

MANEJO DE NITRÓGENO EN MAÍZ: AJUSTANDO UMBRALES DE RESPUESTA A NIVEL DE ZONA DE MANEJO DIFERENCIAL EN LA PAMPA DEPRIMIDA.

Garello, F.J.^{1¶}; Larrea, G.E.²; Sainz-Rosas, H.R.³; Cicchino, M.A.¹.

¹ AER INTA Chascomús. Mitre 202, Chascomús, Buenos Aires, Argentina.

² AER INTA Maipú.

³ EEA INTA Balcarce.

¶ mail de contacto: garello.federico@inta.gob.ar

NITROGEN MANAGEMENT IN MAIZE: SETTING RESPONSE THRESHOLDS AT THE DIFFERENTIAL MANAGEMENT ZONE LEVEL IN THE FLOODING PAMPA.

ABSTRACT

In the soils of Flooding Pampa, maize yield varies at the intra-field level in response to subsurface pH. This edaphic variable also conditions the response to available nitrogen in the soil (soil + fertilizer) (Nd_{SyF}). Therefore, it is necessary to implement site-specific nitrogen fertilization management practices to optimize resource use in each management zone (MZ). The objective of this study was to determine the response threshold to Nd_{SyF} in maize across environments with different subsurface pH ranges. The trials were conducted in fields of the Flooding Pampa and consisted of increasing levels of Nd_{SyF} in each MZ. The MZs were delineated using satellite imagery and yield maps, defining three groups of MZs according to subsurface pH range: 1) slightly acidic, 2) slightly alkaline, and 3) moderately alkaline. Grain yield differed among MZs and increased with rising Nd_{SyF} only in MZs with slightly acidic and slightly alkaline pH. The fertilization response threshold was 148 and 216 kg of Nd_{SyF} when pH was slightly acidic and slightly alkaline, respectively. In MZs with moderately alkaline pH, increases in Nd_{SyF} showed no significant variations in yield. The results of this study demonstrate the importance of implementing site-specific N management in maize crops and highlight the necessity of considering subsurface pH in each MZ, as this variable significantly conditioned Nd_{SyF} requirements.

PALABRAS CLAVE - KEYWORDS: EFICIENCIA EN EL USO DEL NITRÓGENO, ALCALINIDAD, FERTILIZACIÓN NITROGENADA.

INTRODUCCIÓN.

Durante los últimos 20 años, la superficie implantada con cultivos agrícolas en la Pampa Deprimida se incrementó en 800000 has. En esta región, históricamente considerada ganadera, durante la campaña 2024-25 se implantaron 160000 hectáreas de maíz, alcanzando un rendimiento promedio de 6 Tn/ha (BCBA, 2026). Sin embargo, la productividad alcanzada es muy variable, dado que los rendimientos a nivel de intra-lote pueden fluctuar de 4 a 15 Tn/ha.

El incremento de la superficie implantada, se dio al incorporar ambientes donde predominan suelos con una alta variabilidad espacial en sus propiedades físico-químicas como alcalinidad subsuperficial y profundidad al horizonte Bt (Imbellone et al., 2021; INTA, 1980). En este sentido, (Garello et al., 2023) reportaron que el pH subsuperficial es una de las variables edáficas con mayor impacto relativo sobre el rendimiento

potencial del cultivo de maíz en esta región. Garelo et al. (2026) han determinado, que la eficiencia de uso del nitrógeno del fertilizante (EUNf) en maíz cae ante incrementos del pH del estrato 0.4-0.6 m, llegando a una EUNf casi nula cuando el pH fue > 7.1 . En este sentido, el efecto combinado de menores rendimientos alcanzables (i.e: menor demanda), y caídas en la EUNf, apuntan a la existencia de diferentes umbrales críticos de nitrógeno (N) disponible en el suelo y el aportado por el fertilizante ($N_{d_{syF}}$), como ha sido reportado en otras regiones como el sudeste bonaerense y el sur de Santa Fe (Pagani et al., 2008; Salvagiotti et al., 2011). Sin embargo, poco se ha estudiado en qué medida difieren los umbrales de $N_{d_{syF}}$ y las EUNf en zonas de manejo (ZM) de productividad contrastante en la Pampa Deprimida.

