



**DIAGNÓSTICO DE LA DISPONIBILIDAD DE ZINC Y BORO PARA EL CULTIVO DE
SOJA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SUELO Y PLANTA**

Ana Natalia Bustos

Trabajo de Tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al Título de

MAGISTER en Producción Vegetal

Orientación Fertilidad de Suelos

Área de Agricultura

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS AGRARIAS

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

Unidad Integrada Balcarce

(Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP – Estación Experimental Agropecuaria
Balcarce, INTA)

Balcarce, Argentina

Agosto de 2022

**DIAGNÓSTICO DE LA DISPONIBILIDAD DE ZINC Y BORO PARA EL CULTIVO
DE SOJA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SUELO Y PLANTA**

Ana Natalia Bustos



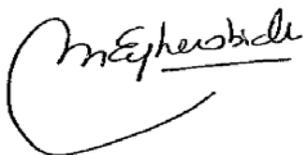
Ing. Agr. (M. Sc., Dr.) Hernán René Sainz Rozas
Director de Tesis



Ing. Agr. (M. Sc., Dr.) Pablo Andrés Barbieri
Co-Director de Tesis



Ing. Agr. (M. Sc.) Carolina Alvarez
Asesora



Bioq. (M. Sc.) Mercedes Eyherabide
Asesora



Ing. Agr. (M. Sc., PhD.) Nicolás Wyngaard
Asesor

**DIAGNÓSTICO DE LA DISPONIBILIDAD DE ZINC Y BORO PARA EL CULTIVO DE
SOJA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SUELO Y PLANTA**

Ana Natalia Bustos

Aprobada por:

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'N. Reussi Calvo', enclosed in a thin black rectangular border.

Ing. Agr. (Dr.) Nahuel Reussi Calvo

Ing. Agr. (M. Sc.) Gustavo Néstor Ferraris

Ing. Agr. (M. Sc., Dr.) Gabriel Pablo Espósito Goya

DEDICATORIA

A mi familia, Marcela y Roberto, promotores de mis sueños y metas, por su enorme cariño, confianza y acompañamiento incondicional.

A las mujeres que despertaron en mí la curiosidad y el deseo por aprender y que me han inspirado, motivado y guiado, Señora Blanca, Susana Araoz, Silvia Ryan, Carolina Alvarez.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mis padres y a toda mi familia, por el amor y el empuje. Un agradecimiento a cada uno de ustedes que fueron los pilares, que me permitieron subirme a sus hombros para ver un mañana y soñar un futuro, y que propiciaron las condiciones para que pudiéramos iniciar nuestro camino en la Universidad, para construir una sociedad más justa y cuidar el planeta, a través de la ciencia. Gracias por valorarme, por recordarme que soy “la Nati”, la que jugaba con barro desde chiquita, la que siempre llega a tarde, la que creen que sabe de enfermedades de limoneros o identificar especies selváticas de Misiones...gracias por creer en mí y confiar. ¡Gracias siempre!

A mi Director de tesis Hernán Sainz Rozas, quien me orientó en el desarrollo de la maestría con gran dedicación, comprensión y compromiso no solo en lo académico sino en lo personal, permitiéndome trabajar con libertad y confianza, en el Laboratorio de Suelos de INTA EEA Balcarce.

A Carolina Alvarez mi asesora de tesis y directora de beca de formación INTA, por darme la oportunidad de dar los primeros pasos en la investigación, desde 2015 como directora de beca estudiantil, y por brindarme la posibilidad de realizar mi posgrado. Por el espacio, apoyo, tiempo, palabras de ánimo, dedicación y los recursos necesarios para llevar a cabo mi tesis. Por compartir mates, reuniones en 1 de mayo y 31 de diciembre; por las risas, las lágrimas, las anécdotas y las experiencias generosamente transmitidas.

A mi comité asesor Pablo Barbieri, Mercedes Eyherabide y Nicolás Wyngaard, por su excelente predisposición, por transmitirme sus conocimientos, sus consejos, sus críticas y el tiempo dedicado.

