

EVALUACIÓN EN CÁMARA DE CRECIMIENTO DE TRES MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE FÓSFORO ASIMILABLE EN SUELOS NO CALCÁREOS

MARÍA L. FERNÁNDEZ MARCOS

Departamento de Edafología y Química Agrícola. Escuela Politécnica Superior. 27002 Lugo

Abstract: Available phosphorus was estimated in 140 non-calcareous mine soil samples by using chemical extractants Olsen, Bray 2 and Mehlich 3 (M3). In 28 of these samples pot experiments were conducted, growing maize under controlled conditions. Weak correlations were found between P estimated by different methods. Olsen and Bray 2 methods seem to overestimate available P in soils containing non-crystalline materials; their use to predict plant response requires the knowledge of a phosphorus sorption index. The M3 method, highly correlated to plant P uptake and dry matter yield, seems the most convenient to estimate available P in a wide range of non-calcareous soils.

Key words: available phosphorus, P testing, Mehlich 3 extractant, phosphorus sorption.

Resumen: Se estima el fósforo asimilable en 140 muestras de suelos de mina no calcáreos mediante extracción con los reactivos químicos Olsen, "Bray 2" y Mehlich 3 (M3). En 28 de estas muestras se llevan a cabo ensayos en maceta, en condiciones controladas, de crecimiento de maíz. Las correlaciones entre fósforo extraído por los distintos métodos son débiles. Los métodos Olsen y Bray 2 parecen sobreestimar el fósforo asimilable en suelos ricos en componentes no cristalinos; su utilización para predecir la respuesta vegetal requiere el conocimiento de un índice de adsorción de fósforo. El método M3, altamente correlacionado con la extracción de fósforo por la planta y con el rendimiento vegetal, parece el más adecuado para la estimación de fósforo asimilable en una amplia gama de suelos no calcáreos.

Palabras clave: fósforo asimilable, análisis de fósforo, reactivo Mehlich 3, adsorción de fósforo.

INTRODUCCIÓN

Las recomendaciones de fertilización fosfatada se hacen habitualmente en función del nivel de fósforo asimilable en el suelo, estimado en el laboratorio. De los métodos utilizados para la determinación de fósforo asimilable se encuentran entre los más comunes los que utilizan un reactivo químico capaz de extraer fósforo de la reserva de fósforo lábil del

suelo. Un buen método de evaluación de un nutriente asimilable debe presentar una buena correlación con el crecimiento vegetal y con la absorción del nutriente por la planta bajo ciertas condiciones edáficas y climáticas. Diferentes métodos de extracción química han sido desarrollados para la determinación de fósforo asimilable en distintos tipos de suelos o en áreas geográficas particulares. Con frecuencia algunos de estos métodos son adoptados poste-

riormente por laboratorios de análisis de áreas diferentes o para analizar otros tipos de suelos, en ocasiones sin comprobar suficientemente su adecuación a la nueva situación (Leal et al., 1994; Mamo et al., 1996; Holford, 1997).

Si bien el fósforo extraído por distintos extractantes químicos suele designarse como "fósforo asimilable", diferentes reactivos extraen cantidades diferentes de fósforo y los niveles críticos varían de un método a otro. Estos valores de fósforo extraído proporcionan una estimación de la cantidad de fósforo que un suelo puede suministrar a las plantas, pero no son una medida absoluta del fósforo disponible. Su utilidad está en función de su correlación con la respuesta de las plantas.

El poder extractante de distintos reactivos está influenciado por diversas propiedades del suelo, en particular aquellas que determinan su capacidad de adsorción de fósforo (Handreck, 1991; Cajuste et al., 1992). Así se encuentran a menudo buenas correlaciones entre fósforo determinado mediante distintos extractantes en suelos con propiedades físico-químicas similares, pero las correlaciones son más débiles a medida que aumenta la heterogeneidad de los suelos estudiados (Michaelson et al., 1987; Tran et al., 1990; Buondonno et al., 1992; Cajuste et al., 1992; Leal et al., 1994). La interpretación de los datos de fósforo extraído debe, por tanto, tener en cuenta el tipo de suelo, en particular su capacidad de adsorción de fósforo (Giroux y Tran, 1985; Handreck, 1991 y 1996).

En los últimos años, y con frecuencia creciente, se propone la utilización de los ensayos de fósforo asimilable en suelos con fines ambientales. Esta utilización tendría como propósito prevenir problemas derivados de la sobrefertilización y predecir el riesgo de exportación de fósforo desde los suelos hacia medios acuáticos (Breeuwsma y Silva, 1992; Gartley y Sims, 1994; Sharpley et al., 1996; Hylander et al., 1996; Cai et al., 1997). La adsorción de fósforo por el suelo juega un papel determinante de su movilidad y, por tanto, del riesgo de exportación de fósforo (Breeuwsma y Silva, 1992).

La mayoría de los laboratorios europeos de análisis de suelos emplean el método Olsen (Olsen y Sommers, 1982) como método oficial de determinación de fósforo asimilable (Buondonno et al., 1992). En España el método Olsen es el establecido como oficial por el Ministerio de Agricultura (1986). En Galicia el método Olsen es utilizado como procedimiento de rutina por los laboratorios de análisis de suelos, pese al carácter ácido de los suelos gallegos y a que el método Olsen fue desarrollado originalmente para suelos calcáreos.

Los métodos Bray 1 y Bray 2 (Jackson, 1964), que utilizan extractantes ácidos, se utilizan a menudo en la determinación de fósforo asimilable en suelos ácidos (Holford, 1997).

Los extractantes multi-elemento, también llamados extractantes universales, capaces de extraer simultáneamente un elevado número de macro- y micronutrientes, son utilizados de forma creciente en los últimos años (Raij, 1994). Su principal ventaja es un considerable ahorro de tiempo y de dinero en la realización de los análisis. Entre los extractantes universales destaca el reactivo Mehlich 3 (Mehlich, 1984), capaz de extraer P, K, Ca, Mg, Na y micronutrientes. Como ventaja adicional, el Al determinado en el extracto Mehlich 3 proporciona una estimación del aluminio no cristalino (Tran et al., 1990; Fernández Marcos et al., 1997). El reactivo Mehlich 3 se utiliza ampliamente en Estados Unidos y Canadá, si bien su uso es poco habitual en los países europeos (Buondonno et al., 1992). Numerosos trabajos comparan la extracción de fósforo por el reactivo Mehlich 3 con la de otros reactivos usuales, pero hasta el momento son pocos los ensayos de campo o en maceta para estudiar la respuesta de las plantas al fósforo Mehlich 3.

