

## EVALUACION DEL FOSFORO RESIDUAL EN SUELOS FERTILIZADOS: COMPARACION ENTRE BRAY I, BRAY II, OLSEN Y PUNTO NULO (P EN SOLUCION)

Rodolfo E. Mendoza (1) y Liliana Marbán (2)

(1) Centro de Ecofisiología Vegetal. (CONICET). Serrano 665. 1414 Capital Federal.

(2) Laboratorio de Química Geológica y Edafológica (CONICET). Velasco 847. 1414 Capital Federal

### RESUMEN

Se estudió la evaluación del fósforo residual en 19 suelos fertilizados del sudeste bonaerense mediante la extracción de fósforo a través del tiempo con los métodos de Bray I, Bray II y Olsen. Los resultados se compararon con los obtenidos en un estudio similar, donde se midieron los cambios del fósforo en solución por el método del "punto nulo". El fósforo extraído por los tres métodos siempre disminuyó con el tiempo; sin embargo este efecto fue reflejado de modo distinto por los extractantes. En el caso de Bray II, la disminución del fósforo extraído con el tiempo no fue significativa ( $P < 0,05$ ) en ninguno de los 19 suelos; en Bray I, sólo en 5 suelos el efecto del tiempo fue significativo, mientras que en Olsen en 14 de los 19 suelos la disminución del fósforo extraído con el tiempo fue significativa. Cuando se comparó el efecto del tiempo sobre el fósforo extraído por las tres soluciones con el efecto del tiempo sobre el fósforo en solución (punto nulo) sólo se encontró correlación en el caso de Olsen ( $P < 0,05$ ).

Palabras clave: P residual, P extraído, P en solución, suelos fertilizados.

### EVALUATION OF RESIDUAL PHOSPHATE IN FERTILIZED SOILS: A COMPARISON AMONG BRAY I, BRAY II, OLSEN TESTS AND NULL POINT METHOD.

#### ABSTRACT

The residual phosphate measured by Bray I, Bray II and Olsen tests was studied in 19 fertilized soils collected from the southeast of Buenos Aires Province. These measures were compared with those obtained by the null point method in a similar study on the same soils.

The phosphate extracted by the three methods decreased with time, but this effect was reflected differently among extractants. The effect of time on phosphate extracted was: no significant ( $P < 0,05$ ) for Bray II for all the soils; significant in 5 cases for Bray I, and in 14 soils for Olsen test. The null point method and the Olsen test were consistent in showing the effect of time on the changes of residual phosphate; hence the two methods were correlated between them ( $P < 0,05$ ).

Key words: residual P, extracted P, P in soil solution, fertilized soils.

## INTRODUCCION

El diagnóstico de la fertilidad fosforada del suelo ha ofrecido ciertos inconvenientes en su interpretación y por lo tanto ha merecido la atención de investigadores en todas partes del mundo. Existen antecedentes de que el fósforo extraído del suelo por distintas soluciones no siempre ha correlacionado adecuadamente con el fósforo absorbido por la planta y con la producción vegetal (Barrow, 1967; Holford, 1980; Mendoza, 1989a). Estos trabajos se realizaron con suelos no fertilizados y heterogéneos en sus propiedades y procedencia; en estos casos, la corrección del valor obtenido del fósforo extraído en relación con el de la capacidad tampón de fosfato del suelo ha dado lugar a mejoras significativas en las correlaciones anteriormente mencionadas. Otros trabajos han indicado que teniendo en cuenta la cantidad de arcilla, óxidos de hierro y de aluminio, también podrían mejorar la relación entre el fósforo extraído y el fósforo absorbido (Kamprath y Watson, 1980; Mendoza, 1986).

En el caso de suelos que han recibido previamente fertilización con fósforo a través de un cierto período de tiempo se agrega un problema adicional en la evaluación del nivel de fertilidad por un método químico que es la consideración de la cantidad de fósforo ya presente en el suelo, sea por fertilizaciones previas o por el propio fósforo nativo.

La fertilización del cultivo de trigo con nitrógeno y fósforo en el sudeste de la provincia de Buenos Aires ha sido una práctica común en los últimos veinte años. Existen aquí suelos tanto con altos como con bajos valores de Bray I, en donde se ha obtenido una significativa respuesta al agregado de fósforo. Esto indicaría que el fósforo residual extraído del suelo por las plantas de trigo durante su período de crecimiento y por la solución de Bray I durante su período de agitación, difieren entre sí. Trabajos previos han indicado que en estos suelos la liberación de fósforo a la solución a través del tiempo varió en magnitud y dirección entre suelos, y dentro de un mismo suelo entre los niveles de fósforo agregado (Mendoza et al., 1990). La metodología empleada en ese estudio fue la medición de la concentración de fósforo en solución en el punto nulo de cambio durante un período de 30 días a 25°C. La concentración de fósforo en el punto nulo es aquella en la cual el suelo no adsorbe ni libera fósforo (Mendoza, 1989c).

En este artículo se ha intentado evaluar el fósforo residual en un grupo de suelos fertiliza-

dos del sudeste bonaerense mediante la comparación del efecto del factor tiempo sobre el fósforo del suelo, medido con las soluciones de Bray I, Bray II, Olsen y por el método del "punto nulo".