El manejo sitio-específico de nutrientes como el N es ampliamente utilizado en diferentes regiones de la Argentina, y se han reportado diferencias en las EUNf entre diferentes ZM, dada la interacción que existe entre las ZM y la respuesta al N (Gregoret et al., 2011; Peralta et al., 2015). En este sentido, Peralta et al. (Peralta et al., 2015), trabajando en suelos del sudeste bonaerense informaron diferencias en la EUN de entre 2-3 kg de grano/kg de N aplicado entre diferentes ZM para el cultivo de trigo.

El objetivo de este trabajo fue determinar el umbral crítico de respuesta a la fertilización nitrogenada de maíz, en ambientes con diferentes potenciales de producción de la Pampa Deprimida, determinados por el pH subsuperficial.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Características generales y mediciones realizadas de los ensayos

Los experimentos se realizaron durante las campañas 2024-25 y 2025-26 en lotes de producción bajo siembra directa con diferentes antecesores, en el este de la Pampa Deprimida (**Figura 1**). En cada lote, se definieron ZM de productividad contrastante, mediante el uso combinado de imágenes satelitales y mapas de rendimiento de cultivos anteriores. Dentro de cada ZM se instalaron los ensayos, quedando definidos 10 combinaciones sitio-año (SA). Dado que en la Pampa Deprimida los rendimientos alcanzables varían tanto entre lotes como intra-lote, principalmente asociados a los valores de pH subsuperficial, se realizó un análisis descriptivo de los niveles de pH subsuperficial en cada SA y se separó la base de datos en tres poblaciones, de acuerdo al rango de pH propuesto por Tan (Tan, 2011) (**Tabla 1**).

Previo a la siembra, para cada bloque se tomaron muestras de suelo de 0-0.2, 0.2-0.4 y 0.4-0.6 m de profundidad. Las muestras se secaron en estufa (30°C) y se tamizaron por una malla de 2 mm. A todas las muestras y profundidades se les determinó el pH actual en agua (relación suelo: agua 1:2.5) y contenido de $N-NO_3$ (Bremner and Keeney, 1966). Solo a las muestras de 0-0.2 m se les determinó el contenido de MO ($g\ 100\ g^{-1}$) por calcinación (Eyherabide et al., 2014) y P-Bray ($mg\ Kg^{-1}$) (Bray and Kurtz, 1945). Estas determinaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del IPADS Balcarce.

El diseño experimental utilizado fue en bloques completamente aleatorizados, con dos a tres repeticiones, según el sitio. Los tratamientos consistieron en dosis crecientes de N (**Tabla 1**), aplicados por única vez en superficie en el estadio de V_4 - V_5 del cultivo de maíz. El fertilizante utilizado fue UREA granulada (46-0-0). En todos los lotes se sembraron híbridos de maíz de alto potencial de rendimiento según lo recomendado para cada sitio.

A la madurez de los cultivos se evaluó el rendimiento en 2 m² de los dos surcos centrales de cada unidad experimental y se ajustó a la humedad de 0.14 kg de H₂O por kg de grano.



Figura 1. Ubicación geográfica de los ensayos en cada campaña. En rojo los sitios de la campaña 2024/25: Lez: Lezama, GGui: General Guido, Lar: Las Armas. En amarillo los sitios de la campaña 2025/26: Chas: Chascomús, Lez: Lezama, Mad: Madariaga.

Tabla 1. Descripción de los sitios-años (SA), pH (1:2.5), P-Bray y niveles de nitrógeno, y rango de pH, donde se establecieron los ensayos de fertilización nitrogenada.

