

DISPONIBILIDAD DEL FÓSFORO EN SUELOS ÁCIDOS DE MISIONES, ARGENTINA¹

Phosphorus availability in acidic soils of Misiones, Argentina¹

Sara Vázquez², Luis Alberto Morales² y Humberto Carlos Dalurzo^{2*}

ABSTRACT

The ability to predict phosphorus needs and make appropriate recommendations is important not only from the economic point of view but also for environmental sustainability to protect against the effects of excessive fertilizer use. The objectives of this study were to determine the best P extracting solution to estimate P availability and to establish a routine analysis for tropical acid soils. A greenhouse experiment was conducted using ryegrass (*Lolium perenne* L.) as the plant index, and six acid soils of Misiones, Argentine, with three levels of P. The “t” test of means showed no differences between Bray 2-P with inorganic Olsen-P, total Olsen-P modified and bioavailable-P (P-Bio). But, there were significant differences with the Mehlich 1-P, total Olsen-P, organic Olsen-P, modified inorganic Olsen-P (P-OMi) and organic Olsen-P modified ($P < 0.05$). The correlation of extracted P for the eight methods resulted in $r > 0.8$ ($P < 0.01$). The regression equations obtained between the evaluated methods had high r^2 : 0.655 to 0.994 ($P \leq 0.01$). The P-Bio presented the lowest values of residual sum of squares, and achieved the best fit with the dry matter produced by aerial, roots and total parts, surpassing conventional methods and resulting in the best index of P availability for the acid soils of Misiones. The inorganic Olsen-P modified method followed in order of importance and given its analytical simplicity was selected as the most suitable method for routine analysis.

Key words: bioavailable-P, Bray 2, Mehlich 1, Olsen, tropical soils.

RESUMEN

La habilidad para predecir los requerimientos de P y realizar recomendaciones acertadas, es importante no sólo desde el punto de vista económico, sino también para la sustentabilidad del sistema al proteger el medio ambiente de los efectos perjudiciales del exceso de fertilizante. Los objetivos planteados fueron determinar la solución extractora de P que estima mejor su disponibilidad y establecer un análisis de rutina para suelos ácidos tropicales. Se estableció un ensayo en macetas en invernadero, usando como planta índice el ryegrass o ballica (*Lolium perenne* L.) y seis suelos ácidos de Misiones, Argentina, con tres niveles de P. La prueba t de medias no presentó diferencias entre P-Bray 2 con P-Olsen inorgánico, P-Olsen modificado total y P-biodisponible (P-Bio), pero fueron diferentes con el P-Mehlich 1, P-Olsen total, P-Olsen orgánico, P-Olsen modificado inorgánico (P-OMi) y P-Olsen modificado orgánico ($P \leq 0,05$). Las correlaciones del P extractado por los ocho métodos resultaron con $r > 0,8$ ($P \leq 0,01$). Las ecuaciones de regresión obtenidas entre los métodos evaluados mostraron elevados valores de r^2 de 0,655 a 0,994 ($P \leq 0,01$). El P-Bio presentó los valores más bajos de sumas de cuadrados residuales ponderadas ajustando mejor con la materia seca producida por la parte aérea, raíces y total, superando a los métodos convencionales, resultando el mejor índice de disponibilidad de P, para suelos ácidos de Misiones. El método Olsen modificado inorgánico le siguió en orden de importancia y dada su mayor simplicidad analítica, se lo seleccionó como el más adecuado para análisis de rutina.

Palabras clave: P-biodisponible, Bray 2, Mehlich 1, Olsen, suelos tropicales.

¹ Recepción de originales: 05 de junio de 2002.

Trabajo financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.

² Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ciencias Agrarias, Sargento Cabral 2131, 3400 Corrientes, Argentina.

E-mail: dalurzo@agr.unne.edu.ar *Autor para correspondencia.

INTRODUCCIÓN

Los suelos altamente meteorizados de trópicos y subtropicos húmedos a menudo presentan bajos contenidos de P disponible, debido a la alta sorción del Fe y Al activos, no cristalinos. Para alcanzar los niveles críticos de P en la solución del suelo se hace imprescindible la incorporación de fertilizantes (Sánchez, 1981). La habilidad para predecir los requerimientos y realizar recomendaciones acertadas es importante desde el punto de vista económico y para la protección del medio ambiente de los efectos perjudiciales del exceso de P.

