

¿El análisis de suelo permite diagnosticar la deficiencia de zinc en el cultivo de maíz?

Pablo A. Barbieri^{1,2}, Hernán R. Sainz Rozas^{1,2,5}, Hernán E. Echeverría^{1,5}, Fernando Salvagiotti¹, Pablo Barbagelata¹, Miriam Barraco¹, Juan C. Colazo¹, Gustavo Ferraris¹, Héctor S. Sánchez¹, Raúl H. Cáceres Díaz¹, Nahuel I. Reussi Calvo^{3,5}, Gabriel Esposito⁴, Mercedes Eyherabide¹ y Braian Larsen⁵

Introducción

La producción de granos en la región pampeana se ha incrementado sustancialmente durante los últimos años. A su vez, la intensificación de la actividad agrícola, la falta de rotaciones con pasturas y la mayor frecuencia del cultivo de soja han producido una notable disminución de los niveles de materia orgánica (MO) de los suelos de la región pampeana y extrapampeana (Sainz Rozas et al., 2011), los que en algunos casos, dependiendo del tipo de suelo y textura, presentan solo el 50% de su nivel original (Alvarez, 2001; Lavado, 2006). Además, esta caída en los niveles de MO se ha producido fundamentalmente a expensas de la disminución de las fracciones más lábiles, que son las que poseen mayor capacidad de liberar nutrientes (Brady y Weil, 1999). El agotamiento de dichas fracciones explicaría la respuesta generalizada al agregado de nitrógeno (N) (Echeverría y Sainz Rozas, 2005) y, en menor medida, a azufre (S) (Urricarriet y Lavado, 1997; Reussi Calvo et al., 2008), pudiendo también generar condiciones de deficiencias de zinc (Zn) (Catlett et al., 2002). A su vez, el pH de los suelos y los niveles de fósforo (P) extractable (Bray y Kurtz, 1945; P-Bray) han disminuido por la actividad agrícola (Sainz Rozas et al., 2013). La disminución del pH y del P-Bray podrían generar aumentos en la disponibilidad de Zn para los cultivos (Wang y Harrell, 2005; Alloway, 2009).

La deficiencia de micronutrientes puede limitar las funciones metabólicas de las plantas, más allá de ser requeridos en pequeñas cantidades para el crecimiento y desarrollo. Las deficiencias de Zn son menos frecuentes que las de N, P y S en los suelos de la región pampeana, ya sea por no manifestarse en forma aguda, o porque debido a la falta de investigación, no se las ha detectado e informado (Fontanetto et al., 2009). Sin embargo, la mayor exportación de Zn en grano, la escasa o nula aplicación del mismo y la mayor frecuencia de soja en las rotaciones, podrían generar condiciones de deficiencia de este micronutriente. En un relevamiento de suelos de aptitud agrícola de la región pampeana realizado en la década del '80, se determinó que los contenidos de Zn se ubicaban por debajo de la media internacional y próximos a los umbrales de deficiencia, pudiendo ser limitantes para el cultivo de maíz (Sillanpaa, 1982). Más recientemente, se determinó que los niveles de Zn en suelos bajo agricultura han disminuido notablemente

respecto de la situación prístina (70%), determinándose que el 50% de las muestras (n = 550) mostraron valores iguales o menores a 0.9 mg Zn kg⁻¹ (Sainz Rozas et al., 2013), valor considerado como crítico para la normal producción de los cultivos por la bibliografía internacional (Sims y Johnson, 1991).

El desarrollo de métodos adecuados de diagnóstico para evaluar la disponibilidad de Zn es clave para un manejo racional del mismo. El extractante más utilizado es el ácido dietilén triamino penta acético (DTPA) propuesto por Lindsay y Norvell (1978). El mecanismo de acción de este extractante es a través de la formación de complejos con los cationes solubles del suelo, lo que provoca el desplazamiento de aquellos que se encuentran en los sitios de intercambio y formando complejos con la MO. Melgar et al. (2001), trabajando en el noreste de Buenos Aires y el sudeste de Santa Fe, informaron respuesta al agregado de Zn (5 de 14 sitios), aunque la misma no se asoció con el Zn extractable por Mehlich-3 (M3). Es válido destacar que se ha informado una elevada relación entre las cantidades extraídas por DTPA y M3, aunque esta última extrae entre dos y tres veces más Zn que el DTPA (Rodríguez et al., 2005). Esto sugeriría que además del Zn extractable podría ser necesario incluir en los modelos de diagnóstico otras variables de suelo relacionadas con la disponibilidad de Zn, tales como MO, pH y P extractable (Bray y Kurtz, 1945; P-Bray).

