

El balance de fósforo del suelo determina los cambios en el nivel de fósforo extraíble*

F.A. Sucunza¹, F.H. Gutiérrez-Boem¹, F.O. García², M. Boxler³, y G. Rubio¹

- En cinco sitios de ensayo a largo plazo se determinó la tasa de disminución del compartimento de P-Bray en tratamientos no fertilizados y el enriquecimiento del mismo compartimento en suelos fertilizados.
- Las tasas de disminución en suelos no fertilizados respondieron a un modelo de disminución curvilíneo que describe la relación entre el P-Bray y el balance de P. Los suelos fertilizados con P mostraron una relación recta lineal significativa entre el P-Bray y el balance P acumulado.
- Los datos obtenidos sobre las tasas a las que el P extraíble disminuye o aumenta de acuerdo con el balance, constituye una herramienta útil para predecir los cambios futuros en disponibilidad del nutriente.

Introducción

Un componente clave para planificar estrategias de manejo de fósforo (P) es saber cuánto aumenta o disminuye el nivel de P extraíble (P-Bray) en función del balance de P en el sistema. Para esto se necesitan funciones que permitan predecir las tasas de cambio del P-Bray en el suelo a partir del balance de P acumulado a lo largo del tiempo. Estas funciones permitirían predecir la tasa de disminución del P-Bray en el suelo en situaciones de ausencia de fertilización fosforada, así como estimar las variaciones del P-Bray en casos de balances positivos de P en el sistema productivo. Alrededor de 5-25% del P aplicado al suelo es absorbido por el cultivo fertilizado (Morel y Fardeau, 1989; Benbi y Biswas, 1999). El resto del fertilizante es retenido por la matriz del suelo, y eventualmente puede estar disponible para los cultivos posteriores. El efecto residual de la fertilización con P depende principalmente del balance de P y de la capacidad de adsorción del suelo (Blake et al., 2003).

En su versión más simple, el balance P se calcula restando la salida principal de P (P exportado en productos cosechados: grano, forraje) de la entrada principal de P (P del fertilizante o abono). Un balance positivo o negativo lleva a una acumulación o una disminución, respectivamente, del P total del suelo. Sin embargo, debido a la fuerte interacción del fosfato con la matriz del suelo, la relación entre el balance de P y el P disponible del suelo no es fácilmente predecible (Ciampitti et al., 2011). Mientras que en muchos experimentos se han observado relaciones lineales rectas entre el balance de P y el P disponible en el suelo (Blake et al, 2000, 2003; Messiga et al, 2010; Ciampitti et al, 2011; Cao et al, 2012; Shen et al, 2014; Díaz y Torrent, 2016), Johnston et al. (2016) observaron una relación curvilínea entre el P disponible y el tiempo en tratamientos donde no se aplicó

P. Algunos estudios destacan que el balance de P del sistema es el factor preeminente que regula la dinámica del P-Bray en el suelo (Blake et al., 2003; Messiga et al., 2015). En este sentido, utilizar el balance acumulado de P en vez del tiempo como variable independiente, permitiría estimar la tasa de aumento o disminución del P disponible independientemente del factor tiempo. Para identificar qué tipo de función es la que mejor representa la disminución del P disponible es muy importante definir la escala de tiempo considerada. Si se analizan periodos de tiempo muy cortos es muy probable que la caída se pueda representar con una recta, ocultando la presencia de tendencias curvilíneas. En este sentido, los experimentos a campo de largo plazo son la mejor herramienta para cuantificar el impacto del balance de P sobre la dinámica del P disponible del suelo.

En el presente reporte, se presentan resultados de una red de ensayos ubicada en la región pampeana norte de Argentina, que se realizaron para determinar el efecto de la fertilización de largo plazo sobre el balance de P y el nivel de P extraíble (P-Bray) en el suelo.

Materiales y métodos

Experimento de fertilización a largo plazo

Se utilizaron los resultados de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP), una red de experimentos de larga duración realizados en campos de la región sur de Santa Fe de CREA (Consortio Regional de Experimentación Agrícola), para evaluar los efectos a largo plazo de diferentes regímenes de fertilización sobre la fertilidad del suelo. La red comenzó en 2000 y en la actualidad comprende cinco sitios bajo siembra directa cuyos suelos presentaban un rango de niveles en P-Bray inicial y otras características (**Tabla 1**). En el presente estudio, se evaluó el periodo entre las temporadas de crecimiento 2000/01 y 2013/14.