## Teoría

Al incorporar fósforo al suelo y posteriormente someterlo a una extracción química por un de-

Al incorporar fósforo al suelo y posteriormente someterlo a una extracción química por un determinado método, una ecuación básica para explicar la cantidad de fósforo removida del suelo podría ser la siguiente:

$$Pa + q = Pr + Pe \quad (1)$$

donde  $Pa$  representa al fósforo agregado,  $q$  a la cantidad de fósforo que ya contiene el suelo sea nativo o proveniente de fertilizaciones previas,  $Pe$  el fósforo obtenido en la solución extractante y  $Pr$  el fósforo agregado que ha sido retenido por el suelo. El término  $Pr$  incluye dos componentes: por un lado al fósforo retenido en capas superficiales de suelo y no extraíble por reactivos que contienen un anión desorbente de fósforo ( $F^-$ ;  $CO_3H^-$ ), y por otro lado, el fósforo retenido más firmemente por el suelo en categorías menos susceptibles a pasar rápidamente a la solución. Esta última cantidad aumenta con el tiempo; mientras que la primera es independiente del mismo y puede ser descrita mediante la ecuación de Freundlich (Mendoza y Barrow, 1987a). Una ecuación adecuada para describir los cambios de  $Pr$  a través del tiempo que incluye a los dos componentes podría ser la siguiente:

$$Pr = a c^{b_1} t^{b_2} \quad (2)$$

la Ec. (2) ha sido utilizada previamente por Kuo y Lotse (1974), Barrow y Shaw (1975), Probert (1983), Mendoza y Barrow (1987a, b) y otros autores; donde  $c$  es la concentración de fósforo en la solución extractante,  $t$  es el tiempo de contacto entre el suelo y el fósforo agregado y  $a$ ,  $b_1$  y  $b_2$  son coeficientes.

## MATERIALES Y METODOS

### Suelos utilizados

Se emplearon 19 muestras de suelo del horizonte superficial (0-10 cm) procedentes del sudeste de la provincia de Buenos Aires (partidos de Tres Arroyos y San Cayetano). Los suelos habían

recibido distintas cantidades de fósforo durante los últimos 10 años, pero solamente se ha obtenido información fiable en cuanto a dosis y manejo de los suelos a partir de 1983 (Tabla 1). La rotación típica de la zona corresponde a trigo-barbecho-trigo o trigo-girasol-trigo; en el caso de los suelos 11 y 12 estuvieron con pastura desde 1983 hasta 1986 y luego siguieron con la rotación típica ya mencionada. Algunas características de los suelos se observan en la Tabla 1. Los suelos muestreados se secaron al aire, se tamizaron por malla de 2 mm y se homogeneizaron cuidadosamente.

Tabla 1. Algunas características de los suelos estudiados.

Suelo	Clasificación	Fertilización 1983-1987. (kg P.ha <sup>-1</sup> )	pH (H <sub>2</sub> O)	% C	Bray I inicial (ppm)
1	Hapludol	35	6,3	2,0	9,4
2	Hapludol	26	6,3	1,9	8,7
3	Argiudol	32	6,0	2,7	16,1
4	Argiudol	30	5,9	2,4	7,8
5	Argiudol	26	5,9	2,7	6,4
6	Argiudol	40	6,0	2,4	9,0
7	Argiudol	38	5,9	2,7	8,6
8	Argiudol	30	6,1	2,6	6,8
9	Hapludol	22	6,0	2,8	7,4
10	Hapludol	30	6,0	2,8	10,0
11	Argiudol	12	6,2	1,7	5,8
12	Argiudol	10	5,8	3,0	6,0
13	Argiudol	22	5,8	2,9	15,5
14	Argiudol	22	6,0	2,6	9,4
15	Hapludol	32	5,5	1,6	10,1
16	Argiudol	38	5,9	2,2	7,5
17	Argiudol	46	5,9	2,9	11,4
18	Argiudol	42	6,0	2,7	17,5
19	Argiudol	12	5,9	2,7	8,9

#### Incubación de los suelos

Muestras de cada uno de los suelos se mezclaron con soluciones diluidas de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> en dos niveles que correspondieron a 30 y 60 µg P por gramo de suelo, además de un testigo sin agregado de fósforo. El volumen de solución fue suficiente como para elevar el contenido de humedad al 15 % en peso. A este nivel de humedad el suelo se puede mezclar fácilmente con la solución y puede ser cómodamente manejado. Las muestras húmedas y fertilizadas se incubaron en un ambiente húmedo a 25 °C y se tomaron submuestras para su análisis al cabo de 1, 3, 10 y 30 días de incubación.

#### Fósforo extractable y fósforo en solución (punto nulo)

Al cabo de los correspondientes períodos de incubación, se midió el fósforo extraído en las submuestras por los métodos de Bray I, Bray II y Olsen. En el caso de Bray I y Bray II (Bray y Kurtz, 1945) se empleó un período de agitación de 5 minutos, mientras que para Olsen (Olsen et al., 1954), la técnica no difirió de su versión original. El fósforo en solución se evaluó mediante la técnica del "punto nulo" (Mendoza et al., 1990). El análisis de fósforo se hizo por el método de Murphy y Riley (1962) teniendo en cuenta la humedad del suelo en cada caso.