La disponibilidad de P en los suelos está regulada por procesos geoquímicos y biológicos. En la mayoría de los ecosistemas naturales, los procesos geoquímicos determinan su distribución en el largo plazo, pero, en el corto tiempo, influyen preferentemente los procesos biológicos, ya que el P asimilable por la planta deriva de la materia orgánica (Cross y Schelesinger, 1995).

Actualmente se usan distintas soluciones extractivas para estimar los requerimientos de fertilizantes y representar un índice de P asimilable. Estos análisis de suelos, sin embargo, ignoran los reservorios de P orgánico (Po) e inorgánico (Pi) menos disponibles, siendo poco satisfactorios para predecir la absorción por la planta en Ultisoles y Oxisoles ácidos, particularmente en sistemas de bajos insumos (Beck y Sánchez, 1994). Sánchez *et al.* (1991) encontraron en Ultisoles de Yurimaguas, Perú, un fuerte agotamiento en el horizonte superficial del P disponible con niveles de P Olsen (P-O) menores a $5 \mu\text{g g}^{-1}$, aun cuando la respuesta a la fertilización era prácticamente nula. Szott (1987) observó que los niveles de P-O, después de una caída inicial, se mantenían constantes durante ocho meses, a pesar de que la biomasa continuaba acumulando considerables cantidades de P. En los suelos muy meteorizados, el Po y las fracciones de Pi menos lábiles, no detectados por los análisis comunes, contribuyen con el P absorbido por la planta (Tiessen *et al.*, 1984). La fracción de Po extraído en NaHCO_3 0,5 M (Bowman y Cole, 1987) puede ser fácilmente mineralizada cuando el P asimilable alcanza concentraciones críticas (Sharpley y Smith, 1985).

Thien y Myers (1992) propusieron un método para la extracción de P como índice de asimilabilidad, que incluía la dinámica del Pi y del Po, llamándolo P bioasimilable (P-Bio). Este procedimiento asume que al estimular las actividades de los microorganismos para acumular P de los reservorios inorgánicos y orgánicos más lábiles, éstas se aproximarían a sus actividades rizosféricas determinando la disponibilidad neta de P para la planta. Utilizando una captura microbial del P lábil se puede obtener un índice de P-Bio que incluye las fuentes inorgánicas y orgánicas de P.

El objetivo del presente trabajo fue determinar: (a) la solución extractora de P que mejor estima la disponibilidad de P para la planta a través de sus relaciones con los contenidos y absorción de P y producción de materia seca del ryegrass (*Lolium perenne* L.), y (b) establecer un análisis de rutina para suelos ácidos tropicales de Misiones, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras de suelo de epipedones de tres órdenes (Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles) representativos de los suelos rojos del sur de la Provincia de Misiones, de una zona comprendida entre los paralelos $27^{\circ}20'$ y $28^{\circ}10'$ lat. Sur y los meridianos $55^{\circ}10'$ y $56^{\circ}00'$ long. Oeste. Los suelos pertenecientes a los Alfisoles (Kandiudalf Ródico y Kandiudalf Mólico) se hallaban ubicados en la región natural llamada "pediplanos parcialmente disectados cubiertos por vegetación herbácea" (250 m.s.n.m.) y los suelos de mayor evolución, Ultisoles (dos Kandihumultes Típicos) y Oxisoles (Hapludox Húmico y Eutrudox Ródico), en los "pediplanos parcialmente disectados cubiertos por vegetación selvática" y en la "meseta central preservada", ambas de mayor altitud sobre el nivel del mar (350 m.s.n.m.). Las características de los mismos se detallan en el Cuadro 1. Se determinó: contenido de arcilla, limo y arena (Dewis y Freitas, 1970); pH en suspensión suelo:agua 1:2,5; carbono orgánico (CO) por Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1996). El Al (Al_{int}), acidez (Ac_{int}) y bases intercambiables (S_{int}) se desplazaron con solución

acuosa de NaCl 1 M determinándose Al_{int} y Ac_{int} por titulación (Dewis y Freitas, 1970).

