

Evaluación isotópica del fósforo de un suelo ferralítico rojo bajo varios sistemas de fertilización

Ricardo M. Rodríguez Guzmán

Universidad de Ciego de Ávila, Carretera a Morón km 9, Ciego de Ávila, Cuba
ricardo@unica.cu

Resumen

Se analizaron muestras de un suelo ferralítico rojo de la Estación Experimental “Juan Tomás Roig” de la Universidad de Ciego de Ávila, sometido a dos rotaciones de cultivo y cuatro sistemas de fertilización fosfórica. El objetivo fue evaluar, mediante la dilución isotópica del ^{32}P , los parámetros estáticos del fósforo (P) en un suelo que recibió fertilizante fosfórico por dos métodos de aplicación (en bandas y a voleo) durante varios años. Se utilizó un método radioquímico de laboratorio usando una disolución marcada con ^{32}P libre de portador, basado en el intercambio isotópico entre los fosfatos de los sólidos y la solución del suelo. Las muestras de suelo se analizaron en los laboratorios del Departamento del Comisariado de Energía Atómica, Francia. Se determinaron los factores cantidad (E_1) como el P isotópicamente intercambiable en un minuto, intensidad (Cp) como la concentración de P en la solución del suelo y capacidad como la relación E_1/Cp . La evaluación isotópica mediante ^{32}P indicó que el suelo necesita de aplicaciones de P altas y en bandas para alcanzar valores de E_1 y Cp adecuados para la nutrición de los cultivos agrícolas. Con la fertilización en bandas se logró un efecto acumulativo del P en el suelo después de tres ciclos de rotación de cultivos, que permitió incrementar su disponibilidad para las plantas. El factor capacidad resultó muy alto en todas las muestras de suelo, lo cual indica que el suelo mantiene una reserva de P que es difícilmente intercambiable con el P de la solución del suelo.

Palabras clave: radioquímica, fósforo 32, suelos, fertilización, relación isotópica

Phosphorus isotopic evaluation of a Red Ferralitic soil under various fertilization systems

Abstract

Soil samples from a red ferralitic soil from the “Juan Tomás Roig” Experimental Station, belonging to Ciego de Avila University were analyzed under two crop rotations and four phosphoric fertilization systems. The objective was to evaluate, through the ^{32}P isotopic dilution, phosphor (P) static parameters in a soil that has received P fertilizer through two placement methods (banding and broadcasting) for several years. A radiochemical laboratory method using a ^{32}P free-carrier solution as a tracer based on isotopic exchange between solid phase and soil solution phosphate ions was used. Soil samples were analyzed at the CEA Department laboratories, in Francia. Quantity (E_1), as isotopic exchangeable P at one minute, intensity (Cp), as P concentration in soil solution, and capacity, as (E_1/Cp), factors were determined. ^{32}P isotopic evaluation indicated that the soil needs high banding P application to reach adequate E_1 and Cp values for crop nutrition. A cumulative P effect in the soil through banding fertilization after three crop rotation cycles was obtained, which allows to increase plant P availability. The capacity factor was very high in all soil samples, indicating that soil maintains a P reserve that is difficult to exchange with the phosphor present in the soil solution.

Key words: radiochemistry, phosphorus 32, soils, fertilization, isotope ratio

Introducción

El fósforo (P) es un componente esencial de muchos procesos fisiológicos en las plantas [1]. El manejo del P en el suelo requiere una estrategia a largo plazo para mantener el suministro de P disponible para las plan-

tas a un nivel apropiado debido a su relativa estabilidad dentro de los suelos [2].

La evaluación del estado de los nutrientes en el suelo es importante, tanto nutricional como ambiental y económicamente [3]. Al estudiar las transformaciones del P en suelos de diferente origen, se encontró

que existen limitaciones en el abastecimiento de P a las plantas en suelos altamente meteorizados como los Ultisoles y Oxisoles, por lo que el P lábil determinado por procedimientos de fraccionamiento químico no es equivalente al P disponible para las plantas [4].