Al personal del Laboratorio de Suelos y Aguas de INTA EEA Manfredi y Laboratorio de Suelos de INTA Balcarce, Romi, Luz, Lourdes, Sergio y María, por sus indicaciones, abrazos y la mesada compartida. A mi compañero Sebastián, por su colaboración en determinaciones de laboratorio, manejo de equipos y amistad.

A la profesora Gabriela Cendoya, por su enseñanza y asesoramiento en el análisis estadístico y por abrirme las puertas de su casa y su palestra en mi estadía en Balcarce.

A mis compañeros de trabajo del Grupo de Manejo de Cultivos y Recursos Naturales. En particular Dieguito, Came, Sojita, Diego, Facu, Claudio, Joaquín por su colaboración en muestreos a campo, determinaciones y manejo de ensayos. A los productores que permitieron realizar mis ensayos, y a Mónica y Tito por ponerme en contacto con ellos. A las pasantes Paula, Agustina y Roció, por su colaboración en el laboratorio.

Al Programa de Posgrado de INTA, al Laboratorio de Suelos y Aguas de INTA EEA Manfredi, Laboratorio de Suelos de INTA EEA Balcarce, PN SUELO 01134024 y PICT 2017 0757 por financiar mis estudios y el trabajo de tesis.

A la Educación pública, laica y gratuita, en la cual me formé como sujeto social, y finalmente como profesional.

A mis amistades de la vida Silvi, Sole, Nayla, Negro, Anita y en especial a aquellas que conocí en la Residencia Casino Dormitorio de INTA Balcarce, por todos los buenos momentos compartidos y por hacerme sentir en casa, Pochi, Juan, Clarita, Cachi, Pachu, Iván, Gastón, Cabezón, Joaco, Walter, Yoly.

Y en especial, a Feta quien fue mi compañero en estos años de escritura de la tesis, por su cariño, ánimo, confianza y acompañamiento, y por ser la persona con quien hoy, iniciamos el mayor aprendizaje de nuestras vidas, el de ser mamá y papá.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL.....	iv
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Contexto mundial y regional	1
1.2 Dinámica del zinc en el suelo y en la planta.....	5
1.3 Dinámica del boro en el suelo y la planta.....	6
1.4 Métodos de diagnóstico.....	8
1.4.1 Análisis de la disponibilidad de zinc mediante metodologías en suelo y tejido	8
1.4.2 Análisis de la disponibilidad de boro mediante metodologías en suelo y tejido	9
1.5 Hipótesis.....	12
1.6 Objetivos.....	13
1.6.1 Objetivo general.....	13
1.6.2 Objetivos específicos	13
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
2.1 Caracterización de los sitios experimentales	14
2.1.1 Estudio principal	14
2.2 Determinaciones en suelo	16
2.2.1 Determinación de zinc extractable	17
2.2.2 Determinación de boro extractable	17
2.3 Determinaciones en tejido vegetal	18

2.3.1 Determinación de zinc total en tejido foliar y grano	18
2.3.2 Determinación de boro total en tejido foliar y grano	18
2.4 Red de ensayos adicional.....	19
2.5 Determinación de rendimiento y cálculo de rendimiento relativo.....	21
2.6 Modelo de respuesta en función de los indicadores de disponibilidad de Zn y B	21
2.7 Análisis estadístico	25
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
3.1 Variables edáficas de los sitios experimentales y su relación con el Zn y B extractables en el suelo.....	28
3.2 Respuesta a la fertilización foliar con Zn, B y Zn+B	35
3.2.1 Rendimiento en grano.....	35
3.2.2 Relación entre la respuesta en rendimiento del cultivo de soja a la fertilización foliar con Zn y B y los rendimientos máximos	39
3.2.3 Concentración de Zn y B en tejido foliar en el estudio principal	43
3.2.4 Concentración total de Zn y B en grano de soja en el estudio principal.....	47
3.3 Relación entre la respuesta a la fertilización foliar y la disponibilidad de Zn y B en el suelo.....	51
3.3.1 Relación entre la respuesta en rendimiento relativo de soja y la disponibilidad de Zn-DTPA en el suelo del estudio principal y estudio adicional.....	51
3.3.2 Relación entre la respuesta en rendimiento relativo de soja y la disponibilidad de B-CaCl ₂ en el suelo.....	52
3.3.3 Relación entre la respuesta en rendimiento relativo de soja y la disponibilidad de B-AcNH ₄ en el suelo del estudio principal y estudio adicional	54
3.3.4 Relación entre la respuesta en rendimiento del cultivo de soja debido a la fertilización foliar con Zn y B y las variables edáficas	55
3.4 Relación entre la respuesta y la concentración total de Zn y B en tejido foliar en el estudio principal.....	56

