.*, 2008; Rubio *et al.*, 2008; Pizzeghello, 2011). Sharpley (2010) plantea que, cuando se quiere relacionar las propiedades físicas y químicas con las posibilidades de

transporte P en el agua de escurrimiento superficial, no es posible definir una única profundidad de muestreo para todos los suelos. En cinco suelos de diferentes propiedades físicas y químicas, Sharpley (1995) encontró que la profundidad efectiva de interacción entre superficie del suelo y escurrimiento varió de 2 a 40 mm. Coale (2009) indica que, en suelos agrícolas, una profundidad de 20 mm podría definir la profundidad efectiva de la interacción entre el escurrimiento generado por las precipitaciones de intensidad moderada a alta (< 50 mm/h). Para suelos de textura de media a gruesa en pendientes más pronunciadas ($> 12\%$), que se someten a precipitaciones de alta intensidad (> 100 mm/h), el muestreo deberá realizarse a una profundidad de 40 mm.

Otro aspecto a tener en cuenta es el electrolito a utilizar en la preparación de la solución de KH_2PO_4 para obtener una solución con fuerza iónica similar a la de la solución del suelo. En el Cuadro 1 puede observarse que si bien se han utilizado CaCl_2 y KCl , la técnica descrita por Graetz y Nair (2009) utiliza agua desionizada. Muchos autores han utilizado CaCl_2 para estabilizar el pH y mantener la neutralidad electroquímica, pero Carreira y Lajtha (1997) mostraron que esto conduce a resultados erróneos en suelos neutros o alcalinos, por lo que recomiendan en esos casos el uso de KCl 0,01 M como electrolito soporte. De manera similar, Graetz y Nair (2009) recomiendan el uso de KCl 0,01 M para evitar la precipitación de Ca^{+2} en suelos neutros y alcalinos. Sin embargo en aguas de escurrimiento superficial, las concentraciones de Ca^{2+} disminuyen por efecto de dilución, por lo que en sedimentos es posible que una concentración 0,01 M de CaCl_2 pueda ser alta. Carrasco *et al.* (1993) indican que el electrolito soporte debe ser el más cercano a la composición de la solución del suelo y su concentración depende de la conductividad eléctrica del suelo estudiado.

En general, las determinaciones de P con fines agronómicos se realizan en muestras de suelo de los 15-20 cm superiores; sin embargo, es necesario tener en cuenta el uso del suelo y sistema de labranza. Un suelo bajo labranza convencional, tendrá el P distribuido uniformemente en la capa arable. Por el contrario, en un suelo bajo labranza reducida o labranza-cero, o que ha recibido fertilización fosfatada inorgánica o abono en superficie, el P se acumula en los primeros centímetros de suelo (Bertol *et al.*, 2007). Algunas investigaciones sostienen que la estratificación del P en el suelo produce también un cambio en el patrón de crecimiento de las raíces, por lo que la determinación de nutrientes superficiales es importante para la evaluación de

la fertilidad fosfatada en sistemas de labranza reducida (Beegle, 2005). Por otra parte, el uso de muestras superficiales (0-5 cm, 0-2,5 cm) solo mejora levemente la correlación entre el P perdido por erosión o escurrimiento superficial y el P del suelo determinado en muestras de 0-15 cm de profundidad (Sauer *et al.*, 2000; Torbert *et al.*, 2002). Teniendo en cuenta la falta de consistencia de los resultados obtenidos hasta el momento, Maguire *et al.* (2005) expresan que no está claro si vale la pena tomar muestras adicionales cuando se quiere evaluar parámetros ambientales, o si es suficiente usar solo las muestras de suelo tomadas con propósito de diagnóstico de fertilidad.

La relación suelo:solución también registró diferencias, aunque en todos los casos la relación fue igual o superior a 1:10. En trabajos con tiempo de contacto de 1 h (Quintero, 2002; Rubio *et al.*, 2008) la relación fue de 1:10 y en tiempos superiores a 18 h fueron entre 1:10; 1:12,5; 1:20, 1:25. En general, se utilizaron períodos de agitación superiores a 18 h y temperaturas constantes de 21 y 25 °C. Es importante tener en cuenta que si se utilizan una baja relación suelo:solución, un largo período de agitación y alta temperatura, se obtendrá más cantidad de P adsorbido. Sin embargo, no es posible recomendar una sola proporción suelo:solución o método de agitación aplicable en todos los casos. La relación suelo:solución está íntimamente relacionada con el tiempo de contacto.