Para cada muestra se realizaron tres tratamientos de P con tres repeticiones: 1) sin agregado de P (P0); 2) con una cantidad equivalente a la obtenida de las isotermas de adsorción cuando la concentración de P en solución fue de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ (P1); y 3) con el doble de la concentración de P usada en el caso anterior (P2). La cantidad del P1 agregada se determinó a partir de las isotermas de adsorción mediante el método de Fox y Kamprath (1970). El P fue agregado como KH_2PO_4 disuelto con la cantidad de agua necesaria para llevar las muestras de suelo a humedad equivalente a la capacidad de campo. Luego de la aplicación de los tratamientos se permitió su estabilización a temperaturas de $28\text{-}30^\circ\text{C}$ por un período de 21 días. Al final de este período, los distintos tratamientos se secaron al aire, se molieron y tamizaron por malla de 2 mm y se realizaron las extracciones de P por los siguientes métodos: Bray 2 (Bray y Kurtz, 1945), Mehlich 1 (Nelson *et al.*, 1953), Olsen (P-O) (Olsen y Sommers, 1982), y Olsen modificado (P-OM) con una relación suelo:extractante (1:10) (Thien y Myers, 1992).

En las dos formas de Olsen se determinó el contenido de P de la materia orgánica disuelta por el extractante NaHCO_3 , mediante la digestión a 150°C durante 30 min. En alícuotas de los extractos con 0,5 g de $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ y 3 mL H_2SO_4 2,5 M, y luego de neutralizar con NaOH saturado y *p*-

nitrofenol como indicador, se determinó el P total disuelto por cada uno de los extractantes (P-Ot, P-OMt) y por diferencia con el contenido de Pi de los extractos sin digestión (P-Oi, P-OMi,) se obtuvo el Po (P-Oo, P-OMo) (Bowman, 1989). El índice de P-Bio se determinó evaluando la dinámica del Pi y Po mediante el esquema de partición propuesto por Thien y Myers (1992).

A fin de determinar la producción de MS producida, contenidos de P y cantidad de P absorbido por la planta, se estableció un ensayo de invernadero con los suelos tratados y estabilizados siguiendo un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones, de acuerdo al método de Neubauer descrito por Sattells y Morris (1992), utilizando como planta índice el ryegrass o ballica (*Lolium perenne* L.). Pevio a la siembra, todos los tratamientos recibieron una solución de urea (12,5 mg de N) más KNO_3 (4,48 mg de N y 12,5 mg de K). Durante la experiencia los suelos se mantuvieron a capacidad de campo y en dos oportunidades se agregaron 7,5 mg de N en solución como NH_4NO_3 . A los 25 días, las plantas se cosecharon, lavaron con agua destilada y secaron en estufa a 70°C . Se determinó peso seco de la parte aérea (MSa), de raíces (MSr) y la MS total (MSt) por la suma de ambas. Luego de la molienda y tamizado por malla de 0,5 mm, se realizó una digestión nítrica sulfúrica perclórica para la determinación del contenido de P de la parte aérea (P-Aérea), raíces (P-Raíces) y planta completa (P-Planta). Se calculó el P absorbido a partir de los contenidos y la producción de MS por maceta

Cuadro 1. Propiedades edáficas de los seis suelos seleccionados, y P aplicado para lograr una concentración en la solución del suelo de $0,2 \text{ mg P L}^{-1}$.

Table 1. Edaphic properties of the six selected soils and P applied to achieve a soil solution concentration of 0.2 mg P L^{-1} .

