

La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos?

Fernando O. García¹ y María Fernanda González Sanjuan²

La nutrición de cultivos, y la fertilización en particular, han mostrado una evolución creciente en los sistemas de producción de cultivos extensivos en los últimos 20 años. La siembra directa, las variedades e híbridos de alto potencial y el avance en las tecnologías de manejo de los cultivos y su protección, entre otros factores, han dado el marco apropiado para la inclusión de la nutrición en los sistemas de producción. Este crecimiento se evidencia al considerar la evolución del consumo aparente de nutrientes (**Figura 1**), el cual acompañó la expansión agrícola, contribuyó al incremento de la producción y permitió mejorar los balances nutricionales, lográndose incrementos en la relación aplicación/remoción de 0.14 a 0.43, 0.14 a 0.70, 0.01 a 0.02 y 0.03 a 0.50 entre 1993 y 2011, para nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y azufre (S), respectivamente (**Figura 2**).

Numerosos otros aspectos reflejan el rol significativo de la nutrición y fertilidad en la producción agrícola argentina de los últimos 20 años, algunos de los cuales son: la aparición continua de nuevas metodologías de diagnóstico de la fertilidad a partir de los trabajos de grupos de investigación y experimentación (INTA, universidades, organizaciones profesionales y de productores, empresas), la introducción y el desarrollo de nuevos productos fertilizantes y tratamientos biológicos, el incremento de servicios de laboratorios de análisis de

Tabla 1. Incremento anual promedio del rendimiento y el área sembrada de los principales cultivos de grano de Argentina en el periodo 1991-2011. Elaborado a partir de información de SIIA <http://www.sii.gov.ar>

Cultivo	Rendimiento (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Área (ha año ⁻¹)
Maíz	78	58
Soja	28	797
Trigo	38	-
Girasol	-	-62

suelos, plantas y aguas, la expansión de los servicios de aplicación a nivel local, y la incorporación de tecnologías de aplicación variable y/o por ambiente, entre otros.

Todos estos avances nos han llevado a ampliar nuestra frontera desde una agricultura donde eventualmente se evaluaba la decisión de aplicar N y P en trigos del sur de Buenos Aires, hacia sistemas de producción donde evaluamos necesidades de N, P y S, la inclusión de otros nutrientes potencialmente deficientes (boro, zinc, otros) y el uso de microorganismos en los tratamientos de semilla.

Producción de granos y uso de nutrientes

El aumento de la producción de granos registrado en los últimos 20 años, se ha basado en: i) una fuerte expansión del área sembrada, principalmente del cultivo de soja, a partir de la incorporación de nuevas tierras y del cambio del uso de las mismas con una drástica reducción de períodos bajo pasturas, y ii) el incremento en los rendimientos generado a partir de la incorporación de materiales genéticos de mayor potencial y estabilidad, la implementación de técnicas de manejo como la siembra directa y la fertilización, y el manejo integrado de plagas, enfermedades y malezas. Sin embargo, los incrementos en producción son principalmente explicados por la expansión del área agrícola más que por los incrementos en rendimiento, los cuales han sido moderados (**Tabla 1**).

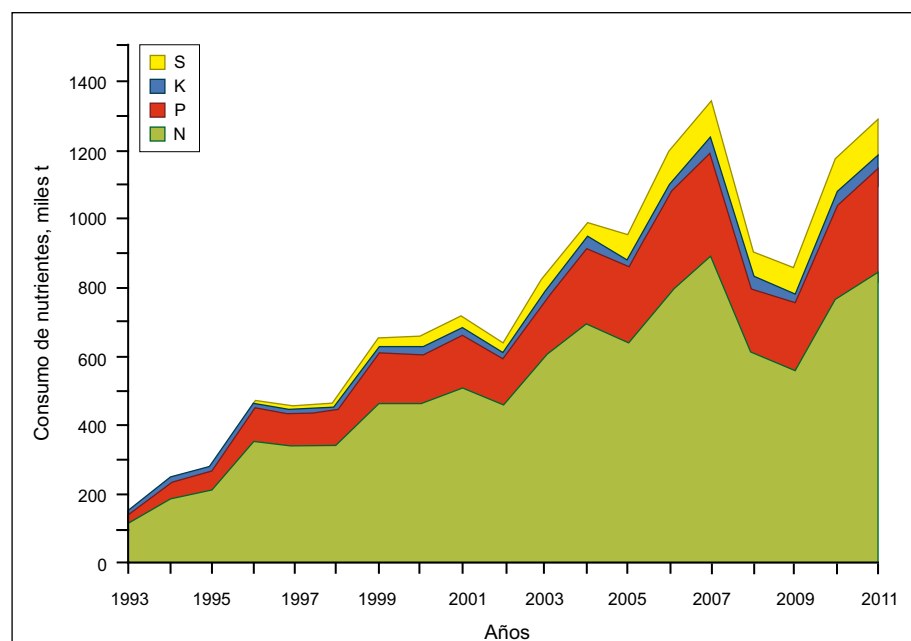


Figura 1. Evolución del consumo aparente de nutrientes como fertilizantes en Argentina en el periodo 1993-2011. Elaborado a partir de datos de MinAgri y Fertilizar AC.