En Molisoles de la región pampeana, se determinó una baja relación ($r^2 = 0.01-0.04$) entre el Zn-DTPA y variables de suelo como MO, pH y P-Bray (Sainz Rozas et al., 2013), lo que indica la existencia de baja correlación entre las mismas. Por el contrario, Esposito et al. (2010), para Molisoles del sur de Córdoba, informaron una elevada asociación ($r^2 = 0.83$) entre Zn-DTPA y MO. Por lo tanto, es necesario contar con información proveniente de estudios de respuesta a la aplicación de Zn en los cuales se evalúe la relación entre estas variables y si su inclusión en un modelo múltiple (Zn-DTPA+MO+pH+P-Bray), permite un mejor diagnóstico de la disponibilidad de Zn que la utilización de una única variable (Zn-DTPA).

El objetivo de este trabajo fue determinar la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización con Zn en la región pampeana y extrapampeana, y desarrollar un método de diagnóstico de la disponibilidad de Zn para el cultivo.

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA
² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET
³ Laboratorio de Suelos FERTILAB
⁴ Universidad Nacional de Río Cuarto, UNRC
⁵ Universidad Nacional de Mar del Plata, UNMdP
* Autor de contacto. Correo electrónico: sainzrozas.hernan@inta.gov.ar

Materiales y métodos

Durante las campañas 2009-2014 se realizaron 51 ensayos de fertilización con Zn en el cultivo de maíz en la región pampeana y extrapampeana (provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos, San Luis y Chaco). En la **Tabla 1** se presenta los estadísticos descriptivos de las variables edáficas de los sitios experimentales. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados (DCBA) con dos niveles de Zn (con y sin aplicación) y la fuente fue ZnSO₄. La fertilización con Zn fue aplicada al suelo, junto con la semilla o en forma foliar en estadíos de V2 o V6, siendo esta última la aplicación más frecuente. La dosis al suelo fue de 3 a 4 kg Zn ha⁻¹, a la semilla de 0.1 a 0.15 kg Zn ha⁻¹, y la foliar de 0.4 a 0.7 kg Zn ha⁻¹. En todos los sitios antes de la siembra se realizó un muestreo de suelo (0-20 cm) en donde se determinó: pH, MO (Walkey y Black, 1934), P-Bray y contenido de Zn-DTPA, según la metodología propuesta por Lindsay y Norvell (1978).

Se aplicaron las mejores prácticas de manejo para cada región tanto en híbridos, densidad de plantas, espaciamiento entre hileras y control de malezas e insectos. Todos los experimentos fueron fertilizados con N, P y S, de manera que estos no limiten el rendimiento.

Se determinó el rendimiento en grano ajustado al 14% de humedad. El rendimiento relativo (RR) del tratamiento sin Zn (Zn0) se calculó como el cociente entre el rendimiento en grano promedio del tratamiento Zn0 dividido por el rendimiento promedio del tratamiento fertilizado con Zn (+Zn) multiplicado por 100:

$$RR = [(Zn0 / +Zn) * 100]$$

El análisis de la varianza se realizó mediante el uso del programa PROC MIXED incluido en SAS 9.2 (SAS Inst., 2008). Los datos fueron analizados usando un diseño en parcelas divididas en donde la parcela principal fue el sitio experimental y la sub parcela los tratamientos de fertilización con Zn. Se trabajó con un nivel de probabilidad de 0.10. Se realizaron análisis de regresión entre el RR y las variables edáficas medidas utilizando las rutinas del programa SAS 9.2 (SAS Inst., 2008). La normalidad de los datos fue testeada usando el test de Shapiro y Wilk al 0.05. También se utilizó el método estadístico propuesto por Cate y Nelson (1971) para evaluar la relación entre el RR y el contenido de Zn-DTPA en presiembra.