Grandes grupos	pH	Arcilla	CO %	Bases	Ca	Al cmol+kg ⁻¹	CIC	P _{soi} # mg L ⁻¹
Kandiudalf Mólico	5,00	64	1,75	6,72	6,19	0,67	8,07	97
Kandihumult Típico	4,86	60	3,07	11,42	8,42	0,56	12,43	110
Kandihumult Típico	4,57	62	2,69	10,10	7,24	0,79	11,19	110
Hapludox Húmico	4,41	78	1,96	4,44	3,55	6,87	12,83	278
Eutradox Ródico	4,98	71	1,57	6,39	5,03	1,81	8,99	198

CO: carbono orgánico; CIC: capacidad de intercambio catiónico; P_{soi}# es la cantidad de P agregado al tratamiento P2 para lograr una concentración en la solución del suelo de $0,2 \text{ mg P L}^{-1}$ según se determinó con isotermas de sorción (Fox y Kamprath, 1970).

para la parte aérea (A-Aérea), por las raíces (A-Raíces) y el total (A-Planta). El contenido de P en todos los extractos de suelos y en el material vegetal se determinó por el método de Murphy-Riley (Olsen y Sommers, 1982).

Se realizaron análisis de correlación entre métodos y prueba t de medias de dos muestras apareadas; correlaciones entre producción de MS, contenido y absorción de P en las diferentes partes de la planta con el P extractado por las diferentes soluciones; análisis de regresión, con una inspección gráfica previa, de las relaciones entre los parámetros de la planta con los contenidos de P extractados, para determinar el modelo de mejor ajuste. Para la estimación de los coeficientes del modelo se empleó el procedimiento no lineal (SAS Institute, 1994), y se tomó como criterio de selección la menor suma de cuadrados residuales, la cual se ponderó por la cantidad de P agregado a cada tratamiento. Los análisis estadísticos fueron realizados con el Programa SAS (SAS Institute, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los seis suelos estudiados (Cuadro 1) presentaron variaciones de C orgánico, Al intercambiable y en su capacidad de adsorción de P, puesta de manifiesto en la cantidad necesaria para alcanzar una concentración de 0,2 mg L⁻¹ en solución (Vázquez y Morales, 2000). Las correlaciones de los contenidos de P disponible extraídos por los diferentes métodos fueron altamente significativas ($r > 0,8$ y $P \leq 0,01$) (Figura 1). La prueba t de medias de dos muestras apareadas no presentaron diferencias significativas entre Bray 2 con P-Oi, P-OMt y P-Bio. Sin embargo, en los testigos el contenido fue menor con respecto al del P-OMt y P-Bio, pudiendo ser atribuido a que la fracción de Po no es considerada por Bray 2. El contenido de P Olsen inorgánico no presentó diferencias significativas de medias con el P-OMt y con P-Bio como se hubiera esperado, dado que estos últimos no sólo contemplan la dinámica del Pi, sino también la del Po.