* Versión adaptada de los resultados publicados en Sucunza et al. 2018. *European Journal of Agronomy*, 96: 87-95

¹ IINBA (CONICET UBA) y Cátedra de Fertilidad de Suelos y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Buenos Aires. Av. San Martín 4453C1417DSE Buenos Aires, Argentina

² IPNI Latinoamérica Cono Sur, Buenos Aires, Argentina

³ Consultor privado

Autor de contacto. Correo electrónico: rubio@agro.uba.ar

Tabla 1. Información de los sitios experimentales, series de suelo, rotación y propiedades del suelo (0-20 cm) al comienzo del periodo experimental (septiembre 2000).

	Sitio experimental				
	Balducchi	San Alfredo	La Hansa	Lambaré	La Blanca
Tipo de suelo	Hapludol típico	Argiudol típico	Argiudol ácuico	Argiudol típico	Hapludol típico
Serie de suelo	Santa Isabel	Hughes	Bustinza	Los Cardos	La Bélgica
P-Bray (mg kg ⁻¹)	10.8	11.6	17.7	67.7	16.2
C orgánico (g kg ⁻¹)	13.5	19.8	12.2	18.7	13.3
pH	5.9	6.0	5.5	5.6	6.6
Textura	franco limosa	franco limosa	franco limosa	franco limosa	franco limosa
Arcilla (%)	11.8	18.0	18.0	20.5	15.5
Limo (%)	53.1	62.0	78.9	76.5	56.4
Arena (%)	35.1	20.0	3.1	3.0	28.1
Rotación	----- Maíz-Trigo/Soja -----		----- Maíz-Soja-Trigo/Soja II -----		

El mismo protocolo experimental se llevó a cabo en todos los sitios (detalles en Ciampitti et al. 2011 y Sucunza et al. 2018). Se compararon dos tratamientos: a) -P, sin aplicación de P; y b) +P, con aplicaciones anuales de P. La dosis de P del tratamiento +P se decidió cada año, de acuerdo a la exportación esperada de la campaña, a la que se le sumaba un 5-10% adicional. En promedio, la dosis anual de P fue de 37 kg P ha⁻¹. La fuente de P utilizada fue fosfato monoamónico [11-52 (22 P)-0], aplicado en bandas incorporadas al momento de la siembra. Ambos tratamientos recibieron fertilización con azufre (S) y nitrógeno (N) que variaron entre 17-25 kg S año⁻¹ y 90-175 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Los cultivos de soja no se fertilizaron con N. Todos los años se tomó una muestra compuesta de suelo de cada parcela (0-20 cm) antes de la fertilización con P y la siembra de trigo, maíz o soja de primera y se la sometió al análisis de P-Bray (Bray et al., 1945).

Los balances del P en el suelo se calcularon a lo largo del periodo experimental como la diferencia entre las entradas y salidas de P, según lo definido por Oenema et al. (2003). Las entradas de P se estimaron anualmente a partir de la dosis de fertilizante utilizada. Las salidas de P se calcularon a partir de los rendimientos de los cultivos y el contenido de P del grano. En aquellos años en los que no se realizaron mediciones de P de grano, se utilizó la concentración promedio de P para cada cultivo, tratamiento y sitio. En promedio de todos los sitios, las concentraciones de P fueron para soja 5.44 (± 0.21) y 6.04 (± 0.09) mg P g⁻¹; para maíz 3.09 (± 0.15) y 3.37 (± 0.18) mg P g⁻¹, y para trigo 3.68 (± 0.06) y 3.87 (± 0.10) mg P g⁻¹ (en todos los casos, promedio ± error estándar) para los tratamientos -P y +P, respectivamente.

Para el tratamiento -P (es decir, sin aplicación de P y con balance negativo de P), las relaciones entre los balances de P y el P-Bray se describieron utilizando una función de disminución exponencial para cada sitio:

$$y = a e^{-kx} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde 'y' es el P-Bray, 'a' representa el valor inicial de P-Bray del sitio, 'k' es la tasa relativa de disminución y 'x' el balance de P acumulado (negativo). Las tasas relativas de disminución (k) para los 5 sitios se compararon con un test de F. Como estas cinco 'k' no fueron significativamente diferentes (p > 0.05), se realizó un ajuste global y se obtuvo un modelo con 5 diferentes 'a' (una para cada sitio), pero una sola tasa (una 'k' común para los cinco sitios).