3.4.1 Relación entre la respuesta a Zn y su concentración foliar en V ₇ y R ₂ en soja	56
3.4.2 Relación entre la respuesta a B y su concentración foliar en V ₇ y R ₂ en soja	57
3.5 Relación entre la respuesta a la fertilización foliar y la concentración total de Zn y B en el grano	58
3.5.1 Relación entre la respuesta a Zn y su concentración en grano de soja	58
3.5.2 Relación entre la respuesta a B y su concentración en grano de soja	60
4. CONSIDERACIONES FINALES	61
5. CONCLUSIÓN	63
6. BIBLIOGRAFÍA	64

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de los sitios experimentales evaluados en el estudio principal.....	15
Tabla 2. Caracterización de los sitios experimentales del estudio adicional.	19
Tabla 3. Parámetros edáficos en el estrato superficial del suelo (0 a 20 cm) y estadísticos descriptivos de los sitios experimentales para las variables textura (%); pH; carbonato de calcio (CaCO ₃); materia orgánica (MO); capacidad de intercambio catiónico (CIC); fósforo extractable (P-Bray ¹); zinc extractable con DTPA (Zn-DTPA); boro extractable con CaCl ₂ (B-CaCl ₂) y boro extractable con acetato de amonio (B-AcNH ₄).....	29
Tabla 4. Correlación entre variables edáficas, zinc extractable con DTPA (Zn-DTPA), boro extractable con cloruro de calcio (B-CaCl ₂), boro extractable con acetato de amonio (B-AcNH ₄), pH, carbonato de calcio (CaCO ₃), materia orgánica (MO), fósforo extractable (P-Bray ¹), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y textura (%) en el horizonte superficial (0-20cm) en los ambientes del ensayo principal.	32
Tabla 5. Media de rendimiento en grano (Rg) del cultivo de soja en Mg ha ⁻¹ y su error estándar (E.E.) del tratamiento testigo (TT), con agregado foliar de boro (TB), con agregado foliar de zinc (TZn) y con agregado foliar de zinc y boro (TZn+B) por ambiente evaluado en el estudio principal (en negrita) y adicional.....	36
Tabla 6. Concentración de Zn en hoja (CZnh) en el estadio R ₂ del cultivo de soja en mg kg ⁻¹ por ambiente y por tratamiento del estudio principal. Los tratamientos son: testigo (TT), con agregado foliar de zinc (TZn), con agregado foliar de boro (TB) y con agregado foliar de zinc y boro (TZn+B).....	44
Tabla 7. Concentración de boro en hoja (CBh) medida en el estadio R ₂ del cultivo de soja en mg kg ⁻¹ por tratamiento según el ambiente del estudio principal. Los tratamientos son: testigo (TT), con agregado foliar de zinc (TZn), con agregado foliar de boro (TB) y con agregado foliar de zinc y boro (TZn+B).....	46
Tabla 8. Concentración de zinc en grano (CZng) de soja en mg kg ⁻¹ por tratamiento según el ambiente del estudio principal. Los tratamientos son: testigo (TT), con agregado foliar de zinc (TZn), con agregado foliar de boro (TB) y con agregado foliar de zinc y boro (TZn+B).	48