¹ IPNI Cono Sur – Av. Santa Fe 910, Acassuso, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: fgarcia@ipni.net

² Fertilizar Asociación Civil. Correo electrónico: mfgonzalez@fertilizar.org.ar

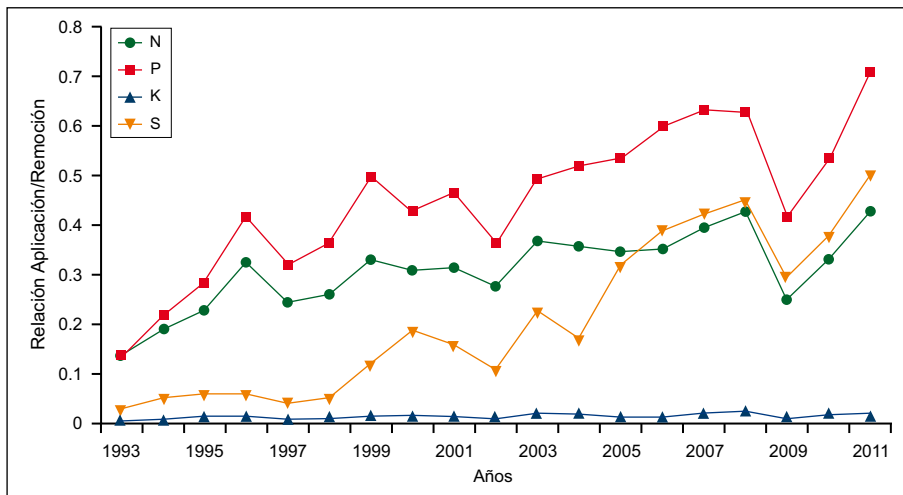


Figura 2. Relaciones Aplicación/Remoción de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) para los cuatro principales cultivos de grano de Argentina (soja, maíz, trigo y girasol) en el periodo 1993-2011. Elaborado a partir de datos de MinAgri y Fertilizar AC.

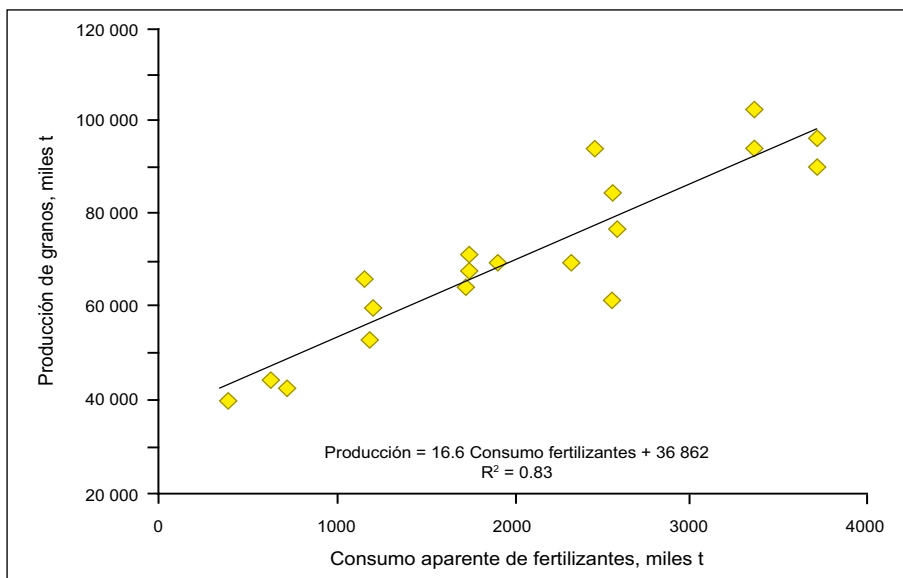


Figura 3. Relación entre la producción de granos y el consumo de fertilizantes en Argentina entre 1993 y 2011.