Las plantas no utilizan todo el P que se aplica como fertilizante, solo el 40-60 % en un suelo ferralítico rojo, según el método de dilución isotópica de ³²P [5]. Por lo tanto, en el suelo queda una fracción de P residual que puede acumularse por las aplicaciones continuas de fertilizante.

En Cuba los resultados de experimentos estacionarios en el campo, en rotaciones de cultivo necesitan un estudio eficaz de las variaciones de la fertilidad, con el aprovechamiento de las reservas fosfóricas en los suelos ferralíticos rojos compactados. El método de la cinética de intercambio isotópico utilizando la dilución isotópica del ³²P permite evaluar el estado del P disponible y predecir la eficiencia del P residual cada vez que este se aplica en dosis superiores a la tasa de exportación de los cultivos [6, 7]. Por lo tanto, el objetivo del trabajo consistió en evaluar, mediante la dilución isotópica del ³²P los parámetros estáticos del P en un suelo que recibió fertilizante fosfórico por dos métodos de aplicación, durante varios años.

Materiales y métodos

Se tomaron muestras de suelo de un experimento en el campo, de larga duración, que se inició en 1986 en la Estación Experimental "Juan Tomás Roig" de la Universidad de Ciego de Ávila, en un suelo ferralítico rojo compactado según [8] con las siguientes características: pH (agua)-6,70, pH (KCl)-5,87, Materia orgánica-2,04 %, P disponible-2,17 mg/100 g. Las determinaciones se realizaron según [9 - 11].

Se emplearon cuatro sistemas de fertilización con las secuencias de cultivos de dos rotaciones, en un experimento en el campo como se describe a continuación:

1. Se aplicó el 70 % de la sumatoria de la dosis de fertilizante correspondiente a la secuencia de cultivos, a voleo, al primer cultivo de la secuencia.
2. Se aplicó el 70 % de la sumatoria de la dosis de fertilizante correspondiente a la secuencia de cultivos, en bandas, a cada cultivo integrante de la secuencia.
3. Se aplicó el fertilizante en bandas a cada cultivo, según la dosis establecida en el instructivo técnico.
4. Se aplicó la sumatoria de la dosis de fertilizante correspondiente a la secuencia de cultivos, a voleo, al primer cultivo.

Las secuencias de las dos rotaciones de cultivo fueron: A) Frijol-maíz-plátano y B) Papa-maíz-frijol-plátano. Los tratamientos seleccionados a partir de las muestras de suelo del experimento de campo para realizar los estudios de laboratorio quedaron arreglados como aparece en la Tabla 1.

Tabla 1. Tratamientos, dosis de P acumuladas en tres ciclos de cultivo y métodos de aplicación de fertilizante de las muestras de suelo utilizadas en el estudio de laboratorio.

Tratamiento	Dosis de P acumuladas (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	
	Voleo (V)	Bandas (B)
1	378	378
2	540	540
3	756	756
4	1 080	1 080

Nota: Los tratamientos 1 y 2 corresponden a la rotación A y los tratamientos 3 y 4 a la rotación B.

Las muestras de suelo de tres réplicas se tomaron después de transcurrir tres ciclos de la rotación de cultivos y estuvieron compuestas por 10 submuestras. El muestreo se realizó con barrena a una profundidad de 0-20 cm, siguiendo un recorrido diagonal. Las muestras compuestas fueron secadas al aire, pasadas por un tamiz de 2 mm y se colocaron en frascos con tapa hasta el momento del análisis.