Para poder representar en una sola curva esta relación (P-Bray vs. Balance de P) para los cinco sitios, se utilizó el 'k' común para calcular los desplazamientos horizontales de cada curva necesarios para hacer coincidir las curvas individuales y colocarlas en un eje x extendido, que representaba el balance de P acumulado. El desplazamiento horizontal para cada sitio se calculó con la ecuación:

$$Ci = (\ln a_i - \ln a_{\max}) / k \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde Ci es la constante (balance negativo de P) que se añadió a cada valor x observado en el sitio i, 'a_i' fue el valor del parámetro 'a' en el sitio i (valor inicial de P-Bray), a_{max} fue el parámetro 'a' en el sitio con el valor inicial de P-Bray más alto, y 'k' fue la tasa relativa de disminución, común para los cinco sitios.

Se ajustó una curva combinada de P-Bray en función del eje x modificado (es decir, un balance de P negativo extendido) utilizando la **Ecuación 1**. La curva combinada obtenida amplió y resumió en gran medida la información sobre el balance de P negativo requerido para la disminución de P-Bray.

Además, la "vida media" del P-Bray inicial se estimó como:

$$P_{1/2} = \ln 2 / -k \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde $P_{1/2}$ fue la cantidad de P a exportar (balance negativo) para que el valor de P-Bray se reduzca a la mitad.

La tasa absoluta de disminución de P-Bray en función del balance de P podría calcularse para cualquier valor dado de P-Bray como:

$$dy/dx = -k \text{ P-Bray} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para el tratamiento +P (que en general tuvo balance positivo de P), se describieron las relaciones entre el P-Bray y el balance de P usando una función recta lineal para cada sitio:

$$y = a + b x \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde 'y' fue el P-Bray, 'a' el valor inicial de P-Bray, 'b' la pendiente y 'x' el balance P acumulado. Las pendientes (b) para los 5 sitios se compararon con un test de F. Como estas cinco 'b' no fueron significativamente diferentes ($p > 0,05$), se realizó un ajuste global que resultó en un modelo con 5 diferentes 'a' (una por cada sitio), pero sólo una pendiente (una 'b' común para los cinco sitios).

La 'b' común se utilizó para calcular los desplazamientos horizontales necesarios para hacer coincidir las rectas individuales y representar P-Bray en función de un eje x extendido (balance de P).

El desplazamiento horizontal para cada sitio se calculó con la ecuación:

$$C_i = (a_i - a_{\min}) / b \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde C_i fue la constante (balance de P positivo) que se añadió a cada valor x observado en el sitio i, 'a_i' fue el valor inicial de P-Bray en el sitio i, a_{\min} fue el parámetro 'a' en el sitio con el menor valor inicial P-Bray, y 'b' fue la pendiente, común para los cinco sitios.

Se ajustó una línea combinada de P-Bray en función del eje x modificado (es decir, un balance de P positivo extendido) utilizando la **Ecuación 5**. La línea combinada amplió enormemente la información sobre el balance P positivo requerido para que P-Bray aumentara.

Adicionalmente, la 'tasa de cambio' del P-Bray inicial se estimó como:

$$CR = 1 / b \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde CR indica la cantidad de P que se necesita (por encima del P removido por la cosecha) para aumentar la disponibilidad de P en 1 mg kg⁻¹.

Resultados

Relación entre el Balance de P y P-Bray cuando no se agrega P

El sitio rico en P, Lambaré, mostró el balance de P más negativo (-453 kg P ha⁻¹ a lo largo del periodo experimental), seguido de San Alfredo (-369 kg P ha⁻¹), La Blanca (-338 kg P ha⁻¹), La Hansa (-332 kg P ha⁻¹) y