Tabla 9. Concentración de boro en grano (CBg) de soja en mg kg ⁻¹ por tratamiento según el ambiente del estudio principal. Los tratamientos son: testigo (TT), con agregado foliar de zinc (TZn), con agregado foliar de boro (TB) y con agregado foliar de zinc y boro (TZn+B).	50
---	----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de las deficiencias de zinc en el suelo y en seres humanos en el mundo (Alloway, 2008a).	2
Figura 2. Concentración de zinc (Zn) extractable con DTPA (mg kg^{-1} ; 0-20 cm) en A) suelos prístinos (2011), B) con historia agrícola muestreados en 2011 y C) con historia agrícola muestreados en 2018 (Sainz Rozas et al., 2019).	2
Figura 3. Concentración de boro (B) extractable con acetato de amonio (mg kg^{-1} ; 0-20 cm) en A) suelos prístinos (2011), B) con historia agrícola muestreados en 2011 y C) con historia agrícola muestreados en 2018 (Sainz Rozas et al., 2019).	3
Figura 4. Ubicación de los sitios experimentales del estudio principal (círculos rojos) y del estudio adicional (círculos azules).	20
Figura 5. Relación entre el promedio de respuesta en rendimiento grano de soja en Mg ha^{-1} (ΔRg) por el agregado de Zn en relación el rendimiento del tratamiento fertilizado con zinc (TZn) en Mg ha^{-1} en los ambientes del estudio principal y adicional, según la disponibilidad de Zn-DTPA.	40
Figura 6. Relación entre el promedio de respuesta en rendimiento grano de soja en Mg ha^{-1} (ΔRg) por el agregado de B en relación el rendimiento del tratamiento fertilizado con boro (TB) en Mg ha^{-1} en los ambientes del estudio principal y adicional, según la disponibilidad de B- CaCl_2	41
Figura 7. Relación entre el promedio de respuesta en rendimiento grano de soja en Mg ha^{-1} (ΔRg) por el agregado de B en relación el rendimiento del tratamiento fertilizado con boro (TB) en Mg ha^{-1} en los ambientes del estudio principal y adicional, según la disponibilidad de B- AcNH_4	42
Figura 8. Relación entre el rendimiento relativo de soja (RR%) sin aplicación de Zn y la concentración de Zn-DTPA en mg kg^{-1} (0-20 cm) ajustado con el modelo arcoseno-logaritmo ($n=26$). Se excluyeron dos ambientes con valores anormales de Zn-DTPA y bajo %RR. El NC fue ajustado al 95% del RR.	51
Figura 9. Relación entre el rendimiento relativo de soja (RR%) sin aplicación de B y la concentración de B- CaCl_2 en mg kg^{-1} (0-20 cm) ajustado con el modelo arcoseno-logaritmo ($n=24$). El NC fue ajustado al 95% del RR.	53

- Figura 10. Relación entre el rendimiento relativo de soja (RR%) sin aplicación de B y la concentración de B- AcNH_4 en mg kg^{-1} (0-20 cm) ajustado con el modelo arcoseno-logaritmo (n=17). El NC fue ajustado al 95% del RR..... 54
- Figura 11. Relación entre el rendimiento relativo en soja (RR) en % y la concentración total de zinc en hoja (CZnh) del cultivo de soja del estudio principal en mg kg^{-1} medido en A) V_7 y B) en R_2 56
- Figura 12. Relación entre el rendimiento relativo en soja (RR) en % y la concentración total de boro en hoja (CBh) del cultivo de soja del estudio principal en mg kg^{-1} medido en A) V_7 y B) en R_2 57
- Figura 13. Relación entre la concentración total de Zn en grano en mg kg^{-1} y el rendimiento relativo de soja (%) en los ambientes del estudio principal..... 59
- Figura 14. Relación entre la concentración total de boro en grano en mg kg^{-1} y el rendimiento relativo de soja (%) en los ambientes del estudio principal..... 60