El presente trabajo tiene como objetivo comparar la eficacia de tres métodos de análisis de fósforo asimilable (Olsen, Bray 2 y Mehlich 3) para predecir el rendimiento y la absorción de fósforo por la planta en suelos con diferentes propiedades de adsorción de fósforo. El estudio se lleva a cabo en muestras de suelo de la

escombrera de la mina de lignito de As Pontes (A Coruña). Estos suelos tienen la ventaja de presentar un amplio rango de propiedades físico-químicas, en particular una amplia variabilidad de los contenidos de fósforo asimilable y de componentes no cristalinos de aluminio y hierro. En un trabajo anterior (Monterroso et al., 1996) se puso de manifiesto que el contenido de hierro y aluminio (principalmente hierro) extraíbles por oxalato ácido es el principal factor de adsorción de fósforo por estos suelos (coeficiente de determinación entre \log PSI (índice de adsorción de fósforo) y $\log (Al_0 + Fe_0)$, $R^2=0,64$).

MATERIAL Y MÉTODOS

Las muestras de suelo utilizadas en este estudio pertenecen a la escombrera de la mina de lignito de As Pontes (A Coruña). Corresponden a dos profundidades (0-15 y 15-30 cm) de once parcelas experimentales. Los suelos de la escombrera son muy heterogéneos, estando constituidos en su mayor parte por arcillas y pizarras, a menudo ricas en pirita (Monterroso et al., 1993). En muchos casos estos materiales han sido cubiertos por una capa de tierra vegetal.

Algunos de los suelos fueron enmendados con caliza, ceniza procedente de la central térmica o gallinaza. Estas operaciones, así como fertilización inorgánica, se llevaron a cabo en el momento del establecimiento de las parcelas experimentales, de tres a diez años antes de la toma de muestras utilizadas en el presente estudio.

Las diferentes tareas de restauración han dado lugar a un amplio rango de variación de las propiedades físico-químicas de los suelos de la escombrera, con valores de pH en agua (1:2,5) entre 2,7 y 8,4, si bien ninguna de las muestras tiene carácter calcáreo. En la Tabla 1 se resumen algunas propiedades relevantes de estos suelos (Monterroso et al., 1993).

El análisis de fósforo asimilable se realizó por duplicado en un total de 140 muestras, utilizando tres métodos de extracción química: Olsen (Olsen y Sommers, 1982), Bray 2 (Jackson, 1964) y Mehlich 3 (Mehlich, 1984). La composición de los extractantes y las características de los métodos de extracción se presentan en la Tabla 2. El fósforo se determinó en los extractos por espectrofotometría visible con molibdato amónico y ácido ascórbico como reductor (Olsen y Sommers, 1982). En las mismas muestras se determinó el índice de adsorción

TABLA 1. Valores mínimo, máximo y medio de algunas propiedades de los suelos (Monterroso et al., 1993)

	Mínimo	Máximo	Media
pH-H ₂ O	2,7	8,4	4,9
pH-KCl	2,1	8,1	4,4
C orgánico, g kg ⁻¹	0,0	169,3	25,1
Arcilla, g kg ⁻¹	23,1	359,4	132,4
CIC efectiva, cmol _c kg ⁻¹	0,30	12,96	2,39
Al de cambio, cmol _c kg ⁻¹	0,02	12,78	1,90
Al _{oxalato} , g kg ⁻¹	0,00	11,65	3,35
Fe _{oxalato} , g kg ⁻¹	1,10	2,25	7,53

de fósforo (PSI) según Bache y Williams (1971). Los resultados de todos los análisis se refieren a peso de suelo seco a 110°C.

De las 140 muestras de suelos se seleccionaron 28 para realizar un experimento de crecimiento de plantas de maíz (*Zea mays* L.) en maceta en condiciones controladas. Estos 28 suelos cubren amplios rangos de pH, fósforo asimilable y PSI. En cada maceta, de 17 cm de diámetro y 2 L de capacidad, se pusieron 500 g de tierra fina (< 2 mm) seca al aire mezclados con 1500 cm³ de perlita para favorecer la aireación. Las macetas fueron fertilizadas con N, K y Mg en forma soluble como productos químicos grado reactivo (NH₄NO₃, MgSO₄.7H₂O, KCl); en el caso de suelos con pH>6 se añadió también Zn como ZnSO₄.7H₂O. Las semillas de maíz se hicieron germinar en cámara de crecimiento, se pasaron a vasos con perlita y a los 5 días se transfirieron a las macetas. Se pusieron tres plántulas por maceta y se mantuvieron en cámara de crecimiento (FI-TOTRON 600G3 FISIONS) a 25°C, 90% de humedad y 21000 lux; estas condiciones se mantuvieron constantes día y noche durante los 15 días que duró la experiencia. Las macetas se mantuvieron a capacidad de campo, añadiendo agua destilada cuando fue necesario. Transcurridos 15 días, se cortaron las plantas por el pie, se secaron a 65°C y se pesaron. Después se cortaron en trozos de

menos de 2 mm y se calcinaron a 500°C hasta color blanco para la determinación de fósforo; las cenizas se disolvieron en HCl 6 M y el fósforo se determinó por espectrofotometría visible con molibdato amónico y ácido ascórbico como reductor.