Resultados y discusión

Los suelos de los sitios en donde se llevaron a cabo los experimentos mostraron amplia variación en las propiedades edáficas, particularmente en el caso del P-Bray y del Zn-DTPA (**Tabla 1**). Todas las variables mostraron distribución no-normal, particularmente el P-Bray y el Zn-DTPA (**Tabla 1**), por lo que estas fueron transformadas por Log₍₁₀₎ antes de ser utilizadas como variables predictivas del RR.

El rendimiento en grano fue afectado por la interacción sitio x tratamiento de fertilización (P ≤ 0.01), debido

a la variación de la respuesta según combinación sitio-año (entre -725 y 2430 kg ha⁻¹). Se determinó respuesta significativa a la fertilización con Zn en 13 de los 51 sitios, lo que representa el 25% de los casos. El incremento promedio en los sitios con respuesta significativa fue de 1032 kg ha⁻¹, con un rango de 305 a 1990 kg ha⁻¹ (**Figura 1**). Estos sitios con respuesta mostraron valores de Zn-DTPA en suelo que oscilaron de 0.5 a 1.3 mg kg⁻¹.

Es importante destacar que la respuesta no fue afectada por el rendimiento de cada sitio (**Figura 1**), dado que la misma no se relacionó con el rendimiento máximo de cada sitio (+Zn; P ≥ 0.63; r² = 0.02). Esto sugiere que, como para otros nutrientes de baja movilidad (por ejemplo P), la mejora en el rendimiento por incidencia de otros factores (por ejemplo agua) no produce mayor respuesta en condiciones de baja disponibilidad de Zn. Este efecto sería atribuido al incremento del crecimiento del sistema radicular y, por ende, de la capacidad de exploración

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del pH, materia orgánica (MO), fósforo extractable (P-Bray) y del Zn extractable con DTPA (Zn-DTPA) del horizonte superficial (0-20 cm de profundidad) de los sitios experimentales (n = 51).

Estadísticos	----- Variables de suelo -----			
	pH	MO %	P-Bray	Zn-DTPA -----mg kg ⁻¹ -----
Promedio	6.06	3.22	25.6	1.52
Mediana	5.93	2.36	16.3	1.10
Valor mínimo	5.30	0.75	4.90	0.13
Valor máximo	7.90	7.35	193	7.07
Coefficiente de variación (%)	8.30	55.6	119	84.5

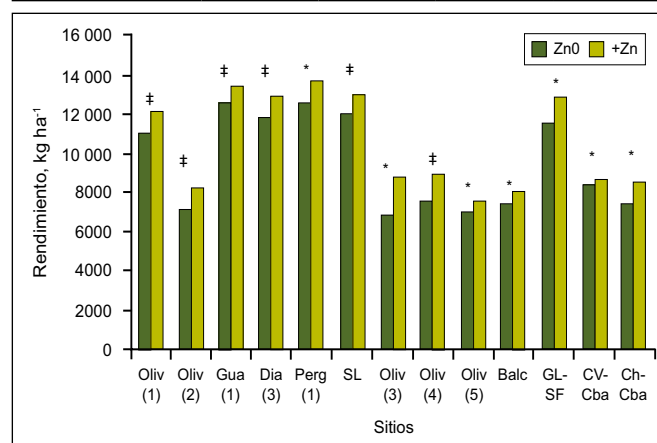


Figura 1. Rendimiento del tratamiento sin Zn (Zn0) y con el agregado de Zn (+Zn) en los sitios con respuesta al agregado de Zn (13 de 51 sitios). Oliv = Oliveros (Santa Fe); Gua = Gualguay (Entre Ríos); Dia = Diamante (Entre Ríos); Perg = Pergamino (Buenos Aires); SL = San Luis; Balc = Balcarce (Buenos Aires); GL-SF = Villa Cañas (General López, Santa Fe); CV-Cba = Cuatro Vientos (Córdoba); Ch-Cba = Chaján (Córdoba). ‡, *: Significativo al 0.10 y 0.05, respectivamente.

Tabla 2. Modelo de regresión múltiple para predecir el rendimiento relativo (RR) debido a la aplicación de Zn en suelos de la región pampeana y extrapampeana.