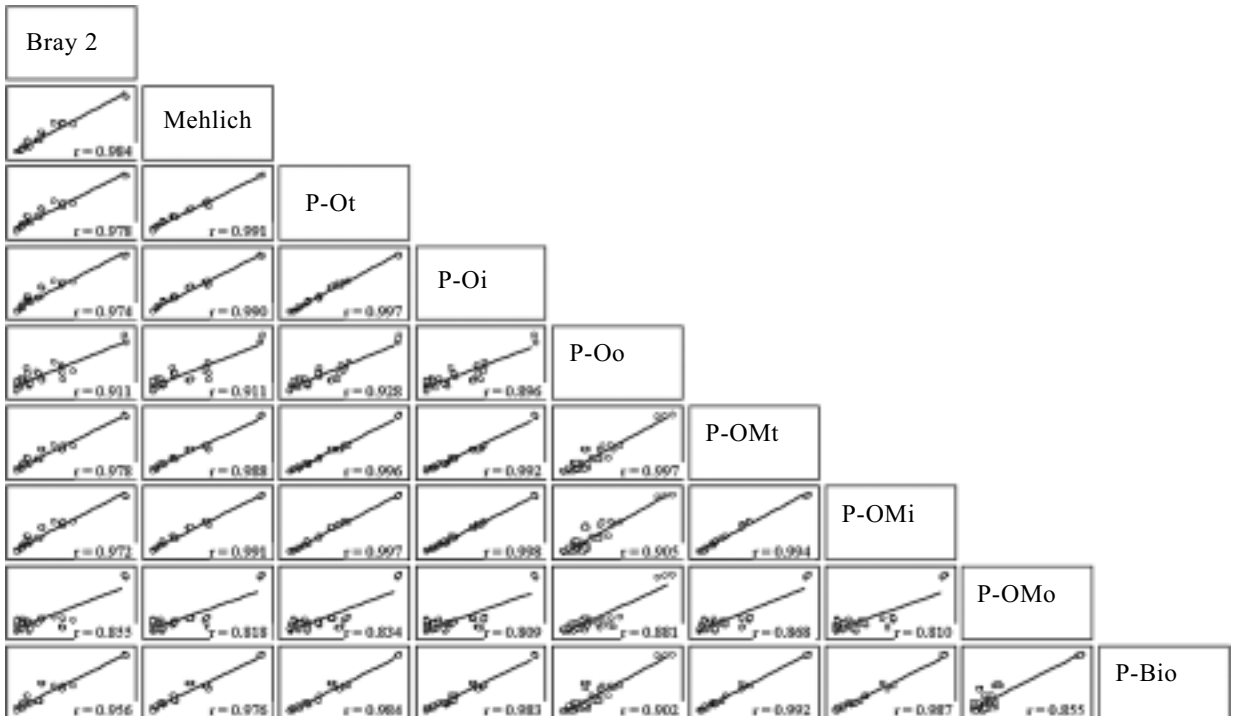


Figura 1. Gráficos de dispersión de correlaciones de P disponible extractados por Bray 2, Mehlich 1, P biodisponible (P-Bio), Olsen total (P-Ot), Olsen inorgánico (P-Oi), Olsen orgánico (P-Oo), Olsen modificado total (P-OMt), Olsen modificado inorgánico (P-OMi), y Olsen modificado orgánico (P-OMo).
 Figure 1. Scatter plots of P correlations of phosphorus available extracted by methods: Bray 2, Mehlich 1, P bioavailable (P-Bio), total Olsen (P-Ot), inorganic Olsen (P-Oi), organic Olsen (P-Oo), total modified Olsen (P-OMt), inorganic modified Olsen (P-OMi), and organic modified Olsen (P-OMo).

Es posible que esta situación se haya presentado debido a la alta relación suelo:extractante utilizada en los métodos P-OMt y P-Bio, no siendo la cantidad de solución suficiente para extraer todo el P de la muestra. De igual forma el P-OMt no presentó diferencias significativas con respecto al P-Bio, aunque este último tiene en consideración la fracción correspondiente al P microbiano. Estos métodos presentaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con Mehlich 1, P-Ot, P-Oo, P-OMi y P-OMo. Teniendo en cuenta las altas correlaciones obtenidas entre estos métodos y que las cantidades extraídas, en todos los casos, variaron en concordancia con el P fertilizante agregado en cada tratamiento, se podría decir que son intercambiables e igualmente efectivos para la estimación del P disponible para las plantas.

Las ecuaciones de regresión obtenidas entre los métodos evaluados mostraron elevados valores de r^2 de 0,655 a 0,994 (Cuadro 2), con alta significancia estadística ($P < 0,01$). El P-Bio, P-OMt y P-OMi presentaron los mayores valores de r^2 con el resto de los métodos. El 99,5% de la variancia del P-Bio, fue explicada por el P-Oi y la menor (73%) se obtuvo con el P-OMo, dada la preponderancia de las fracciones orgánicas sobre las inorgánicas, siendo los valores de r^2 más bajos para este método (0,655 a 0,777) en la mayoría de los casos. Thien y Myers (1992) hallaron resultados similares en suelos de Estados Unidos.

Los métodos de P-OMi y P-OMt obtuvieron elevadas explicaciones de la variancia del P-Bio, 97,5 y 98,4 respectivamente, acordes a los siguientes modelos de regresión:

$$P\text{-Bio} = 11,525 + 1,034 P\text{-OMi}; r^2 = 0,975.$$

$$P\text{-Bio} = 5,481 + 0,88 P\text{-OMt}; r^2 = 0,984.$$

El análisis de correlación realizado con las distintas soluciones extractivas con la MS producida, los contenidos de P, y el P absorbido por las diferentes partes de la planta (Figura 2) fueron altamente significativas ($r > 0,4$ y $P \leq 0,01$). Debido a que los coeficientes de correlación li-

neal no permitieron escoger cuál de los métodos utilizados explicaba con mayor precisión su relación con los parámetros de la planta, se utilizó para el ajuste de los mismos un modelo cuadrático y de meseta, luego de la inspección gráfica de los resultados.