La determinación del P disponible usando el valor E_i y de otros parámetros estáticos se realizó por el método de Fardeau [6] en los laboratorios del Departamento del Comisariado de la Energía Atómica, Cadarache, Francia. La cinética de intercambio isotópico se determinó como sigue: Se agitaron 20 g de suelo durante 18 horas con 199 ml de agua destilada, en un frasco de polietileno (para evitar la fijación del ³²PO₄). El trazador (1 ml de solución de iones ³²PO₄ libre de portador con un nivel de actividad (R) de 0,1 MBq) se añadió a la mezcla anterior, se taparon los frascos y se agitaron nuevamente. Con una jeringa de polietileno se tomaron muestras de la mezcla a dos tiempos, uno y 10 minutos de intercambio isotópico y la solución se separó inmediatamente del suelo usando un filtro miliporo (0,025 µm de tamaño del poro y 47 mm de diámetro). La cantidad de actividad de ³²P (r) remanente en la solución en cada tiempo (t) se midió por efecto \square erenkov, en un contador de centelleo líquido con 1 ml de la solución. La concentración (Cp) de los iones fosfato en la solución del suelo se determinó por el método del azul de molibdeno [12].

Si asumimos que a cualquier tiempo de intercambio isotópico la actividad específica de los iones fosfato en solución es la misma que la actividad específica del P intercambiable total del sistema:

$$r_{(t)}/10.Cp=R/E_{(t)} \quad (1)$$

donde:

r_(t): Actividad de ³²P (MBq) remanente en la solución después de un tiempo t

R: Actividad de ³²P inicial añadida

E_(t): Cantidad de P isotópicamente intercambiable en el tiempo t

El factor 10 proviene del hecho de que la relación suelo/solución es 1:10, por lo tanto:

$$E_{(t)}=10.Cp.R/r_{(t)} \quad (2)$$

Se determinaron tres parámetros que describen el estado de los fosfatos isotópicamente intercambiables:

(i) la cantidad $E_1 = 10 \cdot C_p \cdot (r_1/R)$ de P isotópicamente intercambiable durante el primer minuto de intercambio isotópico (factor cantidad); (ii) la concentración de iones fosfato, C_p en la solución del suelo (factor intensidad); (iii) el decrecimiento con el tiempo de intercambio isotópico de los iones $^{32}\text{PO}_4$ en la solución del suelo (factor capacidad instantáneo como E_1/C_p).

Resultados y discusión

La cantidad de P intercambiable isotópicamente al cabo de un minuto de equilibrio (E_1) mostró una dependencia del método de aplicación del fertilizante empleado y también de la dosis de P (Tabla 2). Existió un incremento directamente proporcional del valor E_1 respecto a la dosis, con un coeficiente de correlación (R) de 0,979 5 para las aplicaciones de fertilizante a voleo y de 0,979 1 para las aplicaciones de fertilizante en bandas.

Tabla 2. Valor E después de 1 minuto de intercambio isotópico afectado por los tratamientos de fertilización fosfórica.

Tratamiento	E_1 (mg P.kg ⁻¹)	
	V	B
1	1,50	2,22
2	2,05	3,72
3	2,90	4,15
4	3,42	6,00
<i>s(qk)</i>	0,213	0,276

Nota: *s(qk)* es la desviación estándar de 12 mediciones (4 tratamientos por 3 réplicas).

Los mayores valores de E_1 se encontraron cuando se adicionó fertilizante en bandas a cada cultivo (B), al compararse con las aplicaciones a voleo (V) para cada una de las dosis de fertilizante fosfórico utilizadas.

El valor E_1 representa la cantidad de P como iones fosfato que pueden moverse desde el suelo a la solución casi instantáneamente y puede ser considerado como la fuente directamente disponible para las plantas, sin necesidad de transformaciones.

Otros autores encontraron que las aplicaciones de fertilizante acuoso provocaron un aumento en el valor E_1 [13 - 15]. Las aplicaciones de P a largo plazo pueden incrementar la disponibilidad del P para las plantas aun en suelos con alta capacidad de sorción de los fosfatos [16]. La rotación de cultivos y la fertilización influyen en el tamaño de la fracción de P disponible para las plantas [17].