#### Ecuaciones utilizadas

El fósforo extraído por las distintas soluciones se ajustó a una ecuación que combinó a las Ec. (1 y 2):

$$Pe = Pa - ac^{b_1} t^{b_2} + q \quad (3)$$

donde las variables  $Pe$  y  $c$  no son independientes una de la otra. El valor de  $Pe$  puede ser también calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$Pe = s \cdot c \quad (4)$$

donde  $s$  es la relación solución: suelo empleada en la extracción.

Debido a que la medición de  $c$  en la solución extractante arroja siempre un error, las Ec. (3) y (4) no obtienen igual resultado en el valor de  $Pe$ . Suponiendo un error por exceso en la medición de  $c$ , el valor de  $Pe$  en Ec. (4) sería mayor al real, mientras que en el caso de la Ec. (3) el valor de  $Pe$  sería inferior al real. Por otra parte, la sustitución de  $c$  en la Ec. (3) por  $Pe/s$  de la Ec. (4) resulta difícil de resolver por  $Pe$ . Una manera de solucionar este inconveniente es tratar a las Ec. (3) y (4) en forma simultánea hasta obtener por sucesivas aproximaciones el valor de  $c$  común a ambas ecuaciones y luego utilizar ese valor en la Ec. (3) para realizar el ajuste definitivo de los valores experimentales. La solución simultánea para el caso del suelo 9 a 1 día a 25 °C y el método de Olsen se observa en la Fig. 1.

Las desviaciones entre los valores observados y calculados de  $Pe$  estuvieron asociadas con la varianza; de aquí que los valores observados se transformaron a raíz cuadrada para el ajuste. Esta transformación fue la más satisfactoria para homogeneizar las desviaciones. Para el ajuste se empleó el método simplex de Nelder y Mead (1965).

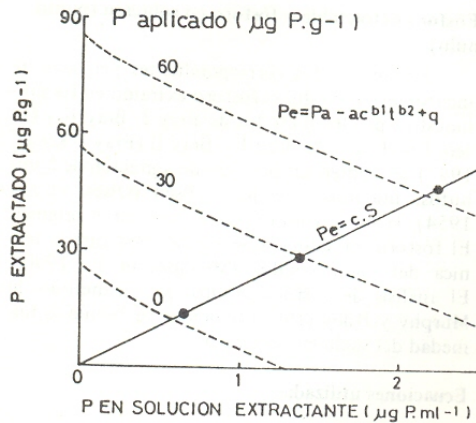


Fig. 1. Resolución simultánea de la Ec. (3) y la Ec. (4) para el método de Olsen para 1 día de incubación a 25° C. La línea recta y continua corresponde a la Ec. (4) y la curva punteada a la Ec. (3); la intersección de ambas líneas corresponde a la solución simultánea del valor de fósforo en la solución extractante.

**RESULTADOS**

**Efecto del tiempo sobre el fósforo retenido**

Para cada período de incubación, la Ec. (3) se puede escribir de la siguiente forma:

$$Pa - Pe = z c^{b_1} - q \tag{5}$$

donde el valor de  $z$  reemplaza al valor de  $at^{b_2}$  de la Ec. (3). Si representamos  $Pa - Pe$  versus  $c^{b_1}$  veremos que la Ec. (5) puede ser tratada como una recta, donde  $z$  es la pendiente y  $q$  la ordenada al origen. La Fig. 2 muestra que para el suelo 9 la pendiente  $z$  aumenta con el tiempo de incubación. La separación entre las rectas correspondientes a cada uno de los tiempos de incubación define al ritmo de aumento de  $z$  en el tiempo y está descrito por el valor de  $at^{b_2}$  (Ec. (3)). Un alto valor de  $b_2$  supone una mayor separación entre las rectas como consecuencia de que el fósforo retenido aumenta con el tiempo. En el caso del suelo 9 (Fig. 2) la menor separación entre rectas (menor valor de  $b_2$ ) se observó en Bray II. La Fig. 2 también ofrece un concepto sobre el valor  $q$ . De acuerdo con esta figura, el valor de  $q$  tiene un concepto potencial y representa a la cantidad de fósforo presente en el suelo (nativo o de fertilizaciones previas) que debería ser removida del mismo para ob-

tener una concentración de fósforo en el extracto igual a cero.

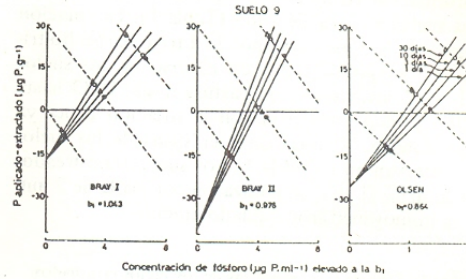


Fig. 2. Efecto del período de incubación sobre la relación entre el fósforo retenido y el fósforo en la solución extractante elevado a la  $b_1$  de la Ec. (3) para el suelo 9.