El tratamiento estadístico de los datos, utilizando análisis de regresión simple y múltiple, se realizó mediante el programa StatGraphichs 3.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación del fósforo extraído por los distintos reactivos

En la Tabla 3 se recogen los valores máximo y mínimo y la mediana del fósforo extraído por los tres reactivos ensayados así como del índice de adsorción de fósforo (PSI) en las 140 muestras estudiadas. En general, el reactivo Bray 2 es el que extrae las mayores cantidades de fósforo, mientras que el Olsen extrae cantidades menores. Por término medio el reactivo Bray 2 extrae tres o cuatro veces más fósforo que el Mehlich 3 y siete veces más que el Olsen; el reactivo Mehlich 3 extrae como media algo más del doble que el Olsen. En un estudio llevado a cabo en suelos cultivados de Quebec, Tran et al. (1990) encuentran que el reactivo

TABLA 2. Composición química de los extractantes y características del procedimiento de extracción en los tres métodos de evaluación del fósforo asimilable ensayados

Método	Composición química	Relación suelo:disolu- ción (m/v)	Tiempo de extracción	pH
Olsen	NaHCO ₃ 0,5 M	1:20	30 min	8,5
Bray 2	NH ₄ F 0,03 M + HCl 0,1 M	1:10	40 s	1,0
Mehlich 3	NH ₄ F 0,015 M + NH ₄ NO ₃ 0,25 M + CH ₃ COOH 0,2 M + HNO ₃ 0,013 M + AEDT 0,001 M	1:10	5 min	3,0

Mehlich 3 extrae aproximadamente 3 veces más que el Olsen y el Bray 2 extrae aproximadamente 1,3 veces más que el Mehlich 3.

Las relaciones entre fósforo extraído por los distintos extractantes varían considerablemente de unos suelos a otros, de modo que las correlaciones entre fósforo extraído por los distintos métodos son débiles (Tabla 4; Figuras 1, 2 y 3). A pesar de que, por término medio, el reactivo Mehlich 3 extrae más fósforo que el reactivo Olsen (Figura 1), los valores de P Olsen superan a menudo a los de P Mehlich 3 en suelos con elevada capacidad de adsorción de fósforo (altos valores de Fe_{oxalato} y de PSI). Los valores más altos de P Mehlich 3 se obtienen en muestras con PSI bajos, mientras que valores altos de P Olsen se producen frecuentemente en muestras con PSI alto. Las muestras en que P Olsen > Mehlich 3 corresponden a suelos ácidos, con valores bajos de P Mehlich 3 mientras

que los valores de P Olsen pueden ser relativamente altos. El carácter alcalino del reactivo Olsen da lugar a un aumento del pH en muestras ácidas; este aumento del pH producirá una disminución de la capacidad de adsorción de fósforo, al disminuir las cargas superficiales positivas (Monterroso et al., 1996), con la consiguiente liberación de fósforo. Esto sugiere que el reactivo Olsen puede sobreestimar el fósforo asimilable en suelos ácidos con carga variable, al movilizar formas de fósforo que no se movilizan en las condiciones del suelo.

También Willet y Higgins (1978) encuentran que ortofosfato relativamente no disponible para las plantas, unido a compuestos de hierro reactivos, es desplazado por $NaHCO_3$ 0,5 M. Michaelson y Ping (1986) encuentran que el reactivo Olsen extrae más fósforo que los reactivos Mehlich de suelos ricos en componentes no cristalinos. Buondonno et al. (1992)

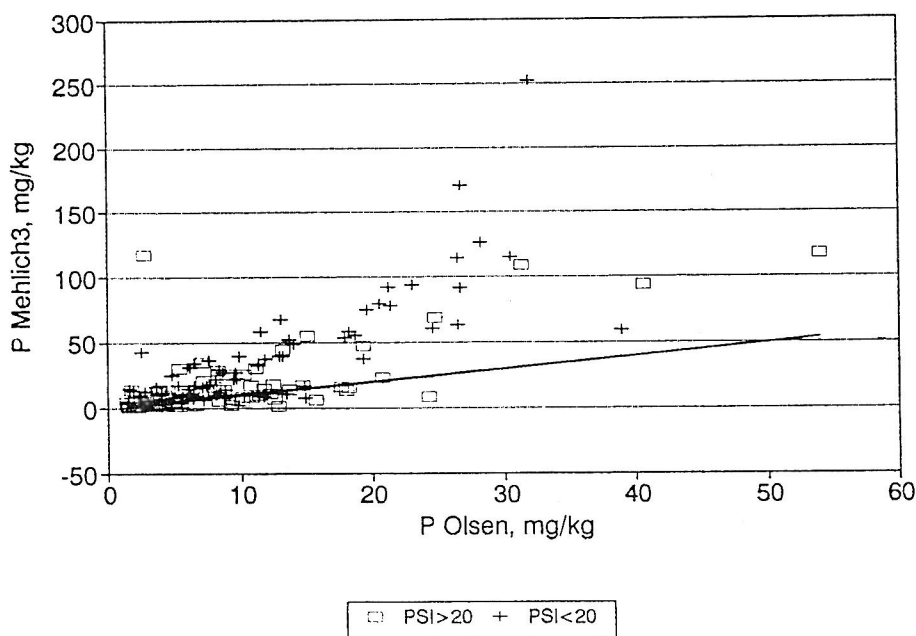


Figura 1. Fósforo extraído por el método Mehlich 3 frente al método Olsen. La línea recta representa la relación 1:1.

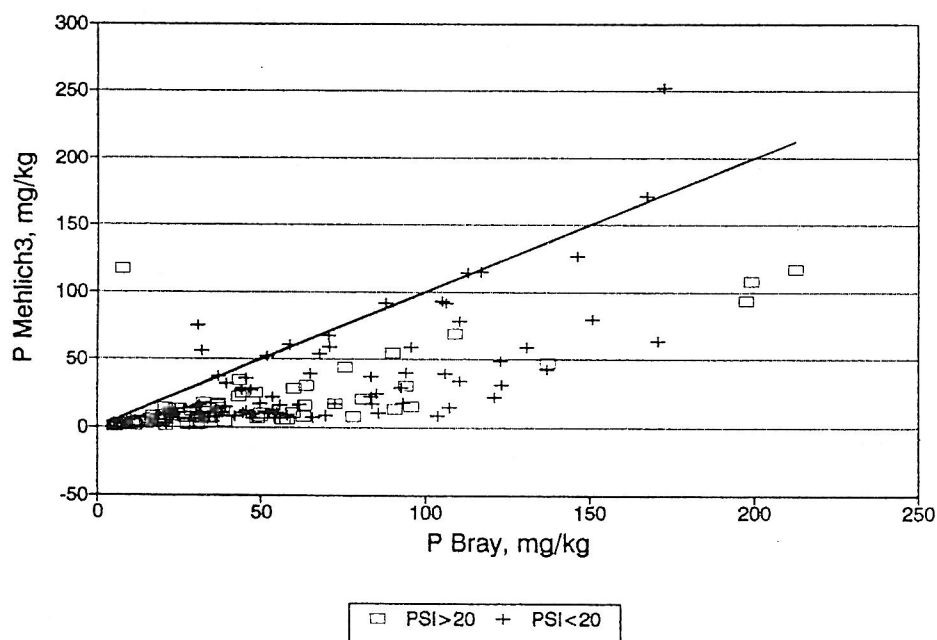


Figura 2. Fósforo extraído por el método Mehlich 3 frente al método Bray 2. La línea recta representa la relación 1:1.