Cuando la relación suelo:solución es inferior a 1:10, puede ocurrir que para cortos períodos de contacto (minutos u horas) no se obtenga un equilibrio, de manera que la concentración de P en solución será mayor que para aquellos casos donde la relación sea superior (Barrow y Shaw, 1979); este efecto es más marcado para concentraciones iniciales elevadas de P. Al aumentar el tiempo de contacto, estos efectos van disminuyendo, hasta que a tiempos suficientemente largos no hay diferencias. Para sitios con escurrimiento, que ya han experimentado algunas fuerzas dispersivas durante el desprendimiento y arrastre, debería utilizarse alta relación suelo:solución para minimizar la ruptura de las partículas durante la agitación, ya que si la relación es baja los agregados se romperían más rápido y pueden generarse sitios adicionales para la adsorción de P, resultando en una mayor cantidad de P adsorbido (Barrow y Shaw, 1979).

No se observó acuerdo por parte de los investigadores respecto al método para separar el suelo del sobrenadante luego de la agitación. En algunos casos se centrifugó a diferentes tiempos y velocidades, en otros se filtró o se realizaron ambos procedimientos. Las velocidades de cen-

Cuadro 1. Revisión de métodos de determinación de índice de sorción de P.

Variaciones en la técnica						
Referencias	Tipo de suelo y profundidad de muestreo	Relación suelo:solución	Agitación y temperatura	Centrifugación y filtración	Determinación de P	Formas de cálculo
Bache y Williams (1971)	42 suelos: 25 superficiales ácidos cultivados, 4 perfiles de 14 ácidos no cultivados y 3 calcáreos	(1:20) 5 g de suelo en 100 mL de KCl 0,02 M con 75 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄	18 h de agitación a 20 °C (+/- 1 °C)	Filtrado con whatman n° 41 y centrifugación a 5000 rpm por 30 min	Colorimetría Murphy y Riley (1962), se obtuvo Coeficiente de Variación de 6 %	x/log C (Lkg ⁻¹), x (mg kg ⁻¹) y C (mg L ⁻¹)
Mozaffari y Sims (1994)	18 suelos del interior de la Bahía de Delaware: profundidad de muestreo: 0-20 cm	(1:25) 1 g de suelo en 25 mL de CaCl ₂ 0,01 M con 60 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄	18 h de agitación a 20 +/- 1 °C	Filtrado con 0,45 µm	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	No específica forma de cálculo, solo indica unidades (L Kg ⁻¹)
Sharpley (1995)	Principales tipos de suelo de Oklahoma y norte de Texas: profundidad de muestreo: 0-10 cm. Muestras secadas al aire y molidas (< 2 mm)	(1:100) solución de KH ₂ PO ₄ con 1500 mg P kg ⁻¹ de suelo	40 h de agitación	Sin especificar	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	PSI = x/log C, donde x (mg kg ⁻¹), x/log C (Lkg ⁻¹) y C (mg L ⁻¹)
Indiali et al. (1995)	Horizonte superficial de tres suelos de Latium, Italia. Muestras secadas al aire y molidas (< 2 mm)	(1:10) 3 g de suelo en 30 mL de CaCl ₂ 0,01 M con 1500 mg P kg ⁻¹ suelo como KH ₂ PO ₄	24 h de agitación a 25 °C	Centrifugado y filtrado con 0,45 µm	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	SI = x/log C, donde x (mg kg ⁻¹) y C (mM)
Axt y Walbridge (1999)	Hapludoles: profundidad de muestreo (cm): 0-15/15-30/30-50/50-100	(1:12:5) 2 g de suelo en 25 mL de CaCl ₂ 0,01 M con 130 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄ (1625 mg P kg ⁻¹ suelo)	24 h a T desconocida (cita a Bache y Williams 1971)	Centrifugación 20 min a 0,314 g	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	PSI = x/log C, x (mg kg ⁻¹) y C (mM)
Robertson et al. (1999) libro de análisis de suelos	Sin especificar	(1:10) 3 g de suelo en 30 mL de KCl 0,01 M con 130 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄ (1500 mg P kg ⁻¹ suelo)	24 h de agitación a 25 °C	Centrifugación a 10000 RPM durante 30 min, filtrar si es necesario	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	PSI = x/log C, no específica
Pote et al. (1999)	Hapludoles y paleudoles: profundidad de muestreo: sin especificar	(1:25) 1 g de suelo en 25 mL de CaCl ₂ 0,01 M con 60 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄ (1500 mg P kg ⁻¹ suelo)	18 h de agitación sin especificar temperatura	Centrifugación a 27000 g durante 10 min a 4 °C y filtrado por 0,45 mm	Analizado por ICP-AES	PSI = x/log C, x (mg kg ⁻¹) y C (mg L ⁻¹)
Pautler y Sims (2000)	Ultisoles, Alfisoles e Inceptisoles: profundidad de muestreo: 0-20 cm Muestras secadas y molidas (< 2mm)	0,4 g de suelo en 40 mL de solución con 15 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄ (1500 mg P kg ⁻¹ suelo)	24 h a T desconocida (cita a Bache y Williams 1971)	Centrifugación (sin especificar velocidad) y filtrado por	Analizado por ICP-AES	PSI = x (mg kg ⁻¹)