Balducchi (-278 kg P ha⁻¹) (**Figura 1**). En los cinco sitios se observó una disminución progresiva del P-Bray, que acompaña a la mayor negatividad de los balances P. Esta disminución pudo describirse adecuadamente ($p < 0.05$) con una función de disminución exponencial asintótica (**Figura 1, Tabla 2**). Los modelos ajustados fueron definidos por dos parámetros: la tasa relativa de disminución 'k' y la constante 'a', que está directamente relacionada con el contenido inicial de P-Bray. Curiosamente, no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los valores k de los cinco sitios. Los modelos ajustados para cada sitio solo difirieron en el valor de 'a'. Estos resultados nos permitieron ajustar una única función de disminución sobre un eje x extendido después de agrupar los datos de los 5 sitios (**Figura 2**). La vida media promedio de P-Bray para estos suelos fue 327, lo que indica que se necesita una extracción de 327 kg P por hectárea para reducir sus valores iniciales de P-Bray a la mitad, independientemente del valor inicial de P-Bray del suelo. Para los tratamientos -P, el sitio Lambaré, rico en P, mostró la mayor disminución en P-Bray a lo largo del periodo estudiado (de 67.7 a 24.8 mg P kg⁻¹: aproximadamente 42.9 mg P kg⁻¹). Los otros cuatro sitios, con P-Bray inicial bajo a moderado (< 20mg P kg⁻¹), disminuyeron menos de 7 mg P kg⁻¹ a lo largo del periodo experimental.

Relación entre el balance positivo de P y el P-Bray (tratamiento +P)

Los tratamientos fertilizados mostraron un balance positivo de P en los cinco sitios (**Figura 1**). Al final del periodo experimental, Lambaré y San Alfredo presentaron los balances positivos más bajos (50 y 47 kg P ha⁻¹, respectivamente), mientras que Balducchi, La Blanca y La Hansa mostraron valores superiores 79, 108 y 117 kg P ha⁻¹, respectivamente. La relación entre el equilibrio de P-Bray y P pudo describirse mediante modelos de regresión lineal simples ($y = a + b x$) (**Figura 1, Tabla 2**). Los modelos individuales para cada sitio diferían en el valor de 'a', pero no hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las pendientes 'b' (**Tabla 2**). Esto indica que las tasas de aumento de P-Bray fueron similares entre sitios, pero cada sitio partió de diferentes valores iniciales de P-Bray (reflejados por valores 'a'). Por lo tanto, fue posible ajustar un único modelo después de agrupar los datos de los cinco sitios. Esta función combinada se trazó en un eje x extendido (**Figura 3**) e indicó que fue necesaria la adición de 3,2 kg P ha⁻¹ por encima de la extracción de P por cosecha para aumentar P-Bray en 1 mg kg⁻¹ para este tipo de suelos.

Los sitios con P-Bray inicial bajo a moderado (< 20 mg kg⁻¹) mostraron un aumento algo similar en el P-Bray después de 14 años de fertilización continua. Los aumentos relativos observados sobre los valores iniciales fueron de 258, 249, 241 y 249% para Balducchi, San Alfredo, La Blanca y La Hansa, respectivamente. Por el contrario, el sitio con el contenido de P-Bray inicial más alto (67.7 mg P kg⁻¹, Lambaré) tuvo un incremento relativo menor sobre el valor inicial de P-Bray al final del periodo experimental.