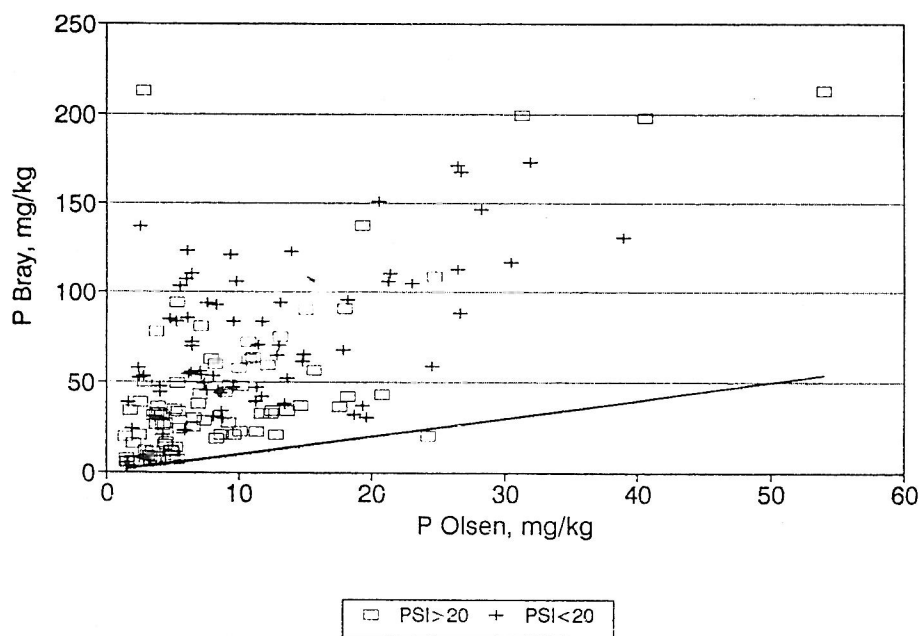


Figura 3. Fósforo extraído por el método Bray 2 frente al método Olsen. La línea recta representa la relación 1:1.

TABLA 3. Valores mínimo, máximo y mediana de fósforo asimilable e índice de adsorción de fósforo en las muestras estudiadas

	Mínimo	Máximo	Mediana
P Olsen, mg kg ⁻¹	1,4	54,0	7,9
P Bray 2, mg kg ⁻¹	5,0	212,6	45,4
P Mehlich 3, mg kg ⁻¹	0,9	252,3	13,4
PSI	0,0	55,1	24,2

TABLA 4. Regresiones lineales entre P extraído por los distintos métodos

Todas las muestras	PSI>20	PSI<20
Bray 2 frente a Olsen		
$y = 20,04 + 3,555 x$ $R^2 = 0,50$	$y = 6,68 + 3,921 x$ $R^2 = 0,66$	$y = 42,08 + 2,659 x$ $R^2 = 0,32$
Mehlich 3 frente a Olsen		
$y = -6,28 + 3,157 x$ $R^2 = 0,59$	$y = -4,10 + 2,159 x$ $R^2 = 0,70$	$y = -8,61 + 3,994 x$ $R^2 = 0,63$
Mehlich 3 frente a Bray 2		
$y = -8,20 + 0,609 x$ $R^2 = 0,56$	$y = -5,20 + 0,489 x$ $R^2 = 0,83$	$y = -13,26 + 0,709 x$ $R^2 = 0,44$

observan que el reactivo Olsen extrae más fósforo con respecto a Mehlich 3 en suelos ácidos; determinan una relación P M3/P Olsen con un valor medio de 2,52 para suelos calcáreos y de 1,63 para suelos no calcáreos; encuentran que P Olsen > P M3 en un número limitado de suelos ricos en aluminio no cristalino, similarmente a lo observado en el presente estudio.

El reactivo Bray 2 extrae más fósforo que Olsen y Mehlich 3 en la mayoría de los casos. Esto denota la gran agresividad del reactivo Bray 2, relacionada principalmente con su elevada acidez. En relación con el reactivo Mehlich 3, el reactivo Bray 2 extrae más o mucho más fósforo particularmente de muestras con eleva-

do índice de adsorción de fósforo (Figura 2). Según Tran et al. (1990), el reactivo Bray 2 extrae cantidades importantes de P ligado a Al o a Fe no cristalinos, debido a su mayor concentración de fluoruro y de ion H⁺; así este reactivo sobreestima el fósforo asimilable en suelos ricos en este tipo de componentes. Por otra parte, debido a su elevada concentración de ácido, el reactivo Bray 2 puede disolver fosfatos de calcio que no son solubilizados por el reactivo Mehlich 3 ni por las raíces de las plantas (Tran et al., 1990; Leal et al., 1994); de esta forma sobreestimaría el fósforo asimilable también en suelos con pH elevado. En el presente trabajo se encuentran valores de P Mehlich 3 relativamen-

te altos con respecto a Bray 2 (relación P M3/P Bray 2 próxima a 1) en muestras con PSI bajo y pH alto; en estos suelos ambos reactivos parecen igualmente efectivos en la extracción de fósforo.

El reactivo Bray 2 extrae más fósforo que el Olsen (Figura 3) en prácticamente todos los casos, lo que pone de manifiesto la efectividad del reactivo Bray 2 para extraer P ligado tanto a Ca como a Fe y Al. Los mayores valores de P Bray 2 con respecto a P Olsen corresponden a suelos con pH alto, lo que parece indicar una especial capacidad del reactivo Bray 2 para extraer fosfatos de calcio.