Los métodos ajustados con el modelo fueron: Bray 2, Mehlich, Olsen total, Olsen inorgánico, Olsen modificado total, Olsen modificado inorgánico, y P biodisponible. Los valores más bajos de sumas de cuadrados residuales ponderadas (Cuadro 3) se obtuvieron para los ajustes con la MS. El método de P-Bio ajustó mejor con la MS producida por la parte aérea, raíces y total. Las variaciones porcentuales de los otros análisis con respecto al P-Bio fueron superiores, desde 34 a 114%. Los ajustes de los métodos convencionales con los contenidos de P y el absorbido por las diferentes partes de la planta fueron netamente inferiores al logrado por el índice de P-Bio, aunque debe destacarse que, dentro de estos métodos, el ajuste del Olsen modificado inorgánico es superior en un 10% al P-Bio para los contenidos de P en la parte aérea, y con un comportamiento muy similar en la suma de cuadrados residuales ponderados con respecto al P de la planta, de raíces y el absorbido de la parte aérea, de raíces y de la planta completa, lo que haría de este método el más adecuado para análisis de rutina debido a su mayor simplicidad y rapidez de determinación con respecto al P-Bio.

CONCLUSIONES

El método del P-biodisponible logró el mejor ajuste con el absorbido por la planta y producción de MS, superando a los métodos convencionales, resultando el mejor índice de disponibilidad de P, para suelos ácidos de Misiones.

El método Olsen modificado inorgánico le siguió en orden de importancia y dada su mayor simplicidad analítica, se lo seleccionó como el más adecuado para análisis de rutina.

Cuadro 2. Ecuaciones de regresión lineal entre los métodos de determinación de P disponible, consignando el intercepto (interc.), la pendiente (pend.) y el valor de r^2 en suelos ácidos tropicales del nordeste argentino.

Table 2. Lineal regression equations between analytical methods of determination of available P, with the intercept (interc.), slope (pend.) and the r^2 value in acid tropical soils of northeastern Argentina.

	Bray 2		Mehlich		P-Olsen total		P-Olsen inorgánico		P-Olsen orgánico		P-Olsen modificado total		P-Olsen modificado inorgánico		P-Olsen modificado orgánico									
	Pend.	Interc.	Pend.	Interc.	Pend.	Interc.	Pend.	Interc.	Pend.	Interc.	Pend.	Interc.	Pend.	Interc.	Pend.	Interc.								
Mehlich	0,736	1,458	0,968																					
P-Olsen total	0,886	21,822	0,956	1,202	20,169	0,983																		
P-Olsen inorgánico	0,739	9,254	0,948	1,005	7,763	0,981	0,835	-8,997	0,994															
P-Olsen orgánico	0,147	12,568	0,830	0,196	12,405	0,829	0,165	8,997	0,861	0,190	11,124	0,802												
P-Olsen modif. total	0,649	14,010	0,957	0,877	12,937	0,977	0,729	-1,729	0,991	0,867	6,404	0,984	3,814	-29,482	0,859									
P-Olsen modif. inorg.	0,547	6,357	0,944	0,745	5,174	0,982	0,618	-7,206	0,993	0,739	-0,469	0,995	3,158	-29,196	0,820	0,843	-5,485	0,989						
P-Olsen modif. orgán	0,103	7,654	0,731	0,131	7,764	0,669	0,111	5,477	0,696	0,128	6,874	0,655	0,657	-0,286	0,777	0,157	5,485	0,754	0,173	6,959	0,657			
P-biodisponible	0,563	18,206	0,913	0,768	16,960	0,952	0,639	4,095	0,967	0,762	11,116	0,966	3,292	-19,211	0,813	0,880	5,481	0,984	1,034	11,525	0,975	4,186	-7,197	0,730