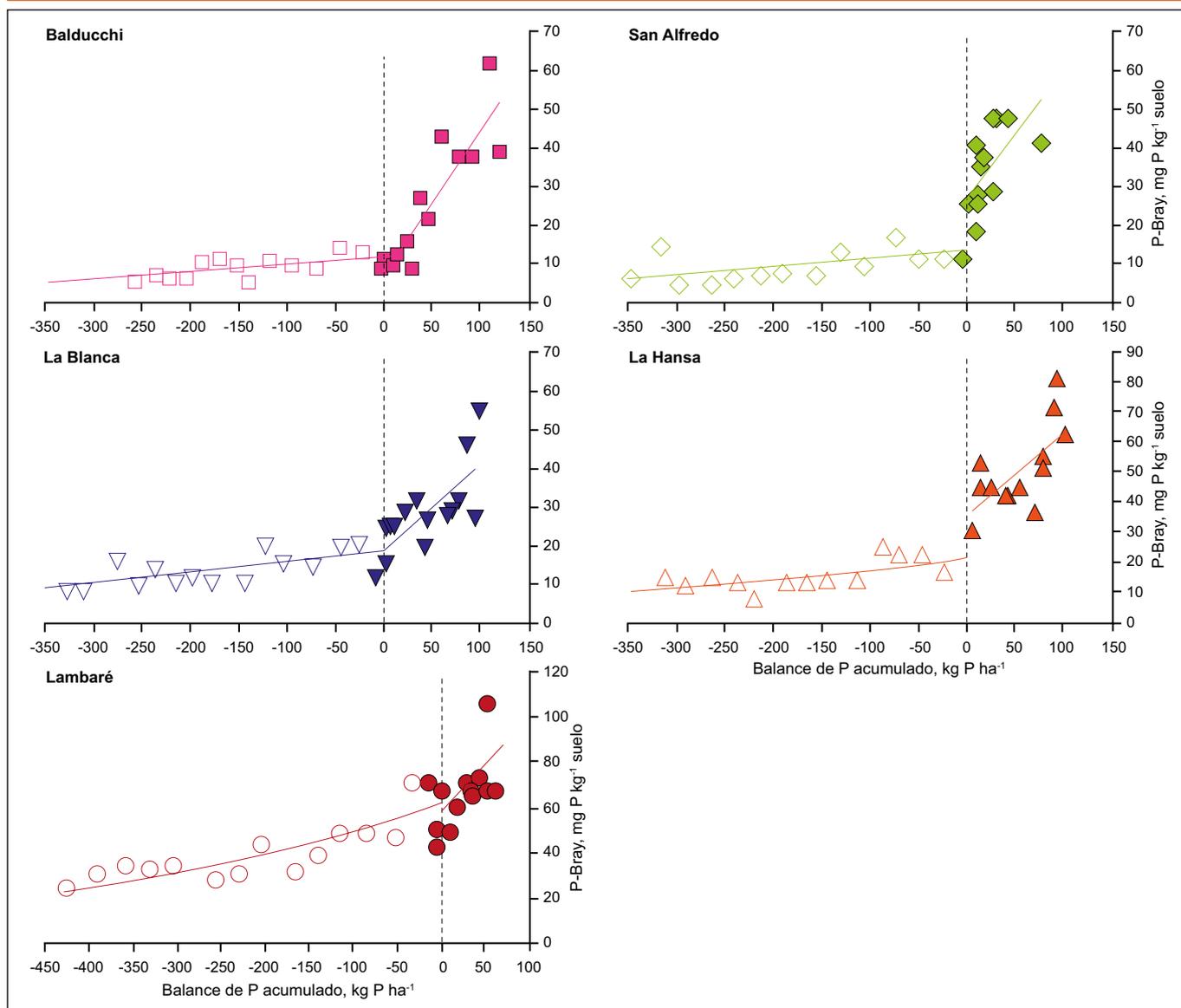


Figura 1. Relación entre P-Bray y balance acumulado de P durante el experimento (14 años) para los 5 sitios del norte de la región pampeana. Los símbolos abiertos representan el tratamiento no fertilizado con P (-P) y los símbolos llenos el tratamiento con fertilización fosforada (+P). Todas las funciones ajustadas fueron estadísticamente significativas para $p < 0.05$. Los parámetros de las funciones ajustadas se muestran en la Tabla 2.

Discusión

Disminución residual de P con balances negativos de P

Estudios recientes de largo plazo han encontrado relaciones rectas lineales entre la disminución de P-Bray y el balance de P (Selles et al., 2011; Cao et al., 2012; Shen et al., 2014; Messiga et al., 2015). En la misma línea, otros estudios determinaron que la relación entre el balance de P y las variaciones de P-Bray estaba regulada principalmente por el P-Bray inicial (Ciampitti et al., 2011; Johnston et al., 2016). En las parcelas -P de nuestros cinco sitios, la disminución del pool de P-Bray fue mejor descrita por funciones de disminución exponencial (Figura 1) que por rectas. El rango de balance de P negativo acumulado observado en nuestro estudio fue mayor (hasta -450 kg P) que los de la mayoría de los informes anteriores, lo que habría facilitado la identificación de relaciones curvilíneas. Es interesante que las curvaturas de las 5 funciones fueron similares y por ello fue posible ajustar

una función curvilínea de disminución común a los cinco sitios (Figura 2). El parámetro 'a', que es la intercepción en el eje y, difería entre los sitios, lo que es coherente con el hecho que cada sitio partió de diferentes valores iniciales de P-Bray (de 10.8 a 67.7 mg kg⁻¹) (Figura 2, Tabla 2). La ecuación obtenida es adecuada para predecir la disminución del P extraíble después de cesar las prácticas de fertilización con P. La evaluación de la vida media de P-Bray estimada a partir de la función combinada obtenida indicó que se necesitó una extracción neta de 327 kg de P por hectárea para reducir a la mitad los valores iniciales de P-Bray, independientemente de la magnitud de éstos. La relación entre el balance de P neto y la disminución de P-Bray del suelo está regulada por las propiedades físico-químicas del suelo, el clima y la disponibilidad de otros nutrientes (Blake et al., 2000). En suelos pampeanos, se han identificado al contenido de arcilla, el P-Bray inicial, el aluminio y hierro amorfo como los componentes clave que determinan la retención de P por parte del suelo

Tabla 2. Ecuaciones ajustadas para la relación entre P-Bray y balance acumulado de P para los cinco sitios del Norte de la Región Pampeana. Se pueden ver las funciones individuales (Figura 1) y combinadas (Figura 2 y 3) para los tratamientos -P y +P.