Variable dependiente	Variable	Valor del parámetro	p valor	r ² parcial	r ² total
RR (%)	Intercepto	69.2	0.001		0.23
	Log ₍₁₀₎ Zn-DTPA [†]	5.57	0.020	0.20	
	Log ₍₁₀₎ MO [‡]	5.64	0.080	0.03	

Variables seleccionadas de acuerdo al procedimiento stepwise al 0.10 de nivel de probabilidad.
[†] Zn extractable con DTPA (mg kg⁻¹).
[‡] Materia orgánica (%).

del suelo por mejoras en las condiciones de crecimiento (Gutiérrez Boem y Steinbach, 2012).

Se determinaron asociaciones significativas ($p \leq 0.05$) entre la concentración de Zn-DTPA con la MO y el P-Bray, mientras que la misma no se relacionó con el pH del suelo (Figura 2). No obstante dichas asociaciones fueron bajas, por lo que estas variables podrían ser utilizadas

en un modelo múltiple para predecir la respuesta a la aplicación de Zn. Sin embargo, cuando se relacionó el RR con las variables de suelo solo el Zn-DTPA y la MO contribuyeron significativamente, aunque ambas variables solo explicaron el 23% del RR (Tabla 2). Es válido destacar que aun cuando algunos sitios mostraron valores muy elevados de P-Bray, esta variable no influyó sobre el RR, aunque se ha informado que una elevada disponibilidad de P puede incrementar la respuesta a Zn en suelos con contenidos deficientes o cercanos a los umbrales críticos (Havlin et al., 2005) o incrementar la adsorción del mismo sobre óxidos e hidróxidos de Fe (Wang y Harrell, 2005). La escasa asociación entre el RR y el Zn-DTPA puede ser debida al efecto de otros factores edáficos (textura, temperatura, compactación, disponibilidad de agua, actividad biológica) sobre la movilidad y absorción de nutrientes poco móviles como el Zn. En este sentido, Astiz Imaz et al. (2014) informaron que la inoculación de plantas de maíz con micorrizas indígenas incrementó la asimilación de Zn respecto a plantas no inoculadas. Esto indica que para un mismo nivel de disponibilidad de Zn, la variación de la actividad biológica puede causar diferencias en la absorción de Zn y, por lo tanto, en la magnitud de la respuesta al agregado del mismo. No obstante, la concentración de Zn-DTPA fue eficiente para separar sitios de probable respuesta de aquellos de respuesta improbable, ya que el 75% del total de sitios se ubicó en los cuadrantes positivos. El umbral para el logro del 97% de RR fue de 1 mg kg⁻¹ (Figura 3).