SA	Campaña	Localidad ^β	pH	P-Bray	Niveles de N disponible [¶]	Rango de pH
1	2024/25	Lez	7.14	15.4	63 - 103 - 143 - 223	Moderadamente alcalino
2	2024/25	Lez	8.53	3.96	64 - 104 - 131 - 224	Moderadamente alcalino
3	2024/25	GGui	6.57	7.60	67 - 126 - 173 - 245	Ligeramente ácido
4	2024/25	LAr	6.87	5.76	49 - 89 - 129 - 207	Ligeramente ácido
5	2024/25	LAr	8.06	10.07	51 - 101 - 145 - 200	Moderadamente alcalino
6	2025/26	Chas	6.96	16.30	48 - 118 - 177 - 208	Ligeramente alcalino
7	2025/26	Chas	7.3	20.65	59 - 129 - 188 - 219	Moderadamente alcalino
8	2025/26	Lez	6.78	12.60	81 - 126 - 171 - 216	Ligeramente ácido
9	2025/26	Mad	7.05	7.58	106 - 216 - 299	Ligeramente alcalino
10	2025/26	Mad	7.02	6.47	75 - 158 - 268	Ligeramente alcalino

^β Lez: Lezama, GGui: General Guido, Lar: Las Armas, Chas: Chascomús, Mad: Madariaga.

[¶] Los niveles más bajos de N corresponden al nitrógeno disponible en el suelo (N-NO₃) a la siembra 0-0.6 m en el tratamiento testigo sin fertilizar.

Análisis de datos

Según los niveles de pH de cada uno de los SA, se establecieron ZM ligeramente ácidas ($\text{pH} < 6.9$), ligeramente alcalinas ($6.95 < \text{pH} < 7.1$) y moderadamente alcalinas ($7.1 < \text{pH} < 8.6$). Para determinar los umbrales críticos (UC) de Nd_{SyF} para cada ZM, en cada población de datos se realizaron ajustes de regresión Lineal-Plateau entre el Rendimiento y el nivel de N disponible (N en el suelo y el aplicado con el fertilizante; Nd_{SyF}) (Ec 1)

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento} &= a + b * \text{Nd}_{\text{SyF}}; & \text{si } x < \text{UC } \text{Nd}_{\text{SyF}}. \\ \text{Rendimiento} &= b * \text{UC } \text{Nd}_{\text{SyF}}; & \text{si } x > \text{UC } \text{Nd}_{\text{SyF}}. \end{aligned} \quad [\text{Ec } 1]$$

Para realizar todos los análisis estadísticos se utilizó el programa NAVURE (Navure Team, 2023), como una interface del paquete nlme del software R (R Core Team, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Los ensayos abarcaron un amplio rango de niveles de Nd_{SyF} en cada ZM (**Figura 2**). Los rendimientos obtenidos variaron entre 5970-12665 kg ha^{-1} en las ZM con pH ligeramente ácido, entre 6150-9820 kg ha^{-1} en las ZM con valores de pH ligeramente alcalino, y entre 5390-8777 kg ha^{-1} en las ZM con pH moderadamente alcalino (**Figuras 2 A, B y C**, respectivamente). Estos resultados en conjunto, evidencian que el pH subsuperficial es un factor clave en la determinación de los rendimientos máximos alcanzables en secano por el cultivo de maíz en la Pampa Deprimida, lo cual está en línea con lo observado por Garelo et al. (2023a) en soja y maíz. Los rendimientos obtenidos en las ZM ligeramente ácidas, son similares a los reportados en ambientes de medio y alto potencial por Correndo et al. (2021), mientras que los obtenidos en las ZM ligera y moderadamente alcalinas, se encuentran dentro del rango de producción alcanzado en ambientes de muy bajo potencial de la región pampeana, reportadas por el mismo autor.

En promedio, el cultivo de maíz produjo 36.5 kg ha^{-1} y 13 kg ha^{-1} de grano por cada 1 kg de Nd_{SyF} en las ZM ligeramente ácidas y ligeramente alcalinas, respectivamente (**Figura 2 A y B**). Estas eficiencias de uso del N disponible, fueron inferiores a las informadas por Correndo et al. (2021) en suelos con texturas medias con potenciales de rendimiento medio y alto.