Balance Ecuación Ajuste	----- Tratamientos -P -----						----- Tratamientos +P -----					
	$y = a \exp(kx)$						$y = a + bx$					
	-- Ajuste individual por sitio --			----- Ajuste global -----			-- Ajuste individual por sitio --			----- Ajuste global -----		
Sitio	a	k (x10 ⁻³)	R ²	a	k (x10 ⁻³)	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
Balducchi	12.5	2.38	0.49	12.4			8.4	0.36	0.80	10.6		
San Alfredo	13.5	2.24	0.32	13.6			26.6	0.33	0.40	26.9		
La Blanca	18.9	1.93	0.53	19.8	2.29	0.93	19.4	0.21	0.55	15.3	0.31	0.79
La Hansa	22.0	2.16	0.51	22.3			34.8	0.28	0.45	33.0		
Lambaré	63.1	2.33	0.78	62.7			57.5	0.43	0.37	60.8		

(Rubio et al., 2008; Cabello et al., 2016). En estos estudios previos se encontraron diferencias importantes entre los suelos ubicados al sur y al norte de la región. Los suelos de este último sector (donde se encuentran los cinco sitios comparados) mostraron una menor capacidad de retención de P que los suelos del sur de la región. Los resultados obtenidos en nuestro estudio sugieren que las diferencias entre las propiedades de los cinco suelos (Tabla 1) no fueron lo suficientemente grandes como para afectar la dinámica del P-Bray en los tratamientos donde no se agregó P (-P).

La disminución curvilínea del P-Bray del suelo a lo largo del eje del balance negativo de P podría explicarse por variaciones en la contribución de los compartimientos de P en el suelo al P absorbido por los cultivos, a medida que el suelo se empobrece en P. Esto significa que, a niveles bajos de P-Bray, una mayor proporción del P absorbido por el cultivo provendría de las reservas de P del suelo (es decir, P del suelo no recuperado por el extractante Bray-1) que a niveles altos de P. Entonces, el descenso en P-Bray fue más pronunciado en suelos ricos en P porque la exportación se basó en las fracciones de P más lábiles, mientras que fue más suave en suelos pobres en P porque dependió más de las fracciones de P no extraíbles con el método Bray-1. La disminución curvilínea del P-Bray se asociaría entonces a los flujos que ocurren entre distintas fracciones de P (extraíbles y no extraíbles por Bray-1) a medida que disminuye la cantidad del P extraíble (McCollum 1991; Johnston et al., 2016).

Enriquecimiento del P del suelo con balance positivo de P

Después de 14 años de fertilización continua de P, la acumulación progresiva de balances positivos provocó un aumento proporcional del P-Bray, pudiéndose representar esta relación con funciones rectas lineales en todos los sitios (Figuras 1 y 3). No se encontraron diferencias significativas entre las pendientes ajustadas para cada sitio, lo que sugiere que el aumento de P-Bray no dependió del P-Bray inicial, sino de la magnitud del balance P positivo acumulado. La función combinada indicó que se necesitaron 3.2 kg de P ha⁻¹ para aumentar el P-Bray en 1 mg kg⁻¹ (Figura 4). En investigaciones previas

(Blake et al., 2003; Selles et al., 2011; Messiga et al., 2014; Ferraris et al., 2015) también se observaron aumentos lineales en P extraíble en respuesta a balances positivos, aunque McCollum (1991) observó que los suelos ricos en P necesitaban más P para mantener el P disponible del suelo, que los suelos pobres en P. En nuestro estudio, el rango de balance positivo acumulado fue pequeño (+120 kg P ha⁻¹), lo cual coincide con Allen y Mallarino (2006), quienes propusieron que las relaciones pueden ser curvilíneas o rectilíneas dependiendo del grado de acumulación de P.