La Ec. (5) describe la curva de retención de fósforo para cada extractante a un valor de  $t$ ; el desplazamiento de la curva con el tiempo se describió reemplazando  $z$  por su función de tiempo a  $t^{b_2}$  (Ec. (3)). El valor de  $b_1$  describe la curvatura de la relación entre  $Pr$  y  $c$ ; en todos los casos el valor de  $b_1$  fue cercano a 1, e indica que la relación entre variables fue descrita por una recta. Sin embargo, se sabe que la relación entre  $Pr$  y  $c$  para extractantes es curva ( $b_1 < 1$ ) y también que la curvatura no varía con el tiempo (Mendoza y Barrow, 1987a). En este trabajo el objetivo fue estudiar el efecto de la variable tiempo sobre  $Pe$  y  $Pr$ ; de aquí que sólo se utilizaron tres niveles de fósforo que fueron suficientes para definir el efecto del tiempo pero no la relación de curvatura entre las variables.

**Relación entre el nivel de fósforo aplicado y el fósforo extraído**

La relación entre el fósforo extraído y el fósforo agregado fue directa, pero difirió para cada suelo entre los tres extractantes en dos aspectos principales: en la contribución del fósforo ya presente en el suelo al total extraído y en el efecto del tiempo (Fig. 3).

En los tratamientos donde no se agregó fósforo, las soluciones de Bray I y Olsen extrajeron cantidades similares de fósforo, y en los tratamientos con fósforo la contribución del ya presente en el suelo al total extraído estuvo también dentro de valores similares (Fig. 3). En el caso de Bray II sin agregado de fósforo, la cantidad extractada fue en todos los casos notoriamente mayor respecto de

Bray I y Olsen; sin embargo, la cantidad extractada cuando se agregó la mayor dosis de fósforo fue similar entre extractantes en algunos casos (suelos 9 y 17, Fig. 3). Este efecto determina que la pendiente de la relación de  $Pe$  vs  $Pa$ , sea menor con Bray II. En otras palabras, la proporción de la contribución del fósforo ya presente en el suelo al total extraído fue diferente en cada nivel de fósforo agregado de manera que fue mayor cuando no se agregó fósforo en Bray II que en Bray I y Olsen, mientras que al aumentar los niveles de adición de fósforo, la proporción extractada del fósforo agregado fue similar entre extractantes.

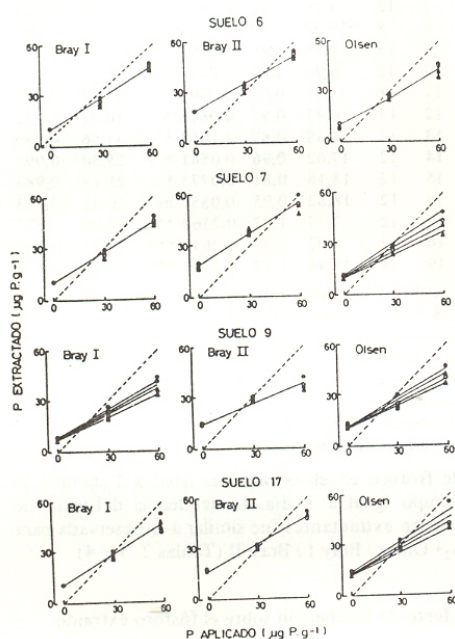


Fig. 3. Efecto de período de incubación sobre la relación entre el fósforo extraído y el fósforo aplicado para los suelos 6, 7, 9 y 17. La simbología es la misma que para la Fig. 2. En los casos donde el efecto del tiempo no fue significativo la línea de ajuste correspondió a una sola curva para los cuatro períodos de incubación.

El efecto del tiempo sobre la relación entre  $Pe$  y  $Pa$  también difirió entre extractantes (Fig. 3). El tiempo de incubación no afectó la cantidad de fósforo extraído con Bray II; con Bray I, sólo en cinco casos (suelos 3, 4, 9, 12 y 13) el efecto del tiempo fue significativo, mientras que con Olsen,

14 de los 19 suelos mostraron efectos del tiempo de incubación sobre el fósforo extraído (Fig. 3, Tablas 2, 3 y 4).

Tabla 2. Valor de los coeficientes obtenidos para describir el efecto del tiempo sobre el fósforo extraído por Bray II mediante el ajuste simultáneo de la Ec. (3)<sup>a</sup> con la Ec. (4). Se indican los casos en que el efecto del tiempo representado por  $b_2$ , fue o no significativo.