Cuadro 1. Revisión de métodos de determinación de índice de sorción de P. (Continuación).

Variaciones en la técnica						
Referencias	Tipo de suelo y profundidad de muestreo	Relación suelo:solución	Agitación y temperatura	Centrifugación y filtración	Determinación de P	Formas de cálculo
Dalyet al. (2001)	11 asociaciones de suelos de Irlanda: profundidad de muestreo: 10 cm. Muestras secadas y molidas (< 2 mm)	0,4 g de suelo en CaCl ₂ 0,01M (1500 mg P kg ⁻¹ de suelo)	24 h de agitación	Sin especificar	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	PSct = x (mg L ⁻¹) PSct: capacidad de sorción de P total
Quintero et al. (1996), Quintero (2002)	Molsoles. Muestras de suelo superficiales y subsuperficiales tamizadas por < 1mm	(1:10) 2,5 g de suelo en 25 mL de CaCl ₂ 0,1 M con 60 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄	1 h de agitación a 21 °C	Se filtró	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	PR60 = x (mg kg ⁻¹)
Mc Dowell y Condron (2004)	44 suelos de Nueva Zelanda: Profundidad de muestreo: 0-7,5 cm. Muestras secadas y molidas (< 2mm)	(1:20) adicionando 1500 mg P Kg ⁻¹ de KH ₂ PO ₄ (en CaCl ₂ 0,01 M)	24 h de agitación	Filtrado con whatman n° 42	Watanabe y Olsen (1965)	PSI = x/log C, x (mg kg ⁻¹) y C (mg L ⁻¹)
Börlinget al. (2004)	Hapludoles: prof. de muestreo: 0-20 cm. Muestras secadas y molidas (< 2mm)	20 mL de CaCl ₂ 0,01 M (600 mg de P kg ⁻¹ suelo)	20 hs de equilibrado a 21 °C	Centrifugación a 3000 RPM durante 10 min	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	PSI = x/log C, PSI y x en (mmoles kg ⁻¹) y C en (mM)
Cassons et al. (2006)	47 suelos de Alberta, Canadá: profundidad de muestreo: 0-20 cm. Muestras secadas al aire y molidas (< 2 mm)	(1:20) 1 g de suelo en 20 mL de KCl 0,01 M con 75 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄	18 h de agitación a 20 °C	Centrifugación a 27000 g durante 10 min a 4 °C y filtrado por 0,45 µm	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	PSI = x (mg kg ⁻¹)
Ige et al. (2005, 2007)	115 suelos de Manitoba, Canadá: prof. de muestreo: 0-15 cm. Muestras secadas al aire y molidas (< 2 mm)	(1:20) 1 g de suelo en 20 mL de CaCl ₂ 0,01 M con 75 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄	24 h de agitación no específica. Temperatura de incubación	Centrifugación a 10000 RPM (7000 g) durante 10 min, filtrado por 0,45 mm	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	PSI = x en (mg kg ⁻¹)
Gutiérrez Boem et al. (2008)	Argiudoles: prof. de muestreo: 0-5 cm. Muestras secadas al aire y molidas (< 2 mm)	(1:20) 1 g de suelo en 20 mL de 75 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄	18 h de agitación a 25°C	Centrifugación y filtrado	Colorimetría Kuo (1996)	PSI = x/log C, x (mg kg ⁻¹) y C (mg L ⁻¹)

Cuadro 1. Revisión de métodos de determinación de índice de sorción de P. (Continuación).