La concentración de P en la solución del suelo o factor intensidad (C_p) también fue mayor para las aplicaciones de fertilizante en bandas que para las aplicaciones de fertilizante a voleo. Las mayores diferencias fueron con las dosis más altas (Tabla 3). Existió aumento de C_p al incrementarse la dosis de P para las aplicaciones de fertilizante a voleo con $R=0,911$ y más marcado para las aplicaciones en banda ($R=0,996$).

La concentración de P en la solución del suelo fue inferior a la reportada para la mayoría de los Ultisoles,

Oxisoles y Alfisoles [18, 19]. Las aplicaciones recientes de fertilizante fosfórico incrementaron los valores de E_1 y C_p [18].

Tabla 3. Concentración de P en la solución del suelo después de 1 minuto de intercambio isotópico afectado por los tratamientos de fertilización fosfórica.

Tratamiento	C_p (mg P.L ⁻¹)	
	V	B
1	0,008	0,012
2	0,012	0,020
3	0,011	0,027
4	0,016	0,044
<i>s(qk)</i>	0,0019	0,0032

Nota: *s(qk)* es la desviación estándar de 12 mediciones (4 tratamientos por 3 réplicas).

Teniendo en cuenta los criterios de [19, 20] que clasifican los suelos como pobres con $E_1 < (3-4)$ mg P.kg⁻¹ y $C_p < 0,02$ mg.kg⁻¹, respectivamente, solo mediante la fertilización en bandas con altas dosis de P acumuladas se mantienen en el suelo formas de fosfatos fácilmente disponibles, correspondientes a suelos abastecidos en P.

El factor capacidad resultó con valores altos para ambos métodos de aplicación del fertilizante fosfórico y para todas las dosis (Tabla 4). Para las aplicaciones a voleo existió una correlación positiva respecto a la dosis de fertilizante fosfórico $R = 0,995$. Sin embargo, cuando se realizaron aplicaciones en bandas no existió un patrón definido respecto a la dosis, lo cual indica que el P de los suelos ferralíticos rojos compactados, en los que predominan las arcillas con carga dependiente del pH (como los óxidos e hidróxidos de Fe y Al) se mantiene en reservas potencialmente asimilables.

Tabla 4. Factor capacidad después de 1 minuto de intercambio isotópico afectado por los tratamientos de fertilización fosfórica.

Tratamiento	Factor capacidad (L.kg ⁻¹)	
	V	B
1	166	190
2	180	218
3	210	164
4	238	236
<i>s(qk)</i>	9,43	12,56

Nota: *s(qk)* es la desviación estándar de 12 mediciones (4 tratamientos por 3 réplicas).

El factor capacidad mostró valores inferiores a los suelos de Vietnam [21], pero superiores a los de un suelo ferralítico rojo de Cuba [22]. Valores mayores de 50 L.kg⁻¹ no permiten realizar un mejoramiento de la fertilidad fosfórica del suelo de una manera fácil y barata [19].

Las variaciones relativas de E_1 y C_p son superiores a las del cociente E_1/C_p , del mismo modo que reportaron [23]. Esto significa que los factores intensidad y cantidad pueden ser modificados de manera significativa, mientras que el factor capacidad aparece como una

fuerte característica del suelo. Desde el punto de vista de química de suelos, se confirma que las aplicaciones frescas de fertilizantes fosfóricos son más adecuadas que las aplicaciones a largo plazo en estos suelos con un alto poder de sorción del P.

Un alto poder buffer fosfórico en suelos ferralíticos rojos con dosis mayores a 180 kg. P_2O_5 .ha⁻¹ se determinó por [24]. En un suelo Alfisol con bajo contenido del P disponible, hasta el 60 % del P aplicado puede ser sorbido en el suelo [25]. Bajo tal circunstancia la capacidad de sorción de los fosfatos debe ser enfrentada mediante la aplicación de P como fertilizante para incrementar los rendimientos de los cultivos.