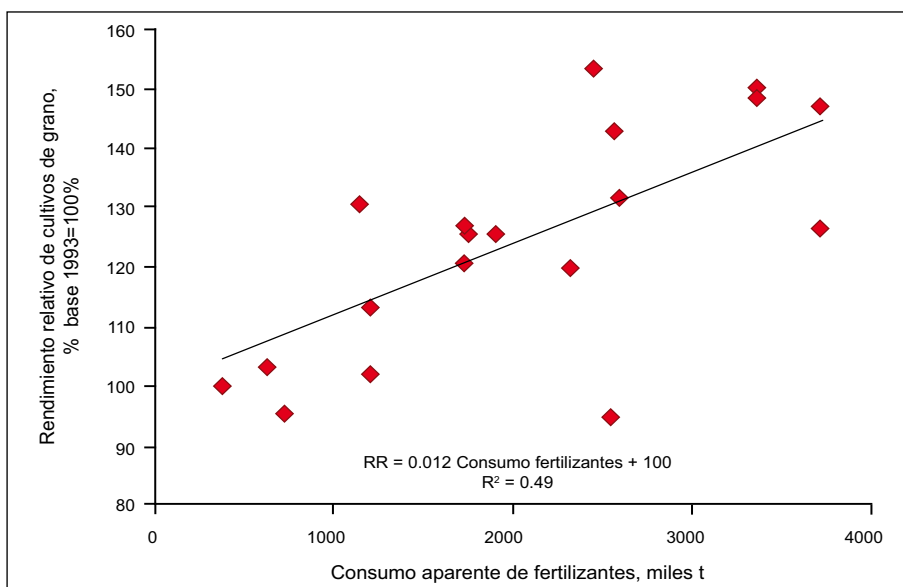


Figura 4. Relación entre el rendimiento relativo de los cultivos de grano (% base 1993 = 100%) y el consumo de fertilizantes en Argentina entre 1993 y 2011.

La expansión del área agrícola ha introducido la agricultura en ecosistemas más frágiles y presenta límites físicos concretos. El incremento de la productividad es la alternativa más clara para poder aumentar los niveles de producción preservando la calidad de los ambientes de manera de satisfacer la creciente demanda global de alimentos, fibras, biocombustibles y biomateriales.

La utilización de fertilizantes se relaciona con los incrementos en producción y en rendimiento de los cultivos. La **Figura 3** muestra que la producción de granos aumentó 16.6 millones de toneladas por cada millón de toneladas de incremento en el consumo de fertilizantes entre 1993 y 2011. La **Figura 4** muestra que los rendimientos relativos de los principales cultivos de grano se incrementaron en un 12% por cada millón de toneladas de incremento en el consumo de fertilizantes en el mismo periodo. Obviamente, otros factores han participado en el incremento de la producción y el rendimiento de los cultivos en este período (mayor área de siembra, la genética, otras tecnologías e insumos, el mejor manejo de suelos y cultivos, entre otros).

Si bien el aporte de la adecuada nutrición de cultivos a la productividad de los cultivos es altamente variable según la condición de sitio (suelo, cultivo, clima), a nivel mundial se reporta una contribución promedio del 40% al 70%. A nivel nacional, Álvarez et al. (2012) estimaron que entre 1967/68 y 2007/08, la fertilización contribuyó en un 16% al incremento de los rendimientos. Los autores indican que esta contribución es menor que en otras regiones del mundo probablemente por las menores dosis aplicadas en el país, la predominancia de soja que fija el N atmosférico y la alta fertilidad de los suelos agrícolas. Experiencias realizadas en lotes de producción en la región pampeana central entre

2000 y 2009 (Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe -IPNI-ASP, García et al., 2010), muestran incrementos promedio de 7% a 90% en soja de primera, de 6% a 89% en soja de segunda, de 21% a 294% en trigo y de 19% a 87% en maíz, con fertilizaciones que incluyeron N, P y S. Las respuestas varían marcadamente entre sitios según la fertilidad de los suelos y el nivel de rendimiento alcanzable. Estos incrementos han resultado en beneficios económicos variables según sitios y rotación de U\$S 140 a U\$S 400 por ha año⁻¹.

Más allá de los efectos directos de la correcta nutrición de los cultivos sobre los rendimientos y la rentabilidad, hay efectos indirectos a través de interacciones con otros recursos e insumos de producción que conducen hacia mayores eficiencias de uso de los mismos y hacia una mayor efectividad del sistema de producción. Por ejemplo, la eficiencia de uso del agua, el principal recurso limitante de los sistemas de producción de secano, se incrementó 52-63%, 24%, 46%-103% y 22%-37% en maíz, soja de primera, trigo y soja de segunda, respectivamente, en la misma red de ensayos mencionada en párrafos precedentes.