RESUMEN

El zinc (Zn) y el boro (B) son los principales micronutrientes limitantes en los suelos de la región pampeana argentina (RPA). En soja (*Glycine max* (L.) Merr.), su deficiencia afecta negativamente procesos fisiológicos claves para el crecimiento de la planta. Sin embargo, el límite entre deficiencia y toxicidad es estrecho en B, y respecto a Zn al ser un metal pesado, es fundamental un adecuado diagnóstico de su disponibilidad. En Argentina, existe escasa información sobre métodos de diagnóstico y respuesta en rendimiento por el agregado foliar Zn y B en soja. El objetivo de este trabajo fue evaluar y comparar la capacidad predictiva de métodos de diagnóstico de deficiencia de Zn y B basados en el análisis de suelo y planta (hoja y grano). Para ello, en 2017 y 2018, se establecieron 10 ensayos a campo en la provincia de Córdoba, utilizando un diseño experimental en bloques completos aleatorizados. Además, se analizó información previa de 16 ensayos realizados en la RPA y extra pampeana. En todos los estudios, se evaluaron cuatro tratamientos: T0 (testigo), TB (con agregado de B), TZn (con agregado de Zn) y TZn+B (con agregado de Zn más B) aplicados al follaje en V₇. Se tomaron muestras de suelo (0-20 cm) a la siembra y se analizó textura, pH, materia orgánica del suelo (MO), fósforo extractable (P-Bray¹), capacidad de intercambio catiónico (CIC), Zn extractable con DTPA (Zn-DTPA), B extractable con CaCl₂ en agua caliente (B-CaCl₂) y con acetato de amonio (B-AcNH₄). Además, se tomaron muestras de hoja (estadio V₇ y R₂) y grano y se determinó su concentración total de Zn (CZnh) y B (CBh). Se determinaron niveles críticos (NC) y el rango crítico (RC) de dichos NC con un intervalo de confianza del 95%, utilizando el método del arcoseno-logaritmo. La fertilización incrementó el rendimiento en grano según el ambiente, y en general no afectó la concentración total de Zn y B en tejido foliar o en el grano. El Rg se incrementó un 16% y un 11% debido al agregado foliar de Zn y B, respectivamente. Se estableció un NC para Zn-DTPA de 1,25 mg kg⁻¹ (RC=0,92-1,71 mg kg⁻¹), para B-CaCl₂ de 0,72 mg kg⁻¹ (RC=0,57-0,91 mg kg⁻¹) y para B-AcNH₄ de 0,76 mg kg⁻¹ (RC=0,61-0,94 mg kg⁻¹). En base a esto, se determinó que el 65% de los ambientes estaban por debajo del NC de Zn-DTPA, y entre el 50 y 76% por debajo del NC de B-CaCl₂ y B-AcNH₄, respectivamente. Las inclusiones de variables edáficas a los modelos de diagnóstico no mejoraron su capacidad de predicción de la respuesta al agregado de Zn y B. El análisis de concentración total de Zn y B en tejido de soja en etapas tempranas o tardías no permitió el diagnóstico de la disponibilidad de Zn y B. Los resultados de este estudio muestran que, el Zn y el B son dos nutrientes que pueden limitar el Rg de soja, y que el análisis de suelo es el método de diagnóstico

más adecuado para evaluar su disponibilidad, lo cual es importante para un manejo racional de la fertilización.

Palabras clave: Glycine max; micronutriente; aplicación foliar; nutrición mineral, nivel crítico.