Variaciones en la técnica						
Referencias	Tipo de suelo y profundidad de muestreo	Relación suelo:solución	Agitación y temperatura	Centrifugación y filtración	Determinación de P	Formas de cálculo
Rubio et al. (2008)	Arguidoles, haplustoles y paleudoles; profundidad de muestreo: 0-20 cm. Muestras secadas al aire y molidas (< 2 mm)	(1:10) 2,5 g de suelo en 25 mL de CaCl ₂ 0,1 M con 60 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄	1 h de agitación a 25 °C (200 excursiones 1 h de agitación por min)	Sin especificar (cita a Quintero et al., 1999)	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	PR11 = x/log C, no específica unidades (cita a Quintero et al., 1999)
Kovar y Pierzynski (2009)	Muestras secadas y molidas (< 2mm)	(1:20) 1 g de suelo en 20 mL de CaCl ₂ 0,1 M con 1500 mg P kg ⁻¹ suelo	18 h de agitación a 25 °C	Sin especificar (cita a Sims, 2000)	Colorimetría Murphy y Riley (1962)	PR1 ₂ = x/log C, no específica unidades (cita a Sims, 2000)
Amarawansha e Indraratne (2010)	Suelos cultivados de Sri Lanka: prof. de muestreo: no específica. Muestras secadas al aire y molidas (< 2 mm)	(1:10) 2 g de suelo en 20 mL de KCl 0,001 M con 1500 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄	18 h de agitación a 25 °C +/- 2 °C	Centrifugación a 2000 RPM, 30 min y filtrado por filtro milporos de 0,45 µm	Analizado por ICP-AES	PSI = x/log C en (L kg ⁻¹), x (mg kg ⁻¹) y C (mg L ⁻¹)
Pizzeghello (2011)	Suelos alcalinos del Valle de Po, Italia: prof. de muestreo: 20 cm. Muestras secadas al aire y molidas (< 2 mm)	(1:10) 2 g de suelo en 20 mL de KCl 0,01 M con 1500 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄ (1:10) 2 g de suelo en 20 mL de KCl 0,01 M con 600 mg de P L ⁻¹ como KH ₂ PO ₄	24 h de agitación a temperatura ambiente a 21 °C	Filtradas por Whatman n°1 Centrifugación a 3000 RPM durante 10 min	Colorimetría usando método de verde de malaquita (Ohno y Zibilske, 1991)	P ₁₅₀ = x, no específica unidades (cita Ige et al., 2005) PSI ₁ = x/log C, x (mg kg ⁻¹) y C (mM)

trifugación fueron inferiores a las 10000 RPM y los tiempos de centrifugado no superaron los 30 min. Si bien en esta etapa del análisis no se afecta el proceso de adsorción, se afectaría la cuantificación colorimétrica de P por turbidez. La metodología empleada en la cuantificación del P en la solución fue principalmente la colorimetría de Murphy y Riley (1962), en algunos trabajos se analizó por ICP (Pote *et al.*, 1999; Pautler y Sims, 2000; Graetz y Nair, 2009). El procedimiento colorimétrico de Murphy y Riley (1962) determina principalmente ortofosfatos, aunque algunos compuestos orgánicos pueden ser hidrolizados por los reactivos ácidos de la técnica (Dick y Tabatabai, 1977). En el método de ICP las moléculas se someten a vaporización, disociación e ionización, por lo que puede medir además otras formas de P (Nathan *et al.*, 2002), de manera que ICP determina más P en el suelo (Mallarino, 2003). Esto indicaría que cuando se determina P con ICP se estaría subestimando la retención.