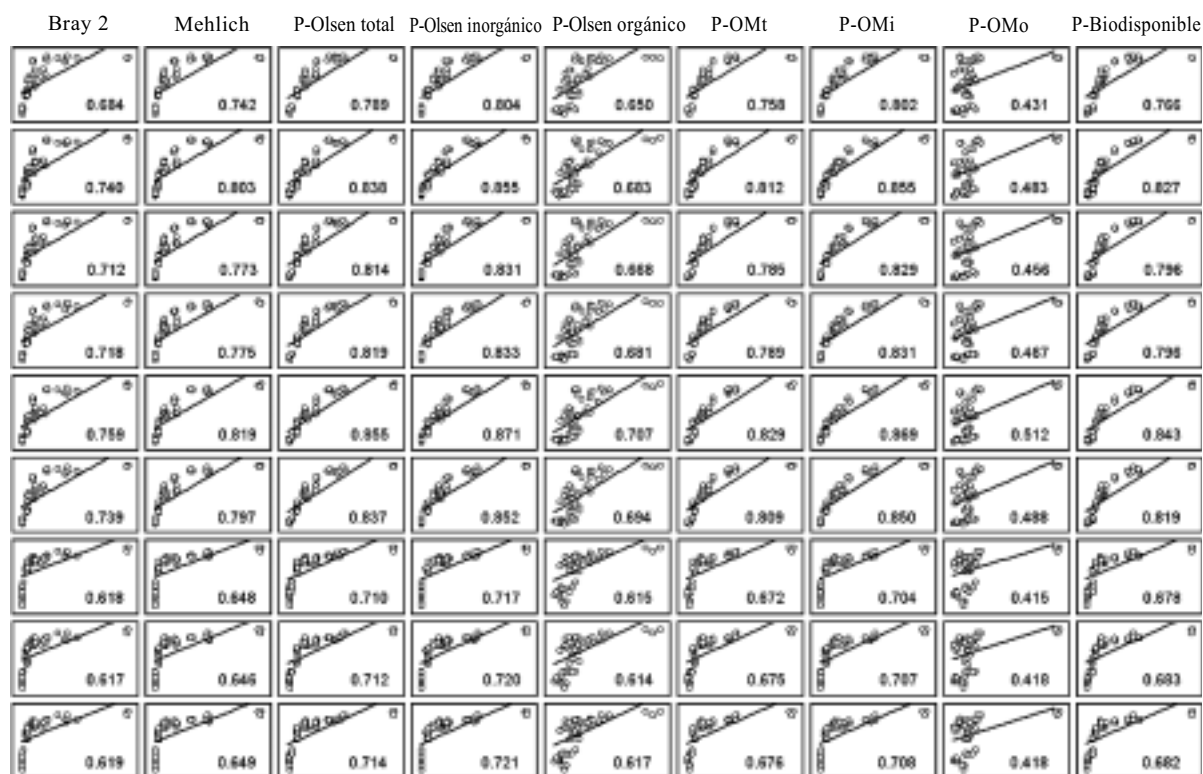


Figura 2. Correlación entre métodos de P disponible: P-Omt, Olsen modificado total, P-OMi: Olsen modificado inorgánico, P-OMo Olsen modificado orgánico con el P de partes de la planta (P-Aérea; P-Raíces; P-Planta) y P absorbido (A-Aérea; A-Raíces; A-Planta).

Figure 2. Correlations between the available P methods: P-OMt: total Olsen modified, P-OMi: inorganic Olsen modified, P-OMo organic Olsen modified, with the P of aerial (P-Aérea), root (P-Raíces) and complete plant portions (P-Planta) and P absorption (A-Aérea; A-Raíces; A-Planta).