En general, la respuesta de los cultivos al fertilizante fosfórico es mayor con las aplicaciones en bandas, en suelos con bajo contenido de P o en suelos con mayor capacidad de sorción de los fosfatos [26]. En los suelos ferralíticos rojos compactados bajo estudio ambas condiciones están presentes. Las aplicaciones anuales repetidas de fertilizante fosfórico son más rentables y se incrementan con el tiempo [27].

Como la disponibilidad del P para las plantas depende de los factores intensidad, cantidad y capacidad, el P isotópicamente intercambiable fue un buen estimador del P biodisponible como ha sido demostrado también por otros investigadores [7, 18]. Con el método de la cinética de intercambio isotópico, la dinámica del P no depende de la concentración inicial de fosfatos debido a que el método marca tanto el P aplicado, el cual interacciona con el suelo, como el P preexistente en el suelo. Por lo tanto, es posible utilizar este enfoque isotópico para analizar la evolución del P en todo el sistema. Dicho método ha demostrado que la difusión de los iones fosfato en la interfase suelo-solución, a través del tiempo, debido a un gradiente de concentración es el proceso predominante que gobierna la disponibilidad de P en suelos bajo cultivo agrícola [7, 18].

Conclusiones

La evaluación isotópica mediante ³²P indicó que el suelo ferralítico rojo compactado presenta una alta capacidad de retención de los fosfatos, pero mantiene una reserva importante como parte del factor capacidad, que puede ser utilizado por los cultivos a mediano plazo. El sistema de fertilización tiene un efecto mayor que la dosis de fertilizante aplicado en relación a los factores intensidad y cantidad. Es mejor la aplicación de fertilizante fosfórico en bandas para lograr un efecto acumulativo del P en el suelo e incrementar su disponibilidad para las plantas.

Agradecimientos

Se agradecen el financiamiento del OIEA, el análisis isotópico del ³²P que gentilmente brindó J.C. Fardeau, CEA Department, Francia, las muestras de suelo ofrecidas por J.L. Herrera y las inestimables sugerencias de J. Herrera.