Independientemente del valor de P-Bray inicial, al final del periodo experimental los tratamientos +P de los cinco sitios alcanzaron valores de Bray-P por encima de los valores críticos. Esto significa que la fertilización ya no es necesaria para aumentar los rendimientos en estas parcelas. Sin embargo, incluso en estos casos, los productores no deben abandonar los análisis de suelo porque proporcionan información clave para la nutrición y el cuidado del ambiente.

Conclusiones

En los cinco sitios, la tasa de disminución P del compartimiento de P-Bray en los tratamientos no fertilizados se describió por funciones de disminución exponencial. Las curvaturas de las cinco funciones se ajustaron a un modelo de disminución curvilíneo común que describe la relación entre el P-Bray y el balance de P, que es apropiado para predecir la disminución del P extraíble después de discontinuar la práctica de fertilización con P. Los suelos fertilizados con P mostraron una relación recta lineal significativa entre el P-Bray-P y el balance P acumulado. De la misma manera que para las parcelas no fertilizadas, fue posible ajustar un solo modelo después de reunir los datos de los cinco sitios.

Los datos obtenidos sobre las tasas a las que el P extraíble disminuye o aumenta de acuerdo con el balance P constituye una herramienta útil para predecir los cambios futuros de los niveles de P. Esta información puede ser utilizada en la planificación de estrategias de manejo que aseguren que los rendimientos no se vean limitados por la falta de P extraíble, y que minimicen el riesgo de pérdidas de P perjudiciales para el medio ambiente.

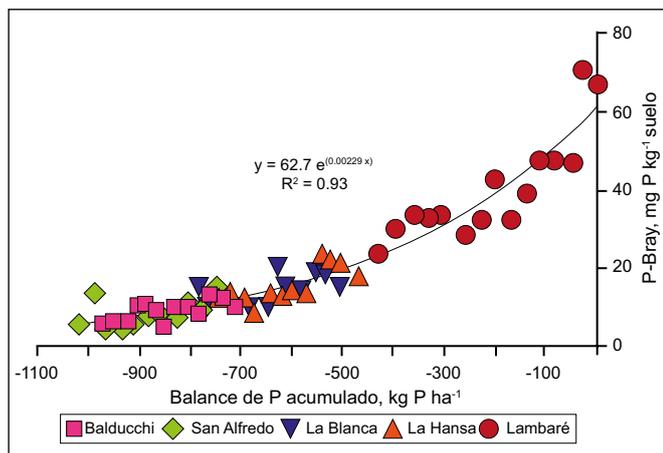


Figura 2. Relación entre P-Bray y el balance acumulado de P para el tratamiento sin fertilización fosforada (-P) para los cinco sitios del norte de la región pampeana. Los datos mostrados en la Figura 1 indican que la tasa relativa de disminución (k) no difiere entre los cinco sitios comparados. En esta figura, cada sitio se desplazó horizontalmente para hacer coincidir las curvas individuales en una curva combinada de P-Bray en función de un eje x modificado (es decir, un balance de P negativo extendido). La función ajustada fue estadísticamente significativa ($p < 0.001$). Los parámetros del modelo de ajuste global se muestran en la Tabla 2.

Agradecimientos

Agradecemos a ASP y a los miembros de la Región CREA Sur de Santa Fe por su valiosa ayuda. El CONICET, la Universidad de Buenos Aires y ANPCYT proporcionaron apoyo financiero.

Bibliografía

- Allen, B.L., y A.P. Mallarino. 2006. Relationships between Extractable Soil Phosphorus and Phosphorus Saturation after Long-Term Fertilizer or Manure Application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:454-463.
- Benbi, D.K., y C.R. Biswas. 1999. Nutrient budgeting for phosphorus and potassium in a long-term fertilizer trial. *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 54:125-132.
- Blake, L., S. Mercik, M. Koerschens, S. Moskal, P.R. Poulton, K.W.T. Goulding, A. Weigel, y D.S. Powlson. 2000. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three european long-term field experiments. *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 56:263-275.
- Blake, L., A.E. Johnston, P.R. Poulton, y K.W.T. Goulding. 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil* 254:245-261.
- Bray, R.H., Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Cabello, M.J., F.H. Gutiérrez-Boem, C.E. Quintero, G. Rubio. 2016. Soil Characteristics Involved in Phosphorus Sorption in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80:1585-1590.