Como se ha señalado, las correlaciones entre métodos de extracción son débiles. Dado el diferente comportamiento de los tres extractantes en suelos con distintas propiedades de adsorción, se realizaron análisis de regresión lineal simple en la totalidad de las muestras y en los grupos de muestras con $PSI > 20$ y $PSI < 20$. Este valor de 20 parece adecuado para separar las muestras con fuerte adsorción

de fósforo de aquellas con débil o moderada adsorción, de acuerdo con los ensayos en maceta. Los resultados de estos análisis de regresión se muestran en la Tabla 4. El mejor coeficiente de determinación corresponde a los métodos Bray 2 y Mehlich 3 en muestras con $PSI > 20$, si bien el método Bray 2 extrae cantidades considerablemente más altas que el Mehlich 3.

Ensayos en maceta

Las experiencias en cámara de crecimiento ponen de manifiesto, en primer lugar, una buena correlación entre el rendimiento en materia seca y el fósforo total extraído por la planta (Figura 4; $R^2 = 0,74$, exceptuando el último punto), indicando que este elemento es el limitante del crecimiento vegetal. Sólo una muestra (Figura 4) pone de manifiesto un consumo de lujo de fósforo, es decir una absorción de fósforo por la planta que no da lugar a un incremento del rendimiento.

Asimismo el rendimiento en materia seca muestra una tendencia clara a la disminución al

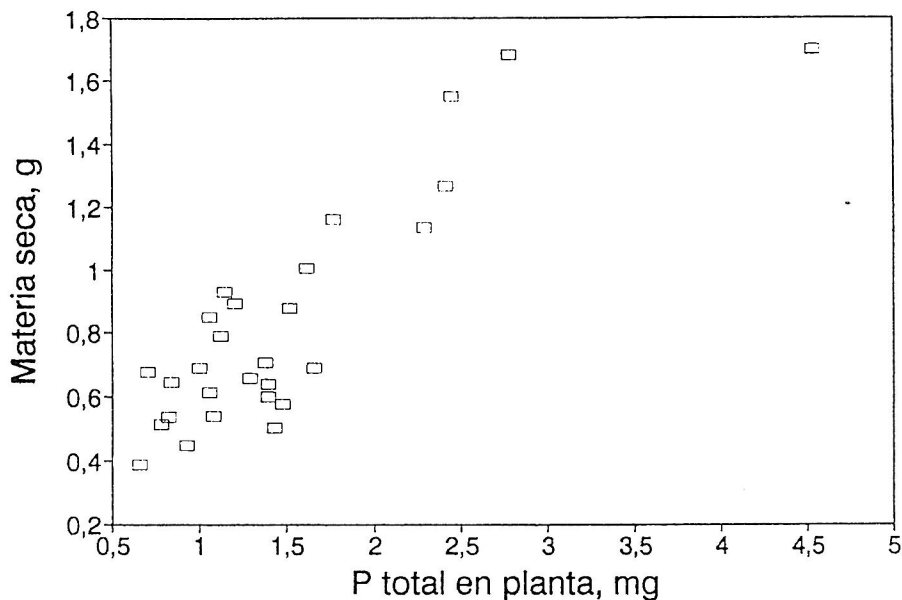


Figura 4. Rendimiento en materia seca de plantas de maíz frente a fósforo en planta.

aumentar el índice de adsorción de fósforo (Figura 5). Valores de $PSI > 20$ dan lugar a bajos rendimientos. De acuerdo con un trabajo anterior (Monterroso et al, 1996), un $PSI = 20$ corresponde a un valor de $Al_{ox} + Fe_{ox} = 0,9\%$. Similar tendencia se observa entre P en planta y PSI. Esto indica que el fósforo adsorbido está muy poco disponible para las plantas, al menos en las primeras fases de crecimiento vegetal. Resultados similares son obtenidos por Ozanne y Shaw (1967), Cajuste et al.(1992), Anghinoni et al.(1996) y Moody et al.(1997). Estos últimos, en ensayos de campo con maíz en Oxisoles, encuentran que la capacidad amortiguadora de fosfato da cuenta del 92-94% de la varianza del rendimiento relativo.

En concordancia con estos resultados, Holford (1997) señala que, para un valor dado del fósforo asimilable, la absorción de fósforo por la planta está en relación inversa con la capacidad amortiguadora (capacidad de adsorción) de fosfato. Por tanto, establece que

un método de estimación de fósforo asimilable debe extraer una cantidad de fósforo negativamente correlacionada con la capacidad amortiguadora; analizando distintos estudios, encuentra que los extractantes más efectivos son los mejor correlacionados con la capacidad amortiguadora. En el presente estudio, el método Mehlich 3 es el único de los tres ensayados que presenta valores altos para bajos valores de PSI y valores bajos para altos valores de PSI. Hay que señalar que, de acuerdo con Holford (1997), la influencia de la capacidad amortiguadora de fosfato disminuye con el tiempo, a medida que el desarrollo del sistema radicular de la planta le permite acceder a una proporción creciente del fósforo del suelo.

La Figura 6 representa el rendimiento en materia seca frente al fósforo extraído por los reactivos Olsen, Bray 2 y Mehlich 3. Los coeficientes de determinación así como los de fósforo absorbido por la planta frente a P extraído se presentan en la Tabla 5. Llama la atención el