El UC a partir del cual no se observaron incrementos en los rendimientos fue de 148 y 216 kg de Nd_{SyF} , en las ZM ligeramente ácidas y ligeramente alcalinas, respectivamente (**Figura 2 A y B**). Mientras que, en las ZM con pH moderadamente alcalino, la aplicación de N no modificó los rendimientos. Por lo cual tampoco se pudo determinar un umbral crítico de Nd_{SyF} (**Figura 2 C**). En este sentido, los UC de las ZM ligeramente ácidas, fueron similares a los reportados en años promedios en el sudeste bonaerense (Pagani et al., 2008) o en ambientes con rendimientos $> 9.500 \text{ kg/ha}$ del centro-sur de Santa Fe (Salvagiotti et al., 2011). Sin embargo, en contraposición a lo reportado por Salvagiotti et al. (2011), en nuestro trabajo los UC fueron más altos en ambientes con menores rendimientos alcanzables (i.e: ambientes ligeramente alcalinos).

El pH edáfico influye en la disponibilidad y consumo de nutrientes por parte de los cultivos debido a cambios en la anatomía de las raíces (Barrow and Hartemink, 2023; Läuchli and Grattan, 2012). Sumado a esto, los sectores con pH alcalino de la Pampa Deprimida, presentan altos niveles de sodio intercambiable, que reduce la porosidad

efectiva por destrucción de la agregación del suelo, y en consecuencia los anegamientos temporarios son más frecuente que otros sectores donde el pH se encuentra en rangos neutros o ligeramente ácidos (Imbellone et al., 2021; INTA, 1990). En este sentido, además se ha determinado recientemente que a medida que el pH del suelo es mayor, la capacidad del mismo a proveer N a los cultivos, se reduce (Larrea et al., 2026). Estas condiciones, podrían explicar en parte los resultados no esperados en este trabajo de altos UC en ambientes de medio/bajo potencial de producción. Una hipótesis plausible, es que la menor EUN pudo haber sido consecuencia de pérdidas por desnitrificación de N, asociadas a anegamientos temporarios en sectores ligeramente alcalinos, posteriores a la aplicación del fertilizante (Echeverría and Sainz Rozas, 2014). Esto, exacerbado por una menor capacidad de los suelos en estos sectores, de proveer N al cultivo (Larrea et al., 2026). En este sentido, a futuro deberían evaluarse estrategias que minimicen las pérdidas por desnitrificación en estos ambientes anegables y que no impacten negativamente en la productividad del cultivo, como i) fraccionar la fertilización en estadios de crecimiento más avanzados (Maltese et al., 2024), ii) el uso de fertilizantes con inhibidores de la desnitrificación (Zhang et al., 2023), o iii) la combinación de ambas.

En la medida que las condiciones de crecimiento se tornaron más adversas frente al aumento del pH (como ocurre en las ZM moderadamente alcalinas, **Figura 2C**), la absorción de N (y en consecuencia el rendimiento) habría estado condicionada por cambios anatómicos a nivel de raíces y/o toxicidad de iones específicos en esos niveles de alcalinidad (Läuchli and Grattan, 2012), motivo por el cual, la respuesta a la fertilización fue nula.