Los sistemas actuales de producción extensiva, agrícolas y ganaderos disponen de datos e información que se actualizan anualmente contribuyendo a una mejor toma de decisiones en el manejo de nutrientes. La aplicación de mejores prácticas de manejo (MPM) de la nutrición y fertilización permitirá incrementar los rendimientos y mejorar las eficiencias de uso de recursos e insumos maximizando el beneficio económico y minimizando impactos ambientales negativos. Las MPM son desarrolladas y actualizadas por distintos grupos de investigación y experimentación con el objetivo de aplicar los conceptos de los cuatro requisitos o 4R: aplicar la **fuerza** de nutriente correcta, en la **dosis**, el **momento** y el **lugar** correctos (Bruulsema et al., 2008).

Uso y balance de nutrientes en los principales cultivos de grano

Un aspecto que ha merecido especial atención en los últimos años, es el balance de nutrientes (García y González Sanjuan, 2010; Cruzate y Casas, 2012). Básicamente, el balance de nutrientes es la diferencia entre las cantidades de nutrientes aplicadas y removidas de un sistema de producción. Se puede estimar en distintas escalas espaciales (lote, establecimiento, región, país) y temporales (cultivo anual, toda una secuencia de rotación, etc.). En general, los balances se estiman sobre la reserva total de nutrientes del suelo, bajo el concepto de "caja negra", es decir sin considerar las transformaciones de los nutrientes y sus fracciones dentro del suelo. En sistemas agrícolas sin inclusión de animales (**Figura 5**), las principales salidas o pérdidas de nutrientes del suelo son la cosecha de granos y la cosecha de biomasa, por ejemplo, forraje. Entre las entradas o ganancias, se puede incluir a los fertilizantes, las enmiendas y los abonos orgánicos. Los balances afectan las reservas y, en consecuencia, la oferta de nutrientes de los suelos, la cual determina los rendimientos y la biomasa no cosechada (residuos) y afecta la calidad del suelo, del aire y del agua del ecosistema. Los rendimientos se relacionan con diversos indicadores de sustentabilidad económica, ambiental y social. A su vez, la biomasa no cosechada impacta sobre los balances de C orgánico y la protección del suelo contra factores erosivos. Balances fuertemente positivos de nutrientes pueden generar excesos de nutrientes en los suelos que conduzcan a la contaminación del suelo, del aire y/o del agua. Por otra parte, los balances negativos reducen la fertilidad del suelo pudiendo afectar seriamente la producción (rendimientos y biomasa no cosechada).

La **Figura 2** muestra la evolución de los balances de N, P, K y S para los cuatro principales cultivos de grano en Argentina entre 1993 y 2011. En este caso, el balance se expresa como la relación Aplicación/Remoción e indica que, para 2011, se estimó una reposición de los nutrientes extraídos por las cosechas vía fertilización del 43%, 70%, 2% y 50% de N, P, K y S, respectivamente.

La figura también muestra que, si bien la reposición de nutrientes es aún inferior a la remoción por las cosechas, el balance de N, P, y S ha mejorado en los últimos 20 años. Los bajos niveles de reposición de K, se basan principalmente en la aún alta oferta del nutriente por parte de los suelos de la región.

Si se estiman estos balances desagregados por cultivo, se observan diferencias importantes

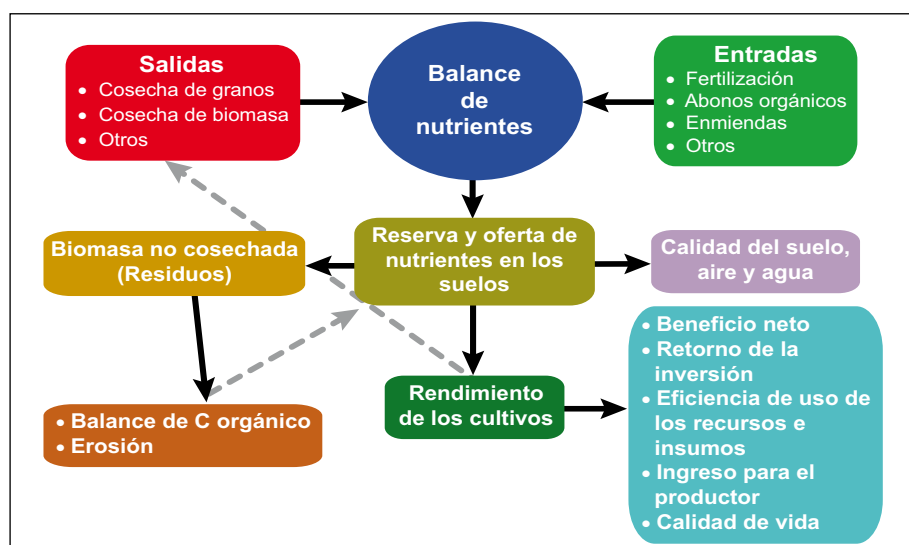


Figura 5. El balance de nutrientes en sistemas agrícolas sin inclusión de animales.