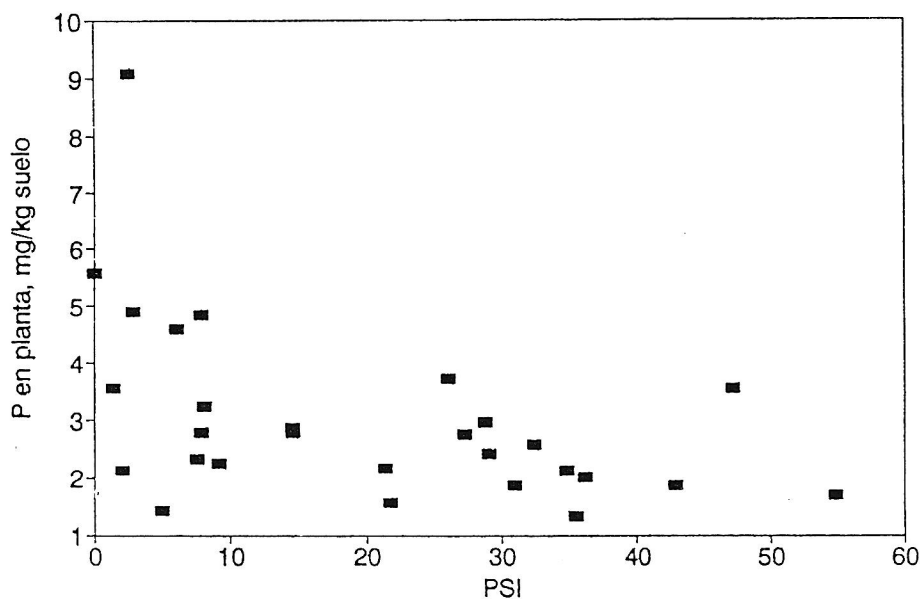


Figura 5. Rendimiento en materia seca de plantas de maíz frente al índice de adsorción de fósforo.

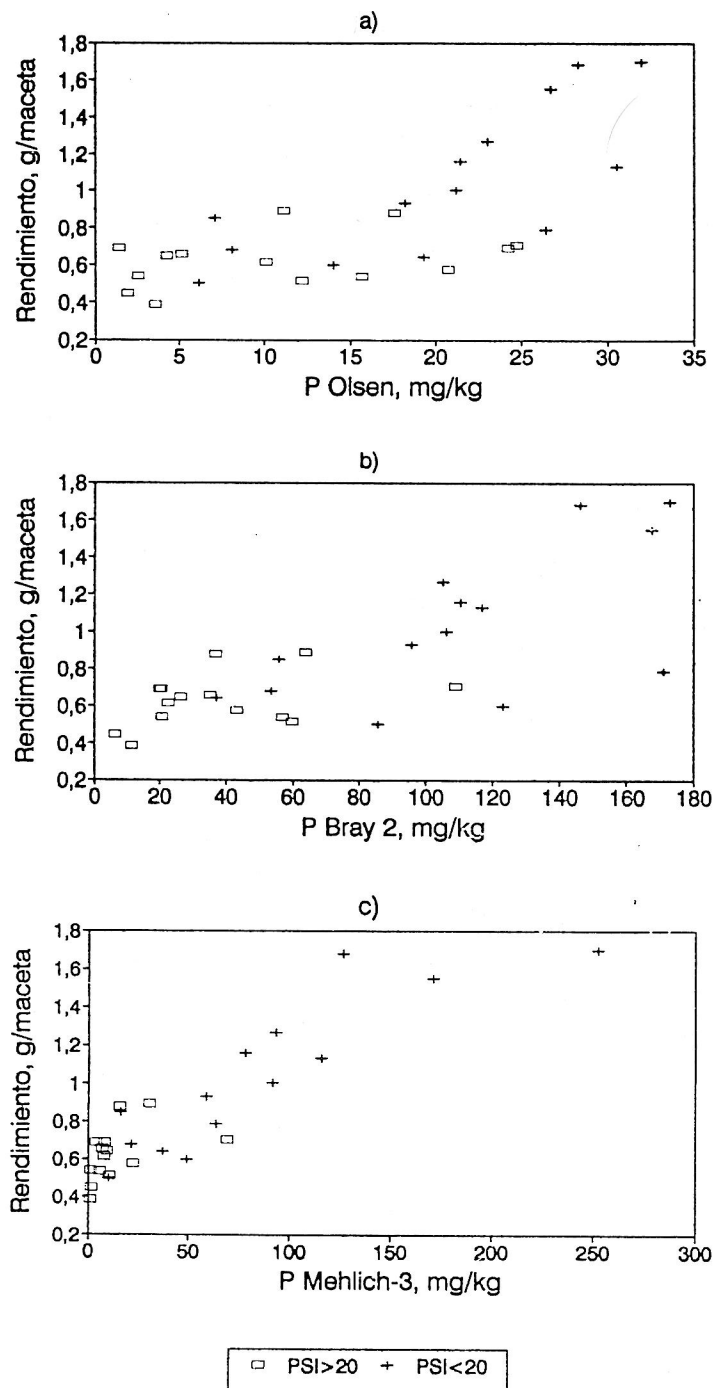


Figura 6. Rendimiento en materia seca de plantas de maíz frente a fósforo extraído. a) método Olsen; b) método Bray 2; c) método Mehlich 3.

TABLA 5. Coeficientes de determinación (R^2) de P absorbido por la planta y rendimiento en materia seca frente a P extraído

	P Olsen	P Bray 2	P Mehlich 3
P total en planta	0,39	0,43	0,80
Rendimiento	0,51	0,56	0,78 ¹

¹ se ha excluído el último punto, que no sigue la tendencia lineal

incremento del rendimiento hasta valores muy altos de fósforo extraído (30 mg kg⁻¹ de P Olsen, 180 mg kg⁻¹ de P Bray 2, 150 mg kg⁻¹ de P Mehlich 3), que están muy por encima de los valores considerados habitualmente como críticos. En el caso del P Mehlich 3, se han dado como nivel crítico valores de 30 mg/dm³ (Mehlich, 1984), 30-60 mg/kg (Buondonno et al, 1992), 25 mg/L (Cox, 1996); Sims (1989) considera alto un nivel de más de 84 mg/dm³. Esta respuesta de las plantas al fósforo hasta valores muy altos de P extraído se interpreta como consecuencia de la corta duración del experimento: los resultados obtenidos para plantas jóvenes posiblemente no son generalizables a plantas viejas, con un sistema radicular más desarrollado (Le Mare, 1981; Holford, 1997).

En las condiciones del experimento realizado, el P Mehlich 3 se correlaciona mucho mejor que los otros dos tanto con el P extraído por las plantas como con el rendimiento vegetal, explicando aproximadamente un 80% de la varianza de estos parámetros (Tabla 5). Las ecuaciones de regresión entre P en planta y P extraído por los reactivos químicos tienen ordenadas en el origen positivas, entre 0,7 y 0,9 mg P/maceta, que dan cuenta del contenido de fósforo en las semillas.