Suelo	Nº de Obser.	a	$b_1$	$b_2$	q	R <sup>2</sup>
1	9	2,10	1,52	0,0005 ns	38,61	0,983
2	9	2,39	1,54	0,0009 ns	36,70	0,976
3	12	4,37	1,20	0,0940 ns	50,04	0,892
4	12	7,05	1,11	0,1088 ns	50,42	0,834
5	12	13,94	0,55	0,0653 ns	30,11	0,996
6	12	6,41	0,87	0,0002 ns	30,83	0,994
7	12	1,19	1,57	0,0047 ns	22,21	0,976
8	8	4,29	1,40	0,0031 ns	16,28	0,993
9	12	10,61	0,98	0,0823 ns	41,33	0,939
10	12	4,74	1,23	0,0021 ns	35,70	0,960
11	11	3,29	1,27	0,0039 ns	20,48	0,958
12	12	0,26	2,72	0,0048 ns	15,03	0,982
13	12	1,24	1,48	0,0237 ns	31,46	0,989
14	12	2,62	1,35	0,0037 ns	20,19	0,981
15	12	6,80	0,79	0,0001 ns	46,62	0,987
16	12	10,17	0,90	0,0010 ns	40,63	0,991
17	12	1,13	1,83	0,0045 ns	23,11	0,971
18	12	1,57	1,36	0,0005 ns	39,00	0,955
19	9	2,78	1,54	0,0004 ns	27,23	0,957
x		4,58	1,27	0,021	32,42	
S		3,74	0,53	0,036	10,99	

$$a. Pe = Pa - a c^{b_1} t^{b_2} + q.$$

ns: no significativo.

S = desviación estándar.

x = media aritmética.

En los casos donde el efecto del tiempo fue significativo ( $P < 0,05$ ) el fósforo extraído disminuyó con el período de incubación; en estos casos se emplearon cuatro curvas para describir ese efecto (Ec. (3)). En los casos donde el efecto del tiempo sobre  $Pe$  no fue significativo, la relación entre  $Pe$  y  $Pa$  se describió mediante la Ec. (5) empleando una sola curva para todos los tiempos de incubación (Fig. 3).

Las Tablas 2, 3 y 4 muestran los valores de los coeficientes de la Ec. (3) para todos los suelos y extractantes, aún en los suelos donde el efecto del tiempo no fue significativo. De esta forma, se puede observar claramente que en los casos donde no hubo efecto del tiempo de incubación sobre  $Pe$ , el valor de  $b_2$  fue bajo (19 casos en Bray II, Tabla 2; 15 casos en Bray I, Tabla 3 y 5 casos en Olsen,

Tabla 3. Valor de los coeficientes obtenidos para describir el efecto del tiempo sobre el fósforo extraído por Bray I mediante el ajuste simultáneo de la Ec. (3)<sup>a</sup> con la Ec. (4). Se indican los casos en que el efecto del tiempo representado por  $b_2$ , fue o no significativo.

Sue- lo	Nº de obser.	a	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	q	R <sup>2</sup>
1	9	6,73	1,00	0,0005 ns	23,53	0,978
2	9	8,90	0,73	0,0067 ns	21,83	0,985
3	12	0,90	2,08	0,2937 ***	26,20	0,869
4	12	0,22	3,48	0,3357 **	8,64	0,944
5	12	28,87	0,34	0,0378 ns	33,49	0,998
6	12	10,66	0,66	0,0596 ns	25,29	0,995
7	12	0,70	1,97	0,0251 ns	11,30	0,981
8	8	6,92	1,13	0,0064 ns	10,03	0,996
9	12	5,66	1,04	0,1168 **	16,38	0,988
10	12	3,46	1,34	0,0051 ns	18,25	0,970
11	11	5,75	1,18	0,0091 ns	9,77	0,981
12	12	0,33	2,49	0,3675 ***	8,98	0,981
13	12	1,04	1,12	0,3416 ***	21,82	0,978
14	12	9,79	0,54	0,005 ns	26,51	0,988
15	12	10,22	0,53	0,0021 ns	27,14	0,988
16	12	27,08	0,37	0,0165 ns	41,17	0,990
17	12	4,55	1,08	0,0088 ns	20,77	0,978
18	12	13,83	0,59	0,1120 ns	49,02	0,857
19	9	5,72	1,37	0,0017 ns	19,72	0,951
x		8,02	1,21	0,0920	22,10	
S		8,06	0,80	0,1338	10,84	

a.Pr = Pa - a c<sup>b<sub>1</sub></sup> t<sup>b<sub>2</sub></sup> + q  
 \*\*\* = P < 0,001; \*\* = P < 0,01; ns = no significativo.  
 S = desviación estandar.  
 x = media aritmética.

Tabla 4). En estos casos, la Ec. (3) con cuatro coeficientes no fue significativamente superior (P < 0,05) a la Ec. (5) con tres coeficientes; de aquí que la consideración de  $b_2$  no fue significativa. Al considerar todos los suelos, la tendencia observada en el valor de  $b_2$  fue: Olsen > Bray I > Bray II.

La comparación entre las Tablas 2, 3 y 4 permite observar que, en concordancia con la Figura 2, el valor de  $q$  fue superior en la gran mayoría de los suelos en Bray II respecto a Bray I y Olsen, mientras que entre Bray I y Olsen, aunque se encontraron ciertas diferencias, no existió una tendencia definida en favor de alguna de las soluciones. Los valores medios de  $q$  no difirieron entre Bray I y Olsen.