Referencias bibliográficas

- [1] SHARPLEY A, DANIELS M, VANDEVENDER K & SLATON N. Soil phosphorus: management and recommendations. Fact Sheet Agriculture 1029. University of Arkansas, 2011.
- [2] SHEN J, YUAN L, ZHANG J, et. al. Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant Physiology*. 2011; 156(3): 997-1005.
- [3] BIBISO M, TADDESSE AM, GEBREKIDAN H & MELESE A. Evaluation of universal extractants for determination of some macronutrients from soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2015; 46(19): 2425-2448.
- [4] YANG X & POST WM. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: a synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences*. 2011; 8(10): 2907-2916.
- [5] GARCÍA A, HERNÁNDEZ G, NUVIOLA A, et. al. Fuentes fosfóricas de diferente solubilidad para frijol común evaluadas por método isotópico. *Agronomía Mesoamericana*. 2005; 16(2): 161-170.
- [6] FARDEAU JC. Le phosphore assimilable des sols: sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. *Agronomie*. 1993; 13(4): 317-331. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:19930409>
- [7] FARDEAU JC. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fertilizer Researc*. 1995; 45(2): 91-100. doi:10.1007/BF00790658
- [8] HERNÁNDEZ A, PÉREZ J, BOSCH D, et. al. Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba. La Habana: Instituto de Suelos, 1999. 64 p.
- [9] Norma Cubana. Calidad del suelo. Determinación del pH y la conductividad eléctrica en el extracto de saturación. NC. 32. 2009.
- [10] Norma Cubana. Calidad del Suelo. Determinación de los componentes orgánicos. NC. 1043. 2014.
- [11] Norma Cubana. Calidad del Suelo. Determinación de las formas móviles del fósforo y el potasio. NC. 52. 1999.
- [12] JOHN MK. Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant materials with ascorbic acid. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1970; 109(4): 214-220.
- [13] RANDRIAMANANTSOA L, MOREL C, RABEHARISOA L, et. al. Can the isotopic exchange kinetic method be used in soils with a very low water extractable phosphate content and a high sorbing capacity for phosphate ions?. *Geoderma*. 2013; 200-201: 120-129.
- [14] VU DT, ARMSTRONG RD, SALE PWG & TANG C. Phosphorus availability for three crop species as a function of soil type and fertilizer history. *Plant and Soil*. 2010; 337(1): 497-510.
- [15] GARCÍA A. Evaluation of selected soil and nutrient management practices to improve the fertility and productivity of acid soils of Cuba. Report of the Third Research Co-ordination Meeting. IAEA Co-ordinated Research Project. Ouagadougou, Burkina Faso. August 2003.
- [16] MEJÍAS JH, ALFARO M, HARSH J. Approaching environmental phosphorus limits on a volcanic soil of Southern Chile. *Geoderma* 2013; 207-208: 49-57.
- [17] ZIADI N, WHALEN JK, MESSIGA AJ & MOREL C. Assessment and modeling of soil available phosphorus in sustainable cropping systems. In: *Advances in Agronomy*. 1st Edition. Academic Press, 2013. Vol. 122. Chapter 2. pp. 85-126.
- [18] FROSSARD E, FARDEAU JC, BROSSARD M & MOREL JL. Soil isotopically exchangeable phosphorus: A comparison between E and L values. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1994; 58: 846-851.
- [19] IAEA. Use of isotope and radiation methods in soil and water management and crop nutrition. IAEA-TCS-14. Vienna: OIEA, 2001. 247 p.
- [20] BARBER SA. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. New York: Wiley Interscience and Sons, 1995. 414 p.
- [21] DOAN C, DANG N, TAM H, DAC L & THU L. Studies of the dynamics of soil phosphorus and agronomic effectiveness of phosphate fertilizers in particular PR in three main soil types of South Viet Nam. 2nd Res. Coord. Meeting FAO/IAEA CRP. Montpellier, France. 1995.
- [22] RODRÍGUEZ R, HERRERA J, GARCÍA A & NUVIOLA A. Enhancement of the agronomic effectiveness of phosphate rock in a Ferralsol from Cuba. IAEA-TECDOC-1272. Vienna: IAEA, 2002. p. 107-116.
- [23] FARDEAU JC, MOREL C & BONIFACE R. Cinétiques de transfert des ions phosphate du sol vers la solution du sol: paramètres

- caractéristiques. *Agronomie*. 1991; 11(9): 787-797. doi: 10.1051/agro:19910909.
- [24] PERALTA H. Sistemas de fertilización fosfórica de la papa en una secuencia de cultivos papa-maíz en un suelo Ferralítico Rojo compactado [tesis en opción al grado de Dr. en Ciencias Agrícolas]. La Habana: INCA, 1991.
- [25] GHOSAL P, CHAKRABORTY T & BANIK P. Phosphorus fixing capacity of the Oxic Rhodustalf— alfisol soil in the Chotanagpur plateau region of Eastern India. *Agricultural Sciences*. 2011; 2(4): 487-490. doi:10.4236/as.2011.24062.
- [26] BEEGLE DB & DURST PT. Managing Phosphorus for Crop Production. *Agronomy Facts* 13. CAT UC055. Penn State University, 2011.
- [27] LAMERS JPA, BRUENTRUP M & BUERKERT A. Financial performance of fertilisation strategies for sustainable soil fertility management in Sudano-Sahelian West Africa. 1: profitability of annual fertilisation strategies. *Nutr. Cycling in Agroec.* 2015; 102(1): 137-148.

Recibido: 18 de marzo de 2016

Aceptado: 26 de enero de 2017