Dada la influencia observada de la capacidad de adsorción de fósforo tanto en el poder extractor de los distintos reactivos como en la respuesta de las plantas, se realizaron análisis de regresión múltiple para comprobar si la consideración del PSI produce un incremento

de la varianza explicada en el rendimiento o en el P absorbido por la planta. Así se introdujeron en los análisis de regresión, junto a P extraído, PSI o las variables relacionadas log PSI o 1/PSI. La introducción de estas variables no produjo un incremento significativo del coeficiente de determinación para la absorción de P por la planta, pero sí para el rendimiento en materia seca. Las ecuaciones finales derivadas junto con los coeficientes de determinación se presentan en la Tabla 6. (En los análisis de regresión múltiple, al incluir log PSI o 1/PSI, se eliminó una muestra con PSI=0; por ello los valores de R^2 para la regresión simple no coinciden con los de la Tabla 5). En el caso del P Mehlich 3, el incremento del coeficiente de determinación por la introducción de PSI es poco significativo. Por el contrario, este incremento es muy notable en los casos de P Olsen y P Bray 2. Las ecuaciones de la Tabla 6 indican que, para un valor dado del fósforo extraído, el rendimiento es mayor para valores bajos de PSI. El efecto del PSI es máximo en el caso del P Olsen, pues log PSI solo explica un mayor porcentaje de la varianza del rendimiento que P Olsen (51% frente a 48%). Por tanto, para establecer niveles críticos de P y recomendaciones de fertilización a partir de valores de P extraído, será necesario tener en cuenta además algún parámetro relacionado con la capacidad de adsorción. Cajuste et al. (1992) recomiendan clasificar los suelos de acuerdo con este parámetro y establecer diferentes niveles críticos y recomendaciones para cada clase.

TABLA 6. Modelos explicativos del rendimiento en materia seca por el fósforo extraído por reactivos químicos y el índice de adsorción de fósforo (PSI)

Método	Ecuación	R ²	R ²
		regresión simple	regresión múltiple
Olsen	Rend. = 0,968 + 0,01579 x P Olsen - 0,3573 log PSI	0,51	0,67
Bray 2	Rend. = 0,453 + 0,003531 x P Bray + 0,7211/PSI	0,53	0,64
Mehlich 3	Rend. = 0,542 + 0,004383 x P Mehlich + 0,4100/PSI	0,83	0,86

Esta mejora de la explicación de la varianza del rendimiento al tener en cuenta la capacidad amortiguadora (capacidad de adsorción) de fósforo fue observada también por Giroux y Tran (1985), que utilizaron como segunda variable aluminio oxalato, capacidad máxima de fijación de fósforo, pH-NaF o pH-H₂O. Estos autores observaron que el aumento de R² al introducir la segunda variable (así como la significación de ésta) era menor en el caso del reactivo Mehlich 2 (de composición y prestaciones similares al Mehlich 3; Tran et al., 1990) que en los de Olsen y Bray 2.

Se desprende que en el caso de utilización de P Mehlich 3 es menos necesario tener en cuenta la capacidad de adsorción para predecir la respuesta de las plantas, pudiéndose utilizar los mismos niveles críticos para una amplia gama de suelos no calcáreos.

De los resultados presentados parece resultar que el reactivo Olsen puede sobreestimar el fósforo asimilable en suelos ácidos ricos en Al y Fe no cristalinos, al extraer P no extraíble por las plantas, al menos en las primeras etapas de su desarrollo. En un número limitado de muestras con pH alto y muy bajos PSI y capacidad de intercambio catiónico, el fósforo extraído por la planta es muy superior al predicho por la recta de regresión P en planta/P Olsen, lo que podría

indicar en estos casos una infraestimación del fósforo asimilable por el reactivo Olsen. Esta observación parece estar de acuerdo con la de Buondonno et al. (1992), según la cual el reactivo Mehlich 3 extrae más fósforo con respecto al Olsen de suelos ligeros con baja CIC. Si esto fuese así, podría tener como consecuencia la recomendación de abonado fosfatado en suelos suficientemente provistos, con el consiguiente riesgo de exportación de fósforo. En cualquier caso, el reactivo Olsen parece poco adecuado para analizar P asimilable en suelos no calcáreos, al menos en los que contienen componentes no cristalinos.

El reactivo Bray, por su parte, parece sobreestimar el P asimilable en los suelos ácidos, particularmente aquellos con elevada capacidad de adsorción de P, en concordancia con las observaciones de Tran et al. (1990). Esta sobreestimación se relaciona con la elevada concentración de fluoruro, complejante efectivo del Al (y en menor medida del Fe) y con la elevada acidez.

El método Mehlich 3, altamente correlacionado con el P en planta y con el rendimiento, parece el más adecuado para la estimación de P asimilable en este tipo de suelos. Su composición, menos ácida y con menor concentración de fluoruro que el Bray 2, e incorporando un complejante orgáni-

co (AEDT), parece reproducir satisfactoriamente las condiciones de la rizosfera. Su modo de acción conjuga los componentes complejantes con el pH ácido; los primeros liberan fósforo a través de la complejación de cationes puente, que unen el fosfato al complejo adsorbente con carga negativa; el pH ácido provoca la disolución de formas de fósforo poco solubles, particularmente fosfatos de calcio.

Por el contrario, en suelos calcáreos diversos autores han puesto de manifiesto la superioridad del reactivo Olsen (Yee y Broersma, 1987; Holford, 1997).

CONCLUSIONES

El método Mehlich 3 resulta mejor correlacionado que los métodos Olsen y Bray 2 con el desarrollo vegetal y la absorción de fósforo por plantas de maíz en la fase inicial de su desarrollo. Esto sugiere su adecuación para estimar la disponibilidad de fósforo en suelos no calcáreos con un amplio rango de propiedades de adsorción de este elemento.

Los métodos Olsen y Bray 2 pueden sobreestimar el fósforo asimilable, en particular en suelos ácidos con elevada capacidad de adsorción. Su utilización para predecir la respuesta de las plantas requiere la determinación complementaria de algún parámetro indicativo de la capacidad de adsorción de fósforo.

Junto a la mejor adecuación para predecir la respuesta vegetal, el método Mehlich 3 presenta otras ventajas adicionales. La primera es la posibilidad de determinar otros elementos en el mismo extracto. A diferencia del método Olsen, el Mehlich 3 no requiere la utilización de carbón activo ni la neutralización y consiguiente eliminación del CO₂ para la determinación de P en el extracto por el método del complejo fosfomolibdico.