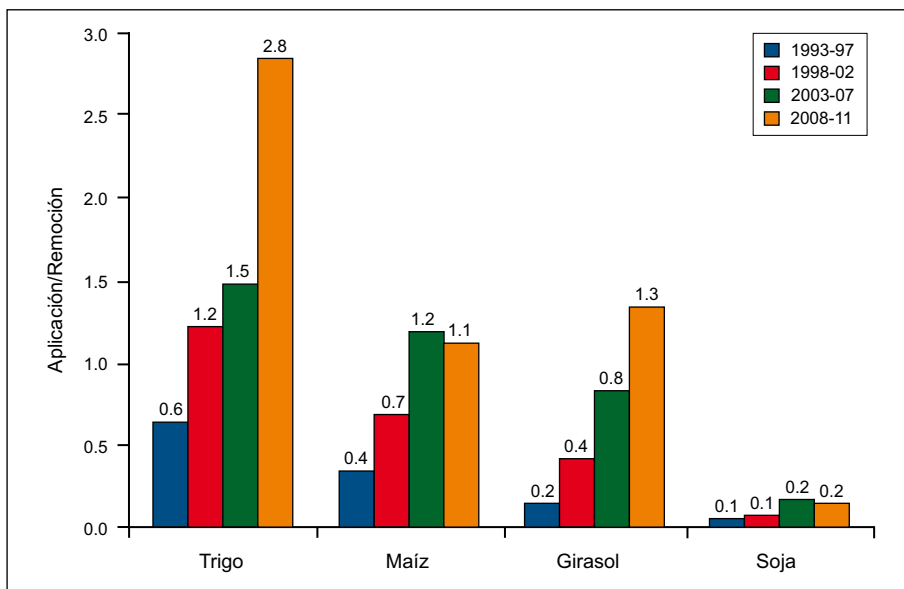


Figura 6. Balances de P, expresados como relación Aplicación/Remoción, estimados para trigo, maíz, girasol y soja en cuatro periodos entre 1993 y 2011.

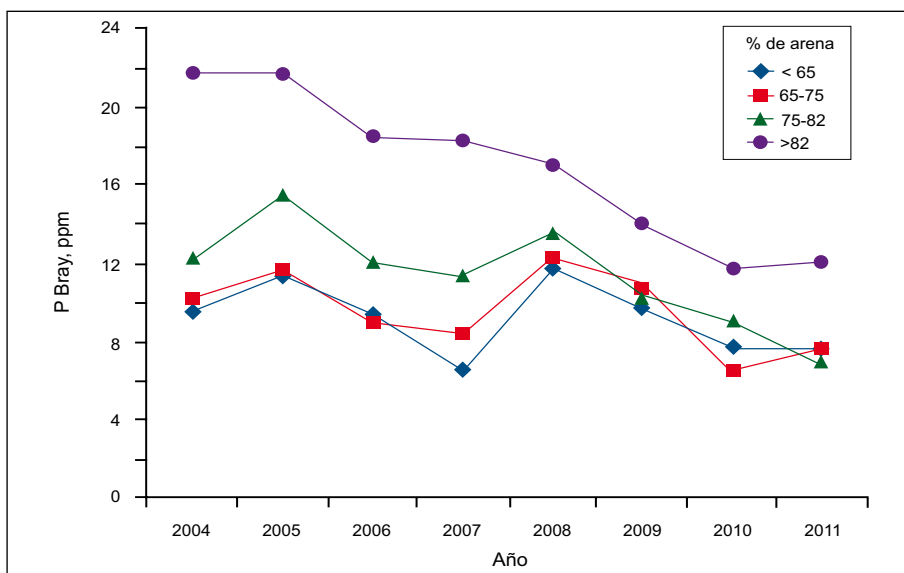


Figura 7. Evolución promedio de los niveles de P Bray de suelos con contenidos variables de arena (en porcentaje) de la Zona Oeste de grupos CREA. Fuente: Martin Miguez y Nicolás Bosch, CREA Zona Oeste.