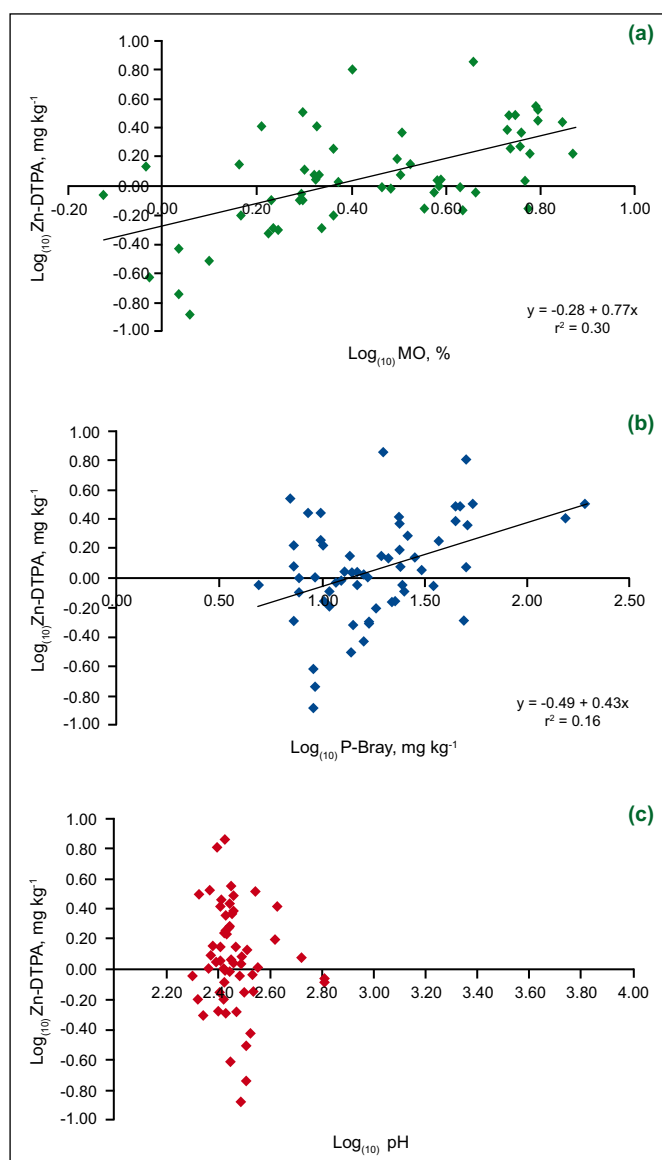


Figura 2. Relación entre el Zn-DTPA y la concentración de MO (a), P-Bray (b) y el pH (c) del suelo en presiembra (0-20 cm) en los 51 sitios.

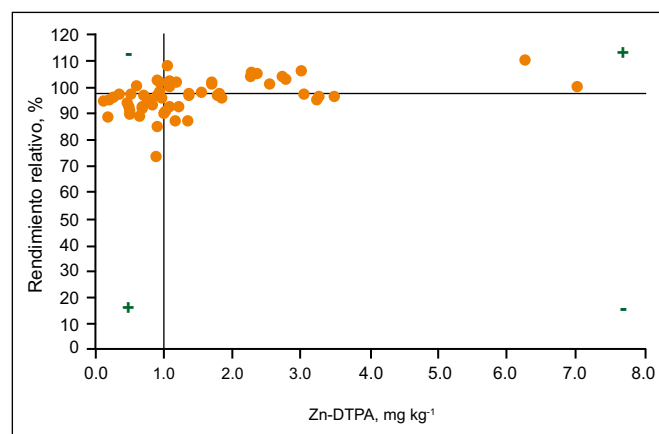


Figura 3. Relación entre el rendimiento relativo (RR) del tratamiento sin Zn (Zn0) y la concentración de Zn-DTPA en el suelo (0-20 cm) en presiembra.

La concentración crítica determinada es cercana al rango de valores críticos (0.85 a 0.90 mg kg⁻¹) informado para el cultivo de maíz y soja (Lindsay y Norvell, 1978; Havlin y Soltanpour, 1981; Anthony et al., 2012).

Los resultados de este estudio constituyen un avance para el diagnóstico de la disponibilidad de Zn y el manejo de la fertilización, dado que hasta el momento no se disponía de información local que sintetizara resultados que abarquen un amplio rango de condiciones edafoclimáticas. En particular, se validaron los umbrales de Zn en el suelo que generalmente se emplean en otras zonas productivas a nivel mundial.

Conclusiones

Los resultados de este trabajo muestran que la disponibilidad de Zn podría limitar el rendimiento del cultivo de maíz. La concentración de Zn-DTPA en el suelo permitió separar adecuadamente sitios con y sin deficiencia de dicho nutriente.

Agradecimientos

Trabajo financiado por el proyecto INTA PNSUELO-1134024 y por el proyecto de la FCA-UNMdP 15/A464-AGR 464/14. Se agradece al laboratorio de suelos FERTILAB por su colaboración en el análisis de las muestras.