La adecuación del método Mehlich 3 para estimación de P asimilable en suelos de Galicia deberá ser confirmada por ensayos de campo.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a Montserrat López Mosquera su colaboración en las determinaciones analíticas.

BIBLIOGRAFÍA

- Anghinoni, I., Baligar, V.C., Wright, R.J. (1996): Phosphorus sorption isotherm characteristics and availability parameters of Appalachian acidic soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **27**, 2033-2048.
- Bache, B.W. & Williams, E.G. (1971): A phosphate sorption index for soils. *J. Soil Sci.* **22**, 289-301.
- Buondonno, A., Coppola, E., Felleca, D., Violante, P. (1992): Comparing tests for soil fertility: 1. Conversion equations between Olsen and Mehlich 3 as phosphorus extractants for 120 soils of South Italy. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **23**, 699-716.
- Breeuwsma, A. & Silva, S. (1992): Phosphorus fertilisation and environmental effects in the Netherlands and the Po region (Italy). Report 57. DLO The Winand Staring Center, Wageningen (The Netherlands). 39 pp.
- Cai, T.T., Olsen, T.W., Yost, R.S., Silva, J.A. (1997): Performance indices for tests of soil nutrient status: extractable phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **28**, 329-339.
- Cajuste, L.J., Alvarez, V.H., Laird, R.J. (1992): Evaluation of chemical extractants for assessing phosphate availability in volcanic ash soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **23**, 2189-2206.
- Cox, F.R. (1996): Economic phosphorus fertilization using a linear response and plateau function. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **27**, 531-543.
- Fernández Marcos, M.L., Alvarez, E., Monterroso, C. (1997): Aluminium and iron estimated by Mehlich 3 extractant in mine soils in Galicia, NW Spain. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* (en prensa).

- Gartley, K.L. & Sims, J.T. (1994): Phosphorus soil testing: environmental uses and implications. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **25**, 1565-1582.
- Giroux, M. & Tran, T. Sen (1985): Evaluation du phosphore assimilable des sols acides avec différentes méthodes d'extraction en relation avec le rendement de l'avoine et les propriétés du sol. *Can. J. Soil Sci.* **65**, 47-60.
- Handreck, K.A. (1991): Available phosphorus in potting media: extractants and interpretation of extract data. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **22**, 529-557.
- Handreck, K.A. (1996): Comparison of phosphate-phosphorus and total phosphorus in DTPA extracts for assessing plant-available phosphorus in soilless potting media. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **27**, 2125-2135.
- Holford, I.C.R. (1997): Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res.* **35**, 227-239.
- Hylander, L.D., Svensson, H.I., Symán, G. (1996): Different methods for determination of plant available soil phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **27**, 1501-1512.
- Jackson, M.L. (1964): Análisis químico de suelos. Omega. Barcelona.
- Leal, J.E., Sumner, M.E., West, L.T. (1994): Evaluation of available P with different extractants on Guatemalan soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **25**, 1161-1196.
- Le Mare, P.H. (1981): Exchangeable phosphorus, estimates of it from amorphous iron oxides and soil solution phosphorus, in relation to phosphorus taken up by maize. *J. Soil Sci.* **32**: 285-299.
- Mamo, T., Richter, C., Heiligtag, B. (1996): Comparison of extractants for the determination of available phosphorus, potassium, calcium, magnesium and sodium in some Ethiopian and German soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **27**, 2197-2212.
- Mehlich, A. (1984): Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **15**, 1409-1416.
- Michaelson, G.J. & Ping, C.L. (1986): Extraction of phosphorus from the major agricultural soils of Alaska. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **17**, 275-297.
- Michaelson, G.J., Ping, C.L., Mitchell, G.A. (1987): Correlation of Mehlich 3, Bray 1 and ammonium acetate extractable P, K, Ca and Mg for Alaska agricultural soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **18**, 1003-1015.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1986): Métodos Oficiales de Análisis. Tomo III. Madrid. España.
- Monterroso, C., Alvarez, E., Macías, F. (1993): Caracterización de los suelos de la escombrera de la mina de Puentes (La Coruña) en proceso de restauración ambiental. *Cuad. Lab. Xeol. Laxe* **18**, 355-364.
- Monterroso, C., Fernández Marcos, M.L., Alvarez, E. (1996): Factors influencing phosphorus adsorption in mine soils in Galicia, Spain. *Sci. Total Environ.* **180**, 137-145.
- Moody, P.W., Dickson, T., Aitken, R.L. (1997): Soil phosphorus tests and grain responsiveness of maize (*Zea mays*) on Ferrosols. *Aust. J. Soil Res.* **35**, 609-613.
- Olsen, S.R. & Sommers, L.E. (1982): Phosphorus. En: A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Madison, Wisconsin, EEUU.
- Ozanne, P.G. & Shaw, T.C. (1967): Phosphate sorption by soils as a measure of the phosphate requirement for pasture growth. *Aust. J. Agric. Res.* **18**, 601-612.
- Raij, B. van (1994): New diagnostic techniques, universal soil extractants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **25**, 799-816.
- Sharpley, A., Daniel, T.C., Sims, T.J., Pote, D.H. (1996): Determining environmentally

- sound soil phosphorus levels. *J. Soil and Water Cons.* **51**, 160-166.
- Sims, J.T.(1989): Comparison of Mehlich 1 and Mehlich 3 extractants for P, K, Ca, Mg, Mn, Cu and Zn in Atlantic Coastal Plain soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **20**, 1707-1726.
- Tran, T.Sen, Giroux, M., Guilbeault, J., Audesse, P.(1990): Evaluation of Mehlich-III extractant to estimate the available P in Quebec soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **21**, 1-28.
- Willet, I.R.&Higgins, M.L.(1978): Phosphate sorption by reduced and re-oxidised rice soils. *Aust. J. Soil Res.* **16**, 319-326.
- Yee, A.R.&Broersma, K.(1987): The Bray, Mehlich and Kelowna soil P tests as affected by soil carbonates. *Can. J. Soil Sci.* **67**, 399-404.