considerados y aun para el ultimo periodo 2008-11 se mantienen muy bajos indicando que se remueven 6.2 kg de P por cada kg de P que se aplica. Obviamente, estos balances negativos de P en soja se pueden explicar a partir de la expansión del cultivo a áreas de mayor nivel de P en suelos del noreste y noroeste de Argentina, o se pueden disminuir considerando que parte del P, que en estas estimaciones se indica como aplicado al trigo, probablemente haya sido destinado a la soja de segunda. Más allá de estas consideraciones, estos balances de P fuertemente negativos en soja son un llamado de atención si pretendemos desarrollar una agricultura sustentable. Las reservas mundiales de P son limitadas, por lo tanto, se espera que su oferta pueda disminuir en el futuro y/o que su precio se incremente. Siendo el P un insumo limitante de nuestros agro-ecosistemas, el desarrollo de la agroindustria debería procurar el uso eficiente del mismo y evaluar las potenciales ventajas de mantener niveles adecuados de P en el suelo para los cultivos. Asimismo, deberían procurarse y evaluarse fuentes de abastecimiento nacionales de P para disminuir la dependencia del abastecimiento externo, así como el reciclado de materiales con alta concentración de P como, por ejemplo, el estiércol de feed-lots, tambos, y la producción avícola.

entre trigo, maíz, soja y girasol. La **Figura 6** muestra los balances promedios de P estimados para los cuatro cultivos en cuatro periodos de 1993 a 2011. Valores inferiores a 1 indican balances negativos y valores superiores a 1 indican balances positivos. En los cuatro cultivos se observa que los valores Aplicación/Remoción de P aumentaron marcadamente del periodo 1993-97 al periodo 1998-02 y esta tendencia decreciente se continuó en los dos periodos siguientes aunque con menores diferencias. Entre los cultivos, las relaciones Aplicación/Remoción para trigo y maíz aumentaron por arriba de 1 indicando balances positivos a partir de 2003-07, mientras que para girasol se acercaron a 1 a partir de 2008-11. Si bien la soja siguió una evolución similar a los otros tres cultivos, los valores Aplicación/Remoción son mucho más bajos en los cuatro periodos

Balances de nutrientes: Efectos sobre los nutrientes del suelo y los rendimientos de los cultivos

Frecuentemente, los cambios en los balances de nutrientes suelen asociarse con variaciones en una fracción específica del nutriente en suelo o con un indicador de su disponibilidad porque es más difícil estimar los impactos de balances negativos y positivos sobre la cantidad total de nutrientes de un suelo. Por otra parte, los contenidos totales de los nutrientes en los suelos (por ejemplo, N o P total) se relacionan muy débilmente o no se relacionan con la producción de los cultivos. Así, para el caso de P, el efecto de los balances suele relacionarse con la variación del P Bray que es solamente un índice de la disponibilidad de este nutriente. De la misma manera, los efectos de los