Finalmente, las formas de cálculo del PSI en la literatura variaron tanto en la ecuación como en las unidades utilizadas. Se utilizaron dos ecuaciones:

$$\text{Ecuación 1} \quad \text{PSI} = \frac{x}{\log C} \quad \text{Unidades: mg P kg}^{-1}, \text{ L kg}^{-1}, \text{ mmoles kg}^{-1}$$

$$\text{Ecuación 2} \quad \text{PSI} = x \quad \text{Unidades: mg P kg}^{-1}$$

donde:

x : P adsorbido por la fase sólida (mg P kg⁻¹) o (mmoles kg⁻¹)

C : P en equilibrio en la solución (mg P L⁻¹) o (mM)

Un criterio para simplificar las unidades del PSI es considerar que el logaritmo decimal de la concentración de P no tiene unidades. Podemos realizar una analogía con el pH que se define como el valor absoluto del logaritmo decimal negativo de la concentración molar de protones y es adimensional (Chang, 2002). De esta manera el PSI puede adquirir unidades de mg P kg⁻¹.

Bache y Williams (1971) estudiaron 25 suelos ácidos superficiales de diferentes materiales parentales del noreste de Escocia, 14 muestras de cuatro perfiles de suelos ácidos no cultivados y tres de suelos calcáreos cultivados (42 suelos en total). Determinaron un amplio rango de valores de PSI, entre 46 a 638 L kg⁻¹.

Mozaffari y Sims (1994) tomaron muestras de suelos cultivados y de los bordes de los mismos, tanto superficiales como subsuperficiales, para los cuales obtuvieron valores de PSI promedio de 242,1 L kg⁻¹ y 165,1 L kg⁻¹ respectivamente. Estos valores fueron estimados a partir

de la ecuación que relaciona el PSI con la capacidad máxima de sorción estimada con la isoterma de Langmuir.

Sharpley (1995), para los primeros 10 cm de profundidad, determinó valores de PSI entre 58 a 210 unidades.

Daly *et al.* (2001) estudiaron 11 suelos de Irlanda y obtuvieron valores de PSI entre 4 y 19 mg L⁻¹.

Quintero (2002) concluye que la capacidad de retención de fósforo de los suelos de Argentina evaluada utilizando PSI es baja a muy baja, siendo la adsorción máxima inferior a 500 mg kg⁻¹. La máxima capacidad de retención se observa en los andosoles de México, que pueden adsorber más de 1000 mg kg⁻¹ de P, y en el rango medio a alto se encuentran los lato-soles de Brasil. Estas conclusiones se alcanzaron utilizando la Ecuación 2, y con una técnica que utiliza 1 h de agitación. Ige *et al.* (2005) presentaron rangos de PSI de entre 88 y 891 mg kg⁻¹ para suelos con una gran variedad de propiedades físicas y químicas.

Gutiérrez Boem *et al.* (2008) registraron para molisoles de la pampa ondulada valores de PSI de 329 a 404 mg kg⁻¹, sin diferencias significativas entre suelos con y sin labranza conservacionista. Por otro lado, Rubio *et al.* (2008) obtuvieron valores de PSI para suelos agrícolas de la región pampeana. Para el PSI denominado PRI I (Cuadro 1), el valor promedio fue 251 unidades con un coeficiente de variación de 6,8 % y para el PRI II (Cuadro 1), un promedio de 310 unidades con un coeficiente de variación del 12,6 %. Concluyen que los mayores valores de PRI II son debidos al mayor tiempo de contacto con la matriz del suelo. Es importante observar que en ambos trabajos se adicionó la misma cantidad de P al suelo, la cual supera la capacidad de sorción máxima para molisoles de Argentina (Quintero, 2002). Sin embargo, en el trabajo Gutiérrez Boem *et al.* (2008) se usó solución de P sin mantener la fuerza iónica constante (en agua destilada), y en el trabajo de Rubio *et al.* (2008) se mantuvo la fuerza iónica constante (P en CaCl₂ 0.1 M) utilizando la misma ecuación de cálculo (Ecuación 2). Si tenemos en cuenta que se trata del mismo tipo de suelos, con agricultura y en la misma zona, las diferencias observadas en los valores obtenidos pueden deberse a las modificaciones en la técnica. Esto nos sugiere que no es posible comparar los datos de ambas investigaciones de modo de evaluar la capacidad de retención de P en los suelos mencionados. Además, estas diferencias pueden confundir a quienes pretendan reproducir la técnica.

En algunos de los trabajos estudiados se adicionó menores cantidades de P al suelo. Sin embargo no se presentaron datos numéricos que pudieran asegurar que el P adicionado fuera suficiente para superar la capacidad de retención máxima de esos suelos.