La Fig. 2 muestra que el fósforo retenido ( $Pa - Pe$ ) puede ser positivo o negativo dependiendo del nivel de fósforo agregado ( $Pa$ ). Según la Ec. (3), para valores de  $c$  y  $t$  igual a la unidad, el fósforo retenido depende de la diferencia entre los valores de los coeficientes  $a$  y  $q$ . El valor del coeficiente  $a$  determina el valor de  $Pr$  cuando la concentración

Tabla 4. Valor de los coeficientes obtenidos para describir el efecto del tiempo sobre el fósforo extraído por Olsen mediante el ajuste simultáneo de la Ec. (3)<sup>a</sup> con la Ec. (4). Se indican los casos donde el efecto del tiempo representado por  $b_2$ , fue o no significativo.

Sue- lo	Nº de obser.	a	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	q	R <sup>2</sup>
1	9	29,68	0,56	0,0809 **	38,91	0,995
2	9	15,10	0,82	0,1211 **	19,71	0,997
3	12	12,07	1,11	0,1500 **	35,58	0,955
4	12	22,41	0,76	0,0895 *	22,36	0,989
5	12	26,63	0,55	0,1115 ***	21,37	0,997
6	12	17,66	0,85	0,0620 ns	19,94	0,986
7	12	4,76	1,96	0,2430 ***	11,84	0,991
8	8	19,52	1,23	0,1244 ***	15,02	0,996
9	12	19,95	0,86	0,0992 **	25,61	0,977
10	12	6,96	1,84	0,0410 ns	16,05	0,991
11	11	25,19	0,65	0,0801 *	21,92	0,990
12	12	16,43	0,97	0,0815 *	16,31	0,993
13	12	14,58	0,87	0,1019 *	31,66	0,989
14	12	17,02	0,96	0,0581 *	25,50	0,993
15	12	18,18	0,81	0,0773 *	21,19	0,983
16	12	18,82	0,95	0,0552 ns	16,83	0,993
17	12	7,77	1,02	0,2560 ***	19,06	0,977
18	12	4,92	1,27	0,2611 ***	25,37	0,969
19	9	15,94	1,22	0,2380 ***	19,18	0,971
x		15,98	1,01	0,1227	22,28	
S		6,68	0,37	0,0722	6,96	

a.Pr = Pa - a c<sup>b<sub>1</sub></sup> t<sup>b<sub>2</sub></sup> + q  
 \*\*\* = P < 0,001; \*\* = P < 0,01; \* = P < 0,005  
 ns = no significativo.  
 S = desviación estandar.  
 x = media aritmética.

de fósforo en el extracto es igual a 1 µg/ml y el tiempo igual a 1 día. La tendencia del valor de  $a$  entre extractantes fue similar a la observada para  $b_2$ : Olsen > Bray I > Bray II (Tablas 2, 3 y 4).

#### Efecto de incubación sobre el fósforo extraído

El fósforo extraído por las tres soluciones disminuyó con el tiempo de incubación; en algunos casos la disminución fue bien marcada, mientras que en otros casi no hubo diferencias en el tiempo (Fig. 4 y 5). La significancia del efecto del tiempo sobre  $Pe$  se puede observar en las Tablas 2, 3 y 4 evaluado por la consideración del coeficiente  $b_2$ .

Las Fig. 4 y 5 describen la relación entre  $Pe$  y  $t$  para los mismos suelos indicados en la Fig. 3. La pendiente de la relación logarítmica  $Pe$  vs  $t$  está descrita por el valor de  $b_2$ . En el caso del suelo 7 (Fig. 4) sólo Olsen mostró una disminución significativa del fósforo extraído con el tiempo, mien-

tras que para el suelo 9 (Fig. 5), Bray I y Olsen mostraron pendientes significativas.

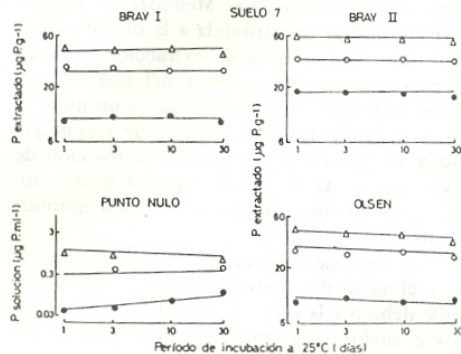


Fig. 4. Relación entre el fósforo extraído (Bray I, Bray II y Olsen) y el fósforo en solución (punto nulo) con el período de incubación para el suelo 7.

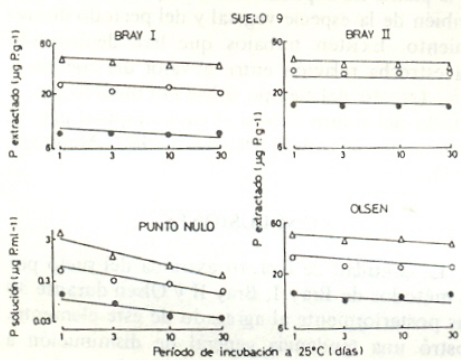


Fig. 5. Relación entre el fósforo extraído y el fósforo en solución (punto nulo) con el período de incubación para el suelo 9.