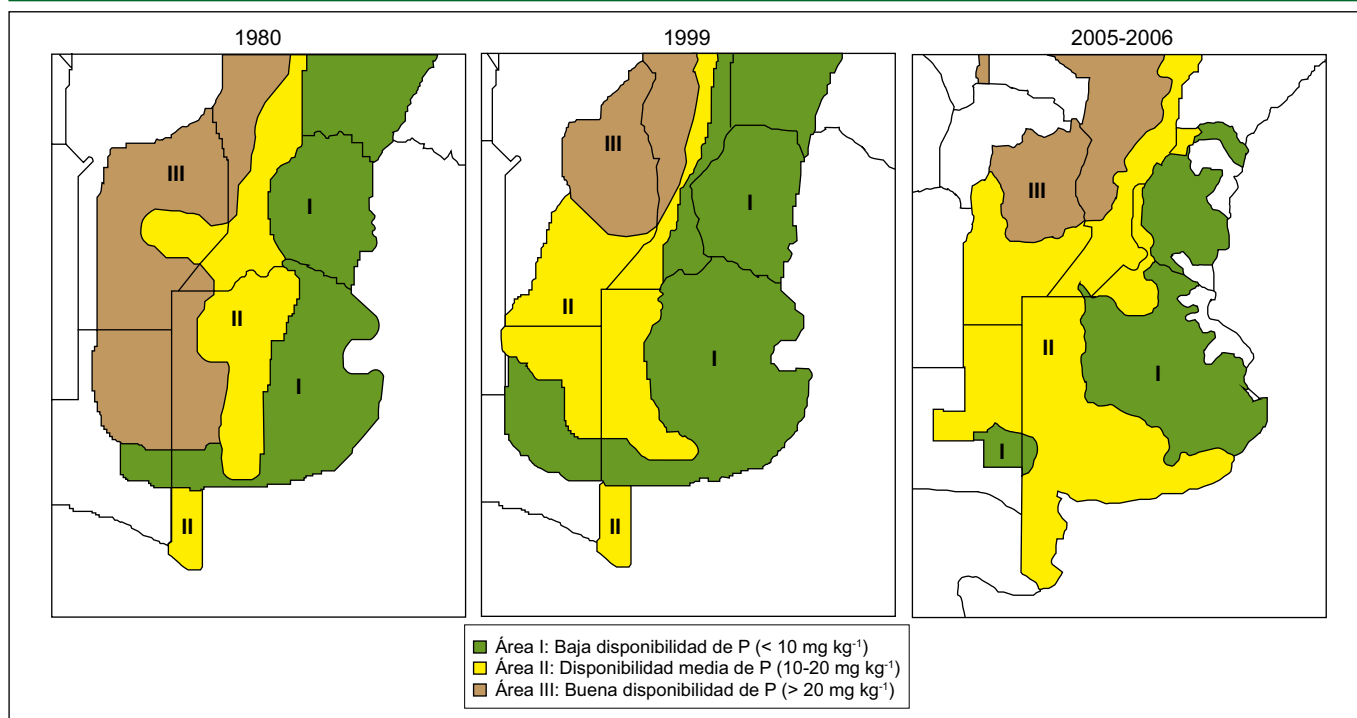


Figura 8. Rangos de concentración de P-Bray en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana en 1980 (Darwich, 1983) y en 1999 (Darwich, 1999; citado por García et al., 2010) y rangos de concentración de P-Bray en el muestreo realizado en 2005-06 (Adaptado de Sainz Rozas et al., 2011).

balances de K suelen relacionarse con los cambios de la fracción intercambiable (K intercambiable).

Los balances negativos de P a lo largo de los años han reducido los niveles de P Bray en suelos del oeste de la región pampeana según datos proporcionados por la Zona Oeste de CREA (Figura 7). Las caídas de niveles de P Bray en los suelos se verifican en numerosas regiones tal como muestra la Figura 8 (Sainz Rozas et al., 2011). En el caso de N y S, sus dinámicas en el suelo están fuertemente ligadas a la dinámica de carbono (C), es decir a la materia orgánica (MO), de hecho la MO ha sido principal fuente de N, de S y también de P en la agricultura pampeana y extrapampeana. De tal forma, los contenidos de MO han disminuido a partir de la introducción de la agricultura en la segunda mitad del siglo XIX. En una evaluación reciente, Sainz Rozas et al. (2010) determinaron reducciones de la MO del orden del 36% al 53% comparando suelos bajo condición agrícola con suelos bajo condición prístina.

Las caídas en las fracciones disponibles y de reserva de nutrientes del suelo impactan en los rendimientos de los cultivos y en la productividad del sistema en general. La información generada en los últimos años muestra que mantener niveles de fertilidad adecuados según el sistema de producción permite alcanzar rendimientos mayores y más estables, hacer un uso más eficiente de recursos e insumos y maximizar los beneficios económicos (García et al., 2010; Ferraris et al., 2012). Como ejemplo a nivel nacional, considerando el relevamiento de P Bray realizado por Sainz Rozas et al. (2011), aproximadamente un 50% del área bajo

producción de soja se encuentra en suelos con niveles de P Bray debajo del nivel crítico determinado para el cultivo, requiriendo de fertilización fosfatada. Sin la adecuada provisión de fertilizante fosfatado que permita mejorar la oferta de P de estos suelos, se puede estimar una pérdida de producción de soja de aproximadamente 3 millones de toneladas.

Los análisis de eficiencia de uso de los nutrientes generalmente incluyen indicadores tales como el beneficio neto de la práctica, el retorno a la inversión o la eficiencia agronómica de uso del nutriente aplicado (EA). Este análisis puede ser incompleto si no se incluye el balance de nutrientes e incluso otros indicadores (Bruulsema et al., 2008). Por ejemplo, la Tabla 2 muestra los resultados promedio de 15 ensayos realizados por INTA Paraná, Rafaela y Pergamino en la campaña 2003/04 evaluando la respuesta de soja a distintas dosis de P (Ferrari et al., 2005). La menor dosis de P (P10, equivalente a 50 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico), comúnmente aplicada por los productores, resulta en las mayores EA del nutriente y en balances de P más negativos. Esta situación es muy común en sistemas de producción basados en soja en Argentina y da lugar a un saldo negativo de P del suelo, como se discutió anteriormente. Los productores basan sus decisiones en el retorno inmediato de la inversión (alta EA), sin considerar la eficacia del sistema en el mediano y largo plazo la cual es afectada por el comportamiento de los nutrientes poco móviles en el suelo como el P. Estas decisiones reducen la fertilidad fosforada del suelo y podrían reducir la sustentabilidad del sistema en el largo plazo. Por otro lado, dosis mayores de P

Tabla 2. Rendimiento, eficiencia agronómica (EA), balance de fósforo (P) y margen bruto de la fertilización para cuatro dosis aplicadas. Datos promedio de 15 ensayos realizados en la campaña 2003/04 en Buenos Aires, Entre Ríos y Santa Fe (Adaptado de Ferrari et al., 2005).