La revisión bibliográfica realizada pone de manifiesto que el PSI es una herramienta eficaz para evaluar la capacidad de retención de P, tanto en investigaciones con fines agronómicos como con fines ambientales. Sin embargo, para que el PSI pueda incluirse entre los análisis de suelo destinados a determinar las características de retención de P del suelo, es necesario que la técnica sea repetible y esté respaldada por un análisis estadístico que preserve la confiabilidad de la misma. De esta manera podremos avanzar para obtener una metodología que logre separar los suelos según características de retención. Si bien Bache y Williams (1971) indican que las técnicas que emplearon para realizar los PSI presentaron coeficientes de variación inferiores al 6 %, no hay registro por parte de otros investigadores acerca de la variabilidad ni de la reproducibilidad de las técnicas empleadas.

Por lo tanto, de la información recopilada también surge que los estudios de validación de la determinación del PSI son escasos. Teniendo en cuenta que se proyecta utilizar el PSI en estudios regionales, la determinación de la variabilidad del PSI cuando la determinación es realizada por un mismo analista es de fundamental importancia. Pose *et al.* (2013) realizaron un ensayo de laboratorio destinado a determinar la repetitividad del procedimiento del PII descripto por Rubio *et al.* (2008), de lo que pudieron concluir que el análisis de laboratorio con dos lecturas en cuatro muestras presenta buena repetitividad.

Consideraciones finales

De la revisión bibliográfica realizada surge que el PSI es un índice sencillo y eficaz para estimar la capacidad de retención de P en el suelo, en estudios agronómicos y ambientales. De la observación de los valores numéricos del PSI presentados surge que no se ha establecido aún entre los investigadores una convención para estandarizar la metodología que emplean. Esto dificulta la utilización de métodos comparables que puedan mejorar la comunicación de los resultados. Por otro lado, sería valioso que en los trabajos de investigación, cuando se utiliza una técnica aún no estandarizada, los datos estuvieran acompañados de análisis estadísticos que evaluaran la capacidad del método para detectar diferencias mínimas significativas entre tratamientos.

Bibliografía

- Allen BL, Mallarino AP. 2006. Relationships between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer or manure application. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 454 - 463.
- Amarawansa EAGS, Indraratne SP. 2010. Degree of phosphorus saturation in intensively cultivated soils in Sri Lanka. *Tropical Agricultural Research*, 22(1): 113 - 119.
- Axt JR, Walbridge MR. 1999. Phosphate Removal Capacity of Palustrine Forested Wetlands and Adjacent Uplands in Virginia. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 1019 - 1031.
- Bache BW, Williams EG. 1971. A phosphate sorption index for soils. *Soil Science Journal*, 22: 289 - 301.
- Barrow NJ, Shaw TC. 1979. Effects of solution : Soil ratio and vigour of shaking on the rate of phosphate adsorption by soil. *Journal of Soil Science*, 30: 67 - 76.
- Beegle D. 2005. Assessing soil phosphorus for crop production by soil testing. En: Sims D, Sharpley AN. [Eds.]. *Phosphorus : agriculture and the environment*. Madison : American Society of Agronomy. (Agronomy ; 46). pp. 123 - 143.
- Bertol I, Engel FL, Mafra AL, Bertol OJ, Ritter SR. 2007. Phosphorus, potassium, and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. *Soil and Tillage Research*, 94: 142 - 150.
- Börling K, Otabong E, Barberis E. 2004. Soil Variables for Predicting Potential Phosphorus Release in Swedish Noncalcareous. *Journal of Environmental Quality*, 33: 99 - 106.
- Burkitt LL, Moody PW, Gourley CJP, Hannah MC. 2002. A simple phosphorus buffering index for Australian soils. *Soil Research*, 40(3): 497 - 513.
- Carrasco MA, Tapia OX, Opazo JE, Benavides ZC. 1993. Cinética de retención de fósforo en suelos agrícolas de origen aluvial y volcánico. *Agricultura Técnica de Chile*, 53(4): 331 - 339.
- Carreira JA, Lajtha K. 1997. Factors affecting phosphate sorption along a Mediterranean, dolomitic soil and vegetation chronosequence. *European Journal of Soil Science*, 48: 139 - 149.
- Cassons JP, Bennett DR, Nolan SC, Olson BM, Ontkian GR. 2006. Degree of phosphorus saturation thresholds in manure-amended soils of Alberta. *Journal of Environmental Quality*, 35: 2212 - 2221.
- Chang R. 2002. Química. 7a. ed. México : Mc Graw-Hill. 1004p.
- Coale FJ. 2009. Soil Sample Collection, Handling, Preparation, and Storage. En: Kovar JL, Pierzynski GM. [Eds.]. *Methods of Phosphorus Analysis : for soils, sediments, residuals, and waters*. Virginia : Virginia Tech University. (Southern Cooperative Series Bulletin: 408). pp. 6 - 8.
- Daly K, Jeffrey D, Tunney DH. 2001. The effect of soil type on phosphorus sorption capacity and desorption dynamic in Irish grassland soils. *Soil Use Manage*, 17: 12 - 20.
- Dick WA, Tabatabai MA. 1977. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic compounds. *Journal of Environmental Quality*, 6: 82 - 85.
- Graetz DA, Nair VD. 2009. Phosphorus Sorption Isotherm Determination. En: Kovar JL, Pierzynski GM. [Eds.]. *Methods of Phosphorus Analysis : for soils, sediments, residuals, and waters*. Virginia : Virginia Tech University. (Southern Cooperative Series Bulletin: 408). pp. 33 - 37.