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

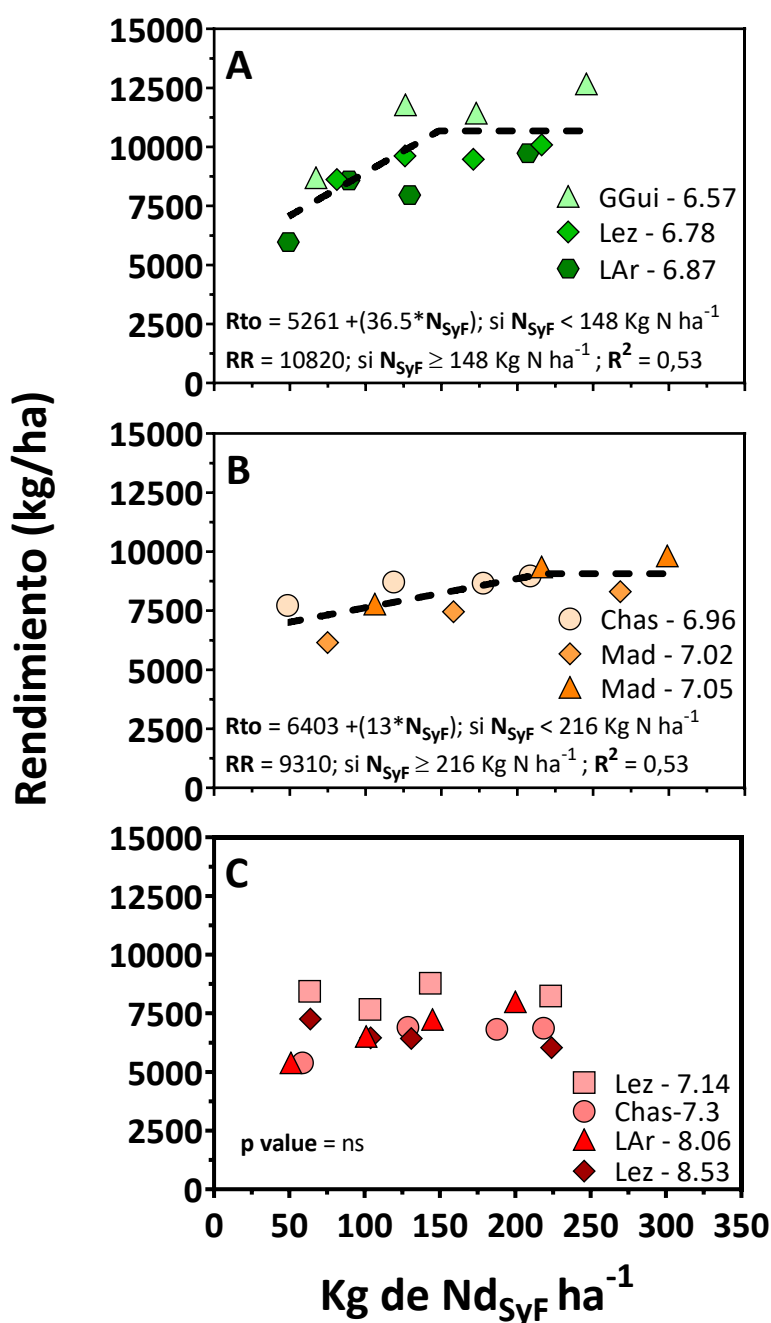


Figura 2. Relaciones entre el rendimiento del maíz expresado en kg ha⁻¹ con el nitrógeno disponible en el suelo a la siembra y el aplicado con el fertilizante ($N_{d_{SyF}}$), en ambientes ligeramente ácidos (A), ligeramente alcalinos (B) y moderadamente alcalinos (C).

CONCLUSIONES

El umbral de nitrógeno disponible para lograr el máximo rendimiento alcanzable en cada ambiente se incrementó cuando el pH subsuperficial paso de niveles ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos. Los sectores con pH moderadamente alcalinos no respondieron a la fertilización nitrogenada. En consecuencia, para definir la dosis de N a aplicar en los lotes de producción típicos de la Pampa Deprimida, es necesario delimitar ambientes intra-lote, y determinar el rendimiento alcanzable en cada uno de ellos cuantificando el pH en el estrato 0.4-0.6 m, lo que determinará la

respuesta a la fertilización, ya que las mayores EUN se observaron en ambientes de alto rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA

Barrow, N.J., Hartemink, A.E., 2023. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>

BCBA, 2026. <https://www.bolsadecereales.com/estimaciones-monitoreo> [WWW Document]. *Monitor Histórico*.

Bray, R.H., Kurtz, L.T., 1945. DETERMINATION OF TOTAL, ORGANIC, AND AVAILABLE FORMS OF PHOSPHORUS IN SOILS. *Soil Sci.* 59, 39–46.

Bremner, J.M., Keeney, D.R., 1966. Determination and Isotope-Ratio Analysis of Different Forms of Nitrogen in Soils: 3. Exchangeable Ammonium, Nitrate, and Nitrite by Extraction-Distillation Methods. *Soil Science Society of America Journal* 30, 577–582. <https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000050015x>