Bibliografía

- Alloway, B.J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environ. Geochem. Hlth.* 31:537-548.
- Astiz Imaz, P., P.A. Barbieri, H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas, y F. Covacevich. 2014. Indigenous mycorrhizal fungi from Argentina increase Zn nutrition of maize modulated by Zn fertilization. *Soil Environ.* 33:23-32.
- Anthony, P., G. Malzer, S. Sparrow, y M. Zhang. 2012. Soybean yield and quality in relation to soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 104:1443-1458.
- Alvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century Model. *Soil Use and Man.* 17(2):62-66.
- Brady, N.C., y R.R. Weil. 1999. *The nature and properties of soil.* 20th ed. Prentice-Hall, New Jersey, USA. 881 p.
- Bray, R.H., y L. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Cate R., y L. Nelson. 1991. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 35(4):658-660.
- Catlett, K.M., D.M. Heil, W.L. Lindsay, y M.H. Ebinger. 2002. Soil chemical properties controlling zinc +2 activity in 18 Colorado soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1182-1189.
- Echeverría, H.E., y H.R. Sainz Rosas. 2005. Nitrógeno. En: H.E. Echeverría, y F.O. García (eds). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos.* Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 69-95.
- Espósito G.P., G. Balboa, C.A. Castillo, y R. Balboa. 2010. Disponibilidad de zinc y respuesta a la fertilización del maíz en el sur de Córdoba. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Santa Fe. Argentina.
- Fontanetto, H., O. Keller, J. Albrecht, D. Gialivera, C. Negro, y L. Belotti. 2009. Manejo de la fertilización de la soja en la región pampeana norte y en el NOA Argentino. *Mejores Prácticas de Manejo. Simposio Fertilidad 2009* (Santa Fe, Rosario, may 13-14). pp. 109-118.
- Gutiérrez Boem F.H., y H.S. Steinbach. 2012. Leyes de la fertilidad. En: Álvarez R., P. Prystupa, M.B. Rodríguez, C.R. Álvarez (eds.). *Fertilización de cultivos y pasturas: diagnóstico y recomendación en la región pampeana.* Editorial Facultad Agronomía, Buenos Aires, Argentina. 656 p.
- Havlin, J.L., y P.N. Soltanpour. 1981. Evaluation of the NH₄HCO₃-DTPA soil test for iron and zinc. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:70-75.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, W.L. Nelson. 2005. Basic micronutrients. In: *Soil Fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management.* 7th ed. pp. 244-297.
- Lavado, R. 2006. La región Pampeana: Historia, características y uso de sus suelos. En: Álvarez R. (ed.) *Materia Orgánica "Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos"* Editorial Facultad de Agronomía, UBA. Buenos Aires, Argentina. pp. 1-11.
- Lindsay, W.L., y W.A. Norvell. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:421-428.
- Melgar, R., M. Lavandera, M. Torres Duggan, y L. Ventimiglia. 2001. Respuesta a la fertilización con boro y zinc en sistemas Intensivos de producción de maíz. *Ciencia del suelo* 19:109-114.
- Reussi Calvo, N., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas. 2008. Usefulness of Foliar Nitrogen-Sulfur Ratio in Spring Red Wheat. *Journal of Plant Nutrition.* 31:1612-1623.
- Rodríguez, P., M.J. Lema, G. González, y S. González Pimentel. 2005. Evaluación del reactivo Mehlich-3 como extractante multielemental. [on line] <<http://www.efa-dip.org/comun/publicaciones/comunicaciones/2005/Mehlich.pdf>> [consulta: 25 de Febrero 2015]
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H.P. Angelini. 2011. Niveles de materia orgánica y de pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo* 29:29-37.
- Sainz Rozas, H.R., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P. Barbieri, H.P. Angelini, G.E. Larrea, G. Ferraris, y M. Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? *Actas del Simposio Fertilidad 2013. IPNI-FERTILIZAR.* Rosario, 22 a 23 de Mayo de 2013.
- SAS Institute. 2008. *SAS/STAT user's guide, Version 9.2.* SAS Inst., Cary, NC.
- Sillanpaa, M. 1982. Micronutrients and the nutrient status of soils: A global study. *FAO Soils Bulletin* 48. pp. 169-179.
- Sims, J.T., y G.V. Johnson. 1991. Micronutrient soil tests. In *Micronutrients in agriculture (Book series 4):* 427-476. Mortvedt, J.J., F.R. Cox, L.M. Shuman, y M.R. Welch (Eds.) Ed. SSSA Madison, Winsconsin, USA.
- Urricariet, S., y R.S. Lavado. 1997. Respuesta del maíz a fertilizaciones balanceadas en suelos deteriorados. VI Congreso Nacional de Maíz. Pergamino. III: 219-224.
- Walkley, A., y I.A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.
- Wang, J.J., y D.L. Harrel. 2005. Effect of ammonium, potassium, and sodium cations and phosphate, nitrate, and chloride anions on zinc sorption and lability in selected acid and calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1036-1046.