- Gutierrez Boem FH, Alvarez K, Cabello MJ, Fernández PL. 2008. Phosphorus retention on surface of tilled and no-tilled soils. *Soil Science Society of American Journal*, 72: 1158 - 1162.
- Herlihy M, McCarthy J. 2006. Association of soil-test phosphorus with phosphorus fractions and adsorption characteristics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 75(1-3): 79 - 90.
- Ige DV, Akinremi OO, Flaten DN. 2007. Direct and indirect effects of soil properties on phosphorus retention capacity. *Soil Science Society of American Journal*, 71: 95 - 100.
- Ige DV, Akinremi OO, Flaten DN, Ajiboye B, Kashem MA. 2005. Phosphorus sorption capacity of alkaline Manitoba soils and its relationship to soil properties. *Canadian Journal of Soil Science*, 85: 417 - 426.
- Indiati R, Sharpley AN, Izza C, Figliolia A, Felici B, Sequi P. 1995. Soil phosphorus sorption and availability as a function of high phosphorus fertilizer additions. *Communications in Soil Science Plant Analysis*, 26(11-12): 1863 - 1872.
- Kovar JL, Pierzynski GM. 2009. Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters [En línea]. 2a ed. Blacksburg, VA: Virginia Tech University. 122p. (Southern Cooperative Series Bulletin ; 408). Consultado 18 octubre 2016. Disponible en: <http://cite.seerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.606.5702&rep=rep1&type=pdf>.
- Kuo S. 1996. Phosphorus. En: Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, Summer ME. [Eds.]. *Methods of Soil Analysis*: Part 3. Chemical methods. Madison: Soil Science Society of America. pp. 869 - 919.
- Maguire RO, Chardon WJ, Simard RR. 2005. Assessing potential environmental impacts of soil phosphorus by soil testing. En: Sims D, Sharpley AN. [Eds.]. *Phosphorus: agriculture and the environment*. Madison: American Society of Agronomy. (Agronomy ; 46). pp. 145 - 180.
- Mallarino A. 2003. Field Calibration for Corn of the Mehlich-3 Soil Phosphorus Test with Colorimetric and Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy Determination Methods. *Soil Science Society of American Journal*, 67: 1928 - 1934.
- Mc Dowell RW, Condon LM. 2004. Phosphorus loss from New Zealand grassland soils. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 47: 137 - 145.
- Mozaffari PM, Sims JT. 1994. Phosphorus availability and sorption in an Atlantic Coastal Plain watershed dominated by intensive, animal-based agriculture. *Soil Science*, 157: 97 - 107.
- Murphy J, Riley JP. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31 - 36.
- Nathan MV, Mallarino A, Eliason R, Miller R. 2002. ICP vs. colorimetric determination of Mehlich III extractable phosphorus effect of residual fertilizer phosphorus in some Iowa soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33: 2432.
- Ohno T, Zibilske LM. 1991. Determination of low concentrations of phosphorus in soil extracts using malachite green. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 892 - 895.
- Pautler MC, Sims TJ. 2000. Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus and phosphorus saturation in Delaware soils. *Soil Science Society of American Journal*, 64: 765 - 773.
- Pierzynski GM, Richard W, McDowell RW, Sims JT. 2005. Chemistry, Cycling, and Potential Movement of Inorganic Phosphorus in soils. En: Sims D, Sharpley AN. [Eds.]. *Phosphorus: agriculture and the environment*. Madison: American Society of Agronomy. (Agronomy ; 46). pp. 53 - 86.