Cuadro 3. Suma de cuadrados residuales de los métodos ajustados entre Bray 2, Mehlich 1, Olsen total (P-Ot), Olsen inorgánico (P-Oi), Olsen modificado total (P-OMt), Olsen modificado inorgánico (P-OMi) y biodisponible (P-Bio) con el P de la parte aérea (P-Aérea), de raíces (P-Raíces), de la planta completa (P-Planta), el absorbido por la parte aérea (A-Aérea), por raíces (A-Raíces) y el total (A-Planta), materia seca de la parte aérea (MSa), de raíces (MSr) y total (MSt).

Table 3. Residual sum of squares of fitted methods between Bray 2, Mehlich 1, total Olsen (P-Ot), inorganic Olsen (P-Oi), total modified Olsen (P-OMt), inorganic modified Olsen (P-OMi), and P bioavailable (P-Bio), with the P in aerial (P-Aérea), root (P-Raíces), and complete plant portions (P-Planta), and the absorption by the aerial (A-Aérea), root (A-Raíces) and total portions (A-Planta), and aerial dry matter (MSa), root dry matter (MSr) and total dry matter (MSt).

	P-Aérea	P-Raíces	P-Planta	A-Aérea	A-Raíces	A-Planta	MSa	MSr	MSt
Bray 2	1.866	1.289	1.456	1.264	1.039	4.354	17	17	68
Mehlich1	1.727	1.025	1.304	1.194	912	4.068	18	17	69
P-Ot	1.107	714	832	739	574	2.542	14	14	53
P-Oi	1.066	605	752	715	510	2.347	18	17	68
P-OMt	758	514	579	572	465	2.023	17	17	66
P-OMi	553	378	397	444	404	1.597	18	17	70
P-Bio	617	309	395	430	341	1.469	10	10	38

LITERATURA CITADA

- Beck, M.A., and P.A. Sánchez. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on Typic Paleudult. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1424-1431.
- Bowman, R.A. 1989. A sequential extraction procedure with concentrate sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:362-366.
- Bowman, R.A., and C.V. Cole. 1987. Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO_3 extraction. *Soil Sci.* 125:49-54.
- Bray, R.H., and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Cross, A.F., and W.H. Schelesinger. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* 64:197-214.
- Dewis, J., y F. Freitas. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Boletín sobre suelos N° 10. 252 p. FAO, Roma, Italia.
- Fox, R.L., and E.J. Kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluation the phosphate requirements of soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34:902-907.
- Nelson, W.L., A. Mehlich, and E. Winters. 1953. The development, evaluation, and use of soil test for phosphorus availability. *Agronomy* 4:153-188.
- Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. p. 961-1010. *In* J.M. Bigham (ed.). *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods.* ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Olsen, S.R., and L.E. Sommers, 1982. Phosphorus. p. 403-430. *In* A. L. Page *et al.* (eds.) *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Sánchez, P.A. 1981. Suelos del trópico. Características y manejo. 634 p. Traducido al español: Edilberto Camacho. IICA, San José, Costa Rica.
- Sánchez, P.A., C.A. Palm, and T.J. Smyth. 1991. Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems. p. 146-160. *In* H. Tiessen *et al.* (eds.) SCOPE-UNEP Regional Workshop 3: South Central America. Inst. Pedology, Saskatoon, Canada.
- SAS Institute. 1994. SAS STAT user's guide. Version 6. 1686 p. 4th ed. Vol.1. SAS Inst., Cary, North Carolina, USA.
- Sattells, R.R., and R.A. Morris. 1992. Phosphorus fractions and availability in Sri Lankan Alfisols. *Soil Sci. Am. J.* 56:1510-1515.
- Sharpley, A.N., and S.J. Smith. 1985. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:127-130.
- Szot, L.T. 1987. Improving the productivity of shifting cultivation in the Amazon Basin of Peru through the use of leguminous vegetation. Ph.D. diss. North Carolina State Univ., Raleigh, North Carolina, USA. (Diss. Abstr. 88-04827).
- Thien, S.J., and R. Myers. 1992. Determination of bioavailable phosphorus in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:814-818.
- Tiessen, H., B. Stewart, and C. Cole. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:853-858.
- Vázquez, S., y L.A. Morales. 2000. Adsorción de fósforo en relación a las características de suelos ácidos de Misiones, Argentina. *Revista de la Ciencia del Suelo* 18:89-94.