#### Fósforo extraído y fósforo en solución (punto nulo)

Al comparar los cambios del fósforo extraído con el tiempo obtenidos por las tres soluciones con los cambios del fósforo en solución obtenidos por el método del punto nulo (Mendoza et al., 1990), se observa que en todos los casos hubo notorias diferencias (Figs. 4 y 5). En principio, se observó que en el caso de los extractantes, no se pudo establecer diferencias entre los niveles de fósforo agregado tanto en el sentido como en la dirección de las pendientes de las curvas; esto significa que

tanto en Bray II, Bray I y Olsen el fósforo extraído disminuyó con el tiempo y la tasa de disminución fue similar entre los distintos niveles de fósforo agregado. En el caso del método del punto nulo, el sentido y dirección de las pendientes difirió entre los niveles de fósforo agregado. Por otra parte, en el caso del método del punto nulo, la inclusión del coeficiente  $b_2$  en la Ec. (6) fue significativo en todos los suelos (Mendoza et al., 1990).

Una de las formas de comparar el efecto del tiempo sobre los cambios en el fósforo residual entre los métodos de evaluación de fósforo en el suelo es a través del coeficiente  $b_2$ , exponente del tiempo en la ecuación de ajuste en cada caso. Para el método del punto nulo la ecuación fue (Mendoza et al., 1990):

$$Pr = a + c b_1 t^{b_2} - q \quad (6)$$

donde la simbología utilizada fue la misma para todos los métodos de evaluación.

La Fig. 6 muestra que sólo se encontró correlación significativa ( $P > 0,05$ ) entre los valores de  $b_2$  de los métodos de Olsen y punto nulo, mientras que Bray I y Bray II no mostraron cambios sustanciales en los valores de  $b_2$  entre los suelos.

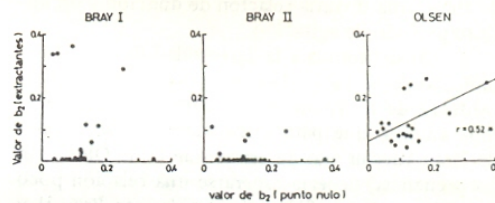


Fig. 6. Relación entre el valor del coeficiente  $b_2$  (exponente del tiempo) en la Ec. (3) para extractantes y el valor del coeficiente  $b_2$  obtenido por el método del punto nulo para los 19 suelos estudiados.

#### DISCUSION

La cantidad de fósforo removida del suelo a través del tiempo fue diferente con las soluciones de Bray I, Bray II y Olsen. Aunque la tendencia general fue una disminución de la extracción de fósforo del suelo con el tiempo, en muchos casos el efecto del tiempo no fue significativo. De los 19 suelos estudiados, el método de Olsen determinó un efecto significativo en la disminución del fósforo extraído con el tiempo en 14 casos, en el de Bray I en 5 casos, mientras que en Bray II no hubo efecto del tiempo sobre el fósforo extraído en

ninguno de los 19 suelos. Este resultado indica que las tres soluciones difieren en la evaluación del fósforo residual como consecuencia de algunas de las siguientes razones: diferencias en el mecanismo de acción, diferencias en la formulación y/o diferencias en la metodología propiamente dicha.

El comportamiento general al agregar fósforo al suelo es que la disponibilidad (sea P en solución o P extraído) disminuye con el tiempo como consecuencia de la continua reacción entre el fósforo y el suelo.

La solución de Bray II no reflejó el efecto de la reacción entre el fósforo y el suelo en el tiempo debido posiblemente a sus condiciones agresivas de extracción (pH muy ácido y presencia de un anión competitivo del fosfato). Bray I tuvo un comportamiento similar pero menos agresivo y en algunos casos se observó efecto del tiempo sobre la extracción de fósforo: es razonable pensar que esto se debió a su pH más moderado en relación con Bray II. Similares resultados ya habían sido observados anteriormente (Mendoza y Menalled, 1988). La explicación que puede ofrecerse en cuanto al comportamiento del método de Olsen en comparación con las soluciones de Bray resulta algo más complicada en razón de que la solución alcalina tiene, además de un pH muy diferente de las de Bray, una distinta relación de dilución y un distinto período de agitación.

Si definimos a la agresividad de un extractante como la capacidad para extraer una mayor cantidad de nutriente en el menor tiempo, debemos admitir que para estos suelos las soluciones de Bray fueron más agresivas que la de Olsen. En consecuencia, debería esperarse una relación poco favorable entre el fósforo extraído por Bray II y el fósforo absorbido por el vegetal en estos suelos.

Las tres soluciones extractantes difirieron con el método del punto nulo en la evaluación de los cambios en la cantidad de fósforo en la solución final a través del tiempo. Cuando se agregó fósforo al suelo, en general el remanente de fósforo en la solución disminuyó con el tiempo; este efecto fue reflejado de manera similar en la mayoría de los suelos por Olsen y punto nulo, en Bray II no hubo efecto y en Bray I hubo efecto sólo en pocos casos. Cuando no se agregó fósforo al suelo, sólo el método del punto nulo reflejó cambios del fósforo

en la solución con el tiempo tanto en dirección como en sentido. Esta diferencia entre los métodos de evaluación del fósforo residual fue observada anteriormente por Mendoza y Barrow (1987b) y podría ser atribuida a la distinta sensibilidad entre los métodos de extracción y punto nulo para detectar los cambios del fósforo residual con el tiempo. La sensibilidad de un método químico depende de: el mecanismo de acción que desplaza el fósforo a la solución, la fracción de fósforo desplazada, la metodología particular empleada y la formulación de la solución química empleada.