- Pizzeghello D. 2011. Phosphorus cycle in agricultural soils Phosphorus forms and P-sorption properties after long-term mineral and manure applications [Tesis de doctorado]. Padua: University of Padova. 118 p.
- Pose NN, Cendoya MG, Zamuner EC. 2013. Análisis estadístico de repetitividad del Índice de Sorción de Fósforo (ISP). En: IV Encuentro Iberoamericano de Biometría y XVIII Reunión Científica del GAB: 25 - 27 setiembre, 2013; Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. La Plata: Grupo Argentino de Biometría. pp. 53 - 55.
- Pote DH, Daniel TC, Nichols DJ, Sharpley AN, Moore PA, Miller DM, Edwards DR. 1999. Relationship between phosphorus levels in tree ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *Journal of Environmental Quality*, 28: 170 - 175.
- Quintero CE. 2002. Dosificación del Fósforo según tipos de suelos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (16): 8 - 10.
- Quintero CE, Boschetti NG, Benavidez RA. 1999. Phosphorus Retention in Some Soils of the Argentinian Mesopotamia. *Communications in soil science and plant analysis*, 30(9-10): 1449 - 1461.
- Quintero CE, Boschetti NG, Benavidez RA. 1996. Estimación de la capacidad máxima de adsorción de fosfatos en suelos de Entre Ríos (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 14(2): 79 - 82.
- Robertson GP, Coleman DC, Bledsoe CS, Sollins P. 1999. Standard soil methods for long-term ecological research. New York: Oxford University Press. 480p.
- Rubio G, Cabello MJ, Gutiérrez Boem FH. 2008. Estimating Available Soil Phosphorus Increases after Phosphorus Additions in Mollisols. *Soil Science Society of American Journal*, 72: 1721 - 1727.
- Sauer TJ, Daniel TC, Nichols DJ, West CP, Moore PA, Wheeler GL. 2000. Runoff water quality from poultry litter-treated pasture and forest sites. *Journal of Environmental Quality*, 29(2): 515 - 521.
- Sharpley AN. 2010. Manejo de fósforo en sistemas de producción agrícola ambientalmente sustentables: desafíos y oportunidades. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 46: 1 - 5.
- Sharpley AN. 1995. Dependence of runoff phosphorus on soil phosphorus. *Journal of Environmental Quality*, 24: 920 - 926.
- Siddique MT, Robinson JS. 2004. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*, 2: 1114 - 1121.
- Sims JT. 2000. A phosphorus sorption index. En: Pierzynski GM. [Ed.] *Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals and waters*. Manhattan, Kansas: SAAESD. (Southern Cooperative Series Bulletin ; 396). pp. 22 - 23.
- Sims JT, Kleinman PJA. 2005. Managing agricultural phosphorus for Environmental protection. En: Sims D, Sharpley AN. [Eds.]. *Phosphorus: agriculture and the environment*. Madison: American Society of Agronomy. (Agronomy ; 46). pp. 1021 - 1068.
- Torbert HA, Daniel TC, Lemunyon JL, Jones RM. 2002. Relationship of soil test phosphorus and sampling depth to runoff phosphorus in calcareous and noncalcareous soils. *Journal of Environmental Quality*, 31(4): 1380 - 1387.
- Watanabe FS, Olsen SR. 1965. Test of ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, 29(6): 677 - 678.
- Zamuner Ey, Culot JP. 1999. Effect of fertilization in phosphorus sorption capacity. *Investigación Agraria Producción y Protección Vegetales*, 14(1-2): 107 - 116.
- Zhou M, Li Y. 2001. Phosphorus sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the Southern Everglades and adjacent farmlands. *Soil Science Society of American Journal*, 5: 1404 - 1412.