Correndo, A.A., Gutiérrez Boem, F.H., García, F.O., Alvarez, C., Alvarez, C., Angeli, A., Barbieri, P.A., Barraco, M., Berardo, A., Boxler, M., Calviño, P.A., Capurro, J.E., Ciampitti, I.A., Díaz Zorita, M., Díaz Valdéz, S., Ferrari, M., Ferraris, G.N., Gambaudo, S., Espósito, G., Gudelj, V., Ioele, J.P., Melchiori, R.J.M., Molino, J., Orcellet, J.M., Pagani, A., Pautasso, J.M., Reussi Calvo, N.I., Redel, M., Rillo, S., Sainz Rozas, H.R., Saks, M., Tellería, Ma.G., Ventimiglia, L., Zorzín, J.L., Zubbillaga, Ma.M., Salvagiotti, F., 2021. Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen : A synthesis analysis for Argentina. *Field Crops Res.* 273. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108299>

Echeverría, H.E., Sainz Rozas, H.R., 2014. NITRÓGENO, in: Echeverría, H.E., García, F.O. (Eds.), *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA, Buenos Aires, pp. 189–224.

Eyherabide, M., Saínz Rozas, H., Barbieri, P.A., Echeverría, H.E., 2014. Comparación De Métodos Para Determinar Carbono Orgánico En Suelo. *Ciencia del Suelo* 32, 13–19.

Garello, F.J., Larrea, E.G., Sainz Rozas, H.R., Cicchino, M.A., 2026. EFECTO DEL PH SUBSUPERFICIAL SOBRE LA RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ, in: XXX Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo. Bariloche, Argentina.

Garello, F.J., Melani, E.M., Cicchino, M.A., Taboada, M.A., 2023. ALCALINIDAD O PROFUNDIDAD AL HORIZONTE ARCILLOSO ¿QUÉ LIMITA MÁS LOS RENDIMIENTOS INTER-ANUALMENTE EN LA CUENCA DEL SALADO?, in: VII CONGRESO DE LA RED ARGENTINA DE SALINIDAD. Santa Rosa, La Pampa.

Gregoret, M.C., Díaz Zorita, M., Dardanelli, J., Bongiovanni, R.G., 2011. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. *Precis. Agric.* 12, 831–849. <https://doi.org/10.1007/s11119-011-9224-7>

Imbellone, P.A., Taboada, M.A., Damiano, F., Lavado, R.S., 2021. Genesis, Properties and Management of Salt-Affected Soils in the Flooding Pampas, Argentina, in: *Saline and Alkaline Soils in Latin America*. Springer International Publishing, Cham, pp. 191–208. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52592-7_10

INTA, 1990. Cartas de suelos de la República Argentina: Provincia de Buenos Aires [WWW Document]. URL <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm> (accessed 7.4.21).

INTA, 1980. La Pampa Deprimida: Condiciones de drenaje de sus suelos.

Larrea, E.G., Garelo, F.J., Cicchino, M.A., Sainz Rozas, H.R., 2026. PREDICCIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NITROGENO A CAMPO EN AMBIENTES HIDRO-HALOMORFICOS, in: XXX Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo. Bariloche, Argentina.

Läuchli, A., Grattan, S.R., 2012. Soil pH extremes, in: Plant Stress Physiology. pp. 194–209. <https://doi.org/10.1079/9781845939953.0194>

Maltese, N.E., Carciochi, W.D., Caviglia, O.P., Sainz Rozas, H.R., García, M., Lapaz, A.O., Ciampitti, I.A., Reussi Calvo, N.I., 2024. Assessing the effect of split and additional late N fertilisation on N economy of maize. Field Crops Res. 308. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109279>

Pagani, A., Echeverría, H.E., Sainz Rozas, H.R., Barbieri, P.A., 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo 26, 183–193.

Peralta, N.R., Costa, J.L., Balzarini, M.G., Castro Franco, M., Córdoba, M.A., Bullock, D., 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. Comput. Electron. Agric. 110, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.10.017>

R Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing.

Salvagiotti, F., Castellarín, J.M., Ferraguti, F.J., Pedrol, H.M., 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. Ciencia del Suelo 29, 199–212.

Tan, K.H., 2011. Principles of Soil Chemistry, 4th ed. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1097/00010694-199812000-00009>

Zhang, Y., Wang, W., Yao, H., 2023. Urea-based nitrogen fertilization in agriculture: a key source of N₂O emissions and recent development in mitigating strategies. Arch. Agron. Soil Sci. 69, 663–678. <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2025588>