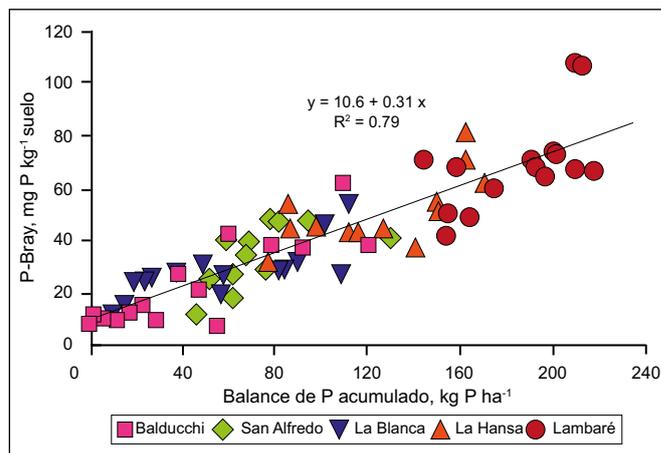


Figura 3. Relación entre P-Bray y el balance acumulado de P para los tratamientos fertilizados en cinco localidades de la región pampeana del norte. Los datos mostrados en la Figura 1 indicaron que los cinco sitios tenían una pendiente común. Cada sitio se desplazó horizontalmente para hacer coincidir las líneas individuales en una línea combinada de P-Bray en función del eje x modificado (es decir, un balance de P positivo extendido). La función ajustada fue estadísticamente significativa ($p < 0.001$). Los parámetros del modelo de ajuste global se muestran en la Tabla 2.

- Cao, N., X. Chen, Z. Cui, y F. Zhang., 2012. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China. *Nutr. Cycl. Agroecosys* 94:161-170.
- Ciampitti, I.A., F.O. García, L.I. Picone, y G. Rubio. 2011. Phosphorus budget and soil extraible dynamics in field crop rotations in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:131-142.
- Díaz, I., y J. Torrent. 2016. Changes in Olsen P in Relation to P Balance in Contrasting Agricultural Soils. *Pedosphere* 26:636-642.
- Ferraris, G.N., M. Toribio, R. Falconi, y F. Moriones. 2015. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 19:11-17.
- Johnston, A.E., P.R. Poulton, R.P. White, y A.J. Macdonald. 2016. Determining the longer term decline in plant-available soil phosphorus from short-term measured values. *Soil Use Management* 32:51-161.
- McCollum, R.E. 1991. Buildup and Decline in Soil Phosphorus: 30-Year Trends on a Typic Umprabult. *Agron. J.* 83:77-85.
- Messiga, J., N. Ziadi, D. Plénet, L.E. Parent, y C. Morel. 2010. Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization. *Soil Use Manage* 26:354-364.
- Messiga, A.J., N. Ziadi, G. Bélanger, y C. Morel. 2014. Relationship between soil phosphorus and phosphorus budget in grass sward with varying nitrogen applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78:1481-1488.

-
- Messiga, A.J., N. Ziadi, C. Jouany, P. Virkajärvi, R. Suomela, S. Sinaj, G. Bélanger, C. Stroia, y C. Morel. 2015. Soil test phosphorus and cumulative phosphorus budgets in fertilized grassland. *AMBIO* 44:S252-S262.
- Morel, C.H., y J.C. Fardeau. 1989. Native soil and fresh fertilizer phosphorus uptake as affected by rate of application and P fertilizers. *Plant and Soil* 115:123-128.
- Oenema, O., H. Kros, y W. De Vries. 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy* 20:3-16.
- Rubio, G., F.H. Gutiérrez-Boem, y M.J. Cabello. 2008. Estimating Available Soil Phosphorus Increases after Phosphorus Additions in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1721-1727.
- Selles, F., C.A. Campbell, R.P. Zentner, D. Curtin, D.C. James, y P. Basnyat. 2011. Phosphorus use efficiency and long-term trends in soil available phosphorus in wheat production systems with and without nitrogen fertilizer. *Can. J. Soil. Sci.* 91:39-52.
- Shen, P., M. Xu, H. Zhang, X. Yang, F. Zhang, S. Huang, S. Zhang, y X. He. 2014. Long-term response of soil Olsen P and organic C to the depletion or addition of chemical and organic fertilizers. *Catena* 118:20-27.
- Sucunza, F.A., F.H. Gutiérrez-Boem, F.O. García, M. Boxler, y G. Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *European Journal of Agronomy* 96:87-95. ✨