ABSTRACT

Zinc (Zn) and boron (B) deficiencies have become widespread in soils from the Argentine Pampas Region (RPA). These deficiencies can negatively affect physiological processes of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), limiting plant growth. However, the range between B deficiency and toxicity is narrow and, since Zn is a heavy metal, an adequate diagnosis of the availability of these nutrients is essential in agricultural soils. Limited information is available regarding the use of soil or plant tissue tests as indicators of Zn and B availability for soybean and their relationship with the soybean grain yield response to foliar fertilization in Argentina. The aim of this study was to evaluate and compare the effectiveness of soil and tissue tests for Zn and B availability diagnosis, and to evaluate the soybean grain yield response to foliar application of Zn and B (ΔRg). To this end, ten field experiments were carried out in 2017 and 2018 in Córdoba province, using a randomized complete block design. In addition, previous information from 16 field trials conducted within or outside the RPA was analyzed. Four treatments were evaluated: T0 (control), TB (added B), TZn (added Zn), and TZn+B (added Zn and B) applied to the foliage at V₇-V₈. Soil samples (0-20 cm) were collected at planting and particle size, pH, soil organic matter (MO), extractable phosphorus (P-Bray⁻¹), cation exchange capacity (CEC), Zn extractable with DTPA (Zn-DTPA), B extractable with CaCl₂ in hot water (B-CaCl₂), and with ammonium acetate (B-AcNH₄) were measured in these samples. In addition, samples of trifoliolate leaves were collected at the V₇ and R₂ growth stage, and the Zn (CZnh) and B (CBh) total concentration were determined. Critical thresholds (CT) were adjusted using the arcsine-logarithm method. Fertilization increased yield depending on the site, and in general, did not increase leaf or grain concentrations in soybean. The yield increased by 16 % and 11 % in the Zn and B treatments, respectively. Soil testing for Zn and B availability allowed predicting soybean grain yield response to fertilization. The determined CT for soybean were: 1,25 mg kg⁻¹ (0,92-1,71 mg kg⁻¹) for Zn-DTPA, 0,72 mg kg⁻¹ (0,57-0,91 mg kg⁻¹) for B-CaCl₂ and 0.76 mg kg⁻¹ (0.61-0.94 mg kg⁻¹) for B-AcNH₄. B-AcNH₄ was a better indicator of B availability than B-BaCl₂, since it allowed detecting B variability within a smaller number of sites. It was determined that 65% of the sites were below Zn's threshold, and between 50 and 76% were below B's threshold. Including edaphic variables to diagnostic models to predict soybean response to B and Zn fertilization did not improve their predictive. Neither early nor late-stage plant-tissue analysis of Zn and B total concentration allowed an accurate diagnosis of Zn and B availability. Our results show that deficiency Zn and B can limit

soybean crop yield and the soil analysis of these micronutrients was the best diagnostic method to evaluate their availability.

Key words: Glycine max; micronutrients; foliar application; mineral nutrition, threshold.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto mundial y regional

El zinc (Zn) y el boro (B) son considerados micronutrientes debido a los bajos requerimientos de los mismos que presentan los cultivos, pero su deficiencia afecta negativamente procesos fisiológicos clave para el crecimiento de la planta. La deficiencia de Zn en los suelos es un problema mundial, que provoca graves pérdidas de rendimiento y el deterioro de la calidad nutricional de los cultivos (Cakmak et al., 2017). Su deficiencia es común en suelos degradados y calcáreos, y se estima que afecta a un tercio de los suelos agrícolas (Alloway, 2008a; Wessells y Brown, 2012), frecuentemente en el sur y sudeste de Asia, sur de África y América Central (Hotz y Brown, 2004) (Figura 1). A su vez entre los micronutrientes, las deficiencias de Zn en los cultivos es la más frecuente lo que hace que alrededor de un tercio de la población humana consuma una cantidad inadecuada de Zn en su dieta (Barker y Pilbeam, 2015) (Figura 1). Por otro lado, un estudio realizado por la FAO, reveló que la deficiencia de B es un problema que afecta a 8 millones de hectáreas en todo el mundo (Tariq y Mott, 2007). A su vez, los procesos de degradación de los suelos, provocan variaciones en sus propiedades químicas y físicas, que impactan en la disponibilidad de los macro y micronutrientes limitando su absorción por parte de las plantas (Alloway, 2008b).