Dosis	Rendimiento en grano	Eficiencia agronómica (EA)	Balance de P	Margen bruto de la fertilización
kg P ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg grano kg ⁻¹ P aplicado	kg P aplicado kg ⁻¹ P extraído	\$ ha ⁻¹
0	3135	-	-	-
10	3372	24	0.55	139
20	3557	21	1.04	245
30	3695	19	1.49	284

pueden mejorar el balance de P, ya sea con balance neutro (P20) o positivo (P30), manteniendo adecuadas EA y rentabilidad.

Al pensar en mejorar los balances de nutrientes de nuestros suelos, debemos recordar que los nutrientes aplicados que no son absorbidos en una campaña por el cultivo, no son necesariamente perdidos del sistema, sino que pueden ser utilizados por los cultivos siguientes en la rotación. Esto ocurre especialmente con nutrientes poco móviles en el suelo como P y K pero, en algunas situaciones, también se han observado residualidades de N y S, que inmovilizados en la MO o la biomasa microbiana, posteriormente son liberados de forma gradual. La residualidad de los nutrientes depende fuertemente de la dinámica de los mismos en el sistema suelo-planta y de las condiciones edafo-climáticas, por lo que estos factores deben ser evaluados cuidadosamente al considerar posibles efectos residuales de las aplicaciones de fertilizantes. Los efectos de acumulación de fertilidad promoverían cambios en el ambiente edáfico en cuanto a sus condiciones químicas, físicas y biológicas, que se pueden observar parcialmente en incrementos de MO del suelo.

Consideraciones finales

La producción agrícola argentina ha crecido notablemente en los últimos 20 años e incorporado numerosas innovaciones tecnológicas. Sin embargo, las demandas globales de alimentos, fibras, biocombustibles y biomateriales enfatizan la necesidad de mejorar los rendimientos actuales de los principales cultivos de grano. Las MPM de los nutrientes (aplicar la **fuerza** de nutriente correcta, en la **dosis**, el **momento** y el **lugar** correctos) contribuyen significativamente al incremento de la productividad y la sustentabilidad de estos sistemas.

El balance de nutrientes es un indicador de importancia para definir sistemas de producción sustentables complementando el grupo de indicadores de eficiencia de uso de los nutrientes. Los balances de nutrientes negativos de nuestros sistemas de producción de granos requieren de la atención de todos los sectores para

poder definir estrategias, involucrando directamente al sector productivo, pero también al estado nacional y provinciales, a los consumidores y, por supuesto, al sector científico-tecnológico.

Bibliografía

- Álvarez, C., H. Steinbach, y R. Álvarez. 2012. El rol de los fertilizantes en la agricultura. En Álvarez, R., Prystupa, P., Rodríguez, M.B. y Álvarez C. (ed.). Fertilización de Cultivos y Pasturas: Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Editorial Facultad de Agronomía. Cap 3:51-64.
- Bruulsema, T., C. Witt, F.O. Garcia, S. Li, T.N. Rao, F. Chen, y S. Ivanova. 2008. A Global Framework for Fertilizer BMPs. Better Crops 92(2):13-15. IPNI. Norcross, GA. EE.UU.
- Cruzate, G., y R. Casas. 2012. Extracción y balance de nutrientes en los suelos agrícolas de Argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, 6:7-14. IPNI.
- Darwich, N. 1983. Niveles de P disponible en suelos pampeanos. IDIA 409-412: 1-5. INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Ferrari, M., R. Melchiori, y H. Fontanetto. 2005. Fósforo en soja, el aporte de la fracción orgánica. Actas XIII Congreso Nacional de AAPRESID. Rosario, Santa Fe.
- Ferraris, G., M. Toribio, R. Falconi, y L. Couretot. 2012. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos y el balance de nutrientes. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, 6:2-6. IPNI.
- García, F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N. Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región Crea Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 200-2009. 2^{da} ed. AACREA. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1513-07-9. 64 p.
- García, F., y M.F. González Sanjuan. 2010. Balances de nutrientes en Argentina ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos? Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 48:1-5. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Sainz Rozas, H., H. Echeverría, y H. Angelini. 2010. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de las regiones Pampeana y extrapampeana de Argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, 2:1-7. IPNI.
- Sainz Rozas, H., H. Echeverría, y H. Angelini. 2011. Fósforo extractable en suelos agrícolas de las regiones Pampeana y extrapampeana de Argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, 4:14-18. IPNI. *