El período de contacto entre el fósforo agregado y el suelo disminuye el fósforo residual disponible debido a la reacción continua entre el fósforo y el suelo. Ahora bien, que el método de Olsen y de punto nulo y en menor medida Bray I reflejen esa tendencia no significa estrictamente que estos métodos reflejen también el efecto de la disminución del fósforo disponible utilizado por el vegetal a través del tiempo, ya que el efecto sobre la planta no depende sólo del tipo de suelo, sino también de la especie vegetal y del período de crecimiento. Existen trabajos que han demostrado una estrecha relación entre el valor del coeficiente  $b_2$  (efecto del tiempo sobre  $Pr$ ) medido por el método del punto nulo y el valor residual para el crecimiento de trébol (Barrow, 1980; Mendoza, 1986b).

## CONCLUSIONES

La cantidad de fósforo extraída del suelo por los métodos de Bray I, Bray II y Olsen durante 30 días posteriormente al agregado de este elemento, mostró una tendencia general de disminución a través del tiempo, aunque no estadísticamente significativa en todos los casos, dependiendo del método de evaluación utilizado.

Los resultados se compararon con otros obtenidos por el método del punto nulo, el que a su vez se asoció estadísticamente con el método de Olsen.

La magnitud de la disminución del fósforo a través del tiempo se ordenó de mayor a menor de la siguiente manera: punto nulo > Olsen > Bray I > Bray II.

## REFERENCIAS

- Barrow, N. J., 1967. Effects of the soils buffering capacity for phosphate on the relation between uptake of phosphorus and the phosphorus extracted by sodium bicarbonate. *J. Aust. Inst. of Agric. Sci.* 33: 119-121.
- Barrow, N. J., 1980. Differences amongst a wide-ranging collection of soils in the rate of reaction with phosphate. *Aust. J. Soil Res.* 18: 215-224.



- Barrow, N. J. y T. C. Shaw, 1975. The slow reactions between soil and anions: 2 Effects of time and temperature on the decrease in phosphate concentration in soil solution. *Soil Sci.* 119: 301-310.
- Bray, R. H. y L. T. Kurtz, 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphate in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Holford, I. C. R., 1980. Greenhouse evaluation of four phosphorus soil tests in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 555-559.
- Kamprath, E. J. y M. E. Watson, 1980. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. En: Khaswneh, F. E.; E. C. Sample y E. J. Kamprath (Ed.). *The role of phosphorus in agriculture*. Madison, Wisconsin USA, 910 p.
- Kuo, S. y E. G. Lotse, 1974. Kinetics of phosphate adsorption and desorption by hematite and gibbsite. *Soil Sci.* 116: 400-406.
- Mendoza, R. E., 1986. Isotermas de adsorción de fósforo en suelos argentinos. II. Aplicabilidad de las isotermas e interrelación de sus parámetros con variables de suelo y planta. *Ciencia del Suelo* 2: 117-124.
- Mendoza, R. E., 1989a. Different performances of soil phosphate tests for reflecting the effects of buffering capacity on uptake of native phosphate with time. *Plant and Soil*. 113: 13-19.
- Mendoza, R. E. 1989b. Ritmo de la reacción entre el fósforo y el suelo y su relación con el valor residual del fósforo aplicado para el crecimiento del trébol. *Ciencia del Suelo* 7: 21-29.
- Mendoza, R. E., 1989c. El método del punto nulo: una alternativa para la medición del fósforo en la solución del suelo. *Rev. Fac. de Agronomía (UBA)*10: 63-67.
- Mendoza, R. E. y N. J. Barrow, 1987a. Characterizing the rate of reaction of some Argentinean soils with phosphate. *Soil Sci.* 143: 105-112.
- Mendoza, R. E. y N. J. Barrow, 1987b. Ability of three soil extractants to reflect the factors that determine the availability of soil phosphate. *Soil Sci.* 144: 319-329.
- Mendoza, R. E. y F. Menalled, 1988. Efecto de la reacción entre el fósforo y cuatro suelos sobre la producción y el fósforo extractable. *Ciencia del Suelo* 6: 50-55.
- Mendoza, R. E.; A. Canduck y C. Aprile, 1990. Phosphate release from fertilized soils and its effects on the changes of phosphate concentration in soil solution. *Fert. Res.* (en prensa).
- Murphy, J. y J. P. Riley, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27: 31-36.
- Nelder, J. A. y R. Mead, 1965. A simplex method for function minimization. *Comput. J.* 7: 308-313.
- Olsen, S. R.; C. V. Cole; F. S. Watanabe y L. A. Dean, 1954. Estimation of available phosphorus in soils by sodium bicarbonate. *USDA. Circ.* 939.
- Probert, M. E., 1983. The sorption of phosphate by soils. En: *Div. Soils, CSIRO (Ed.). Soils. An Australian point of view*. Melbourne; Academic Press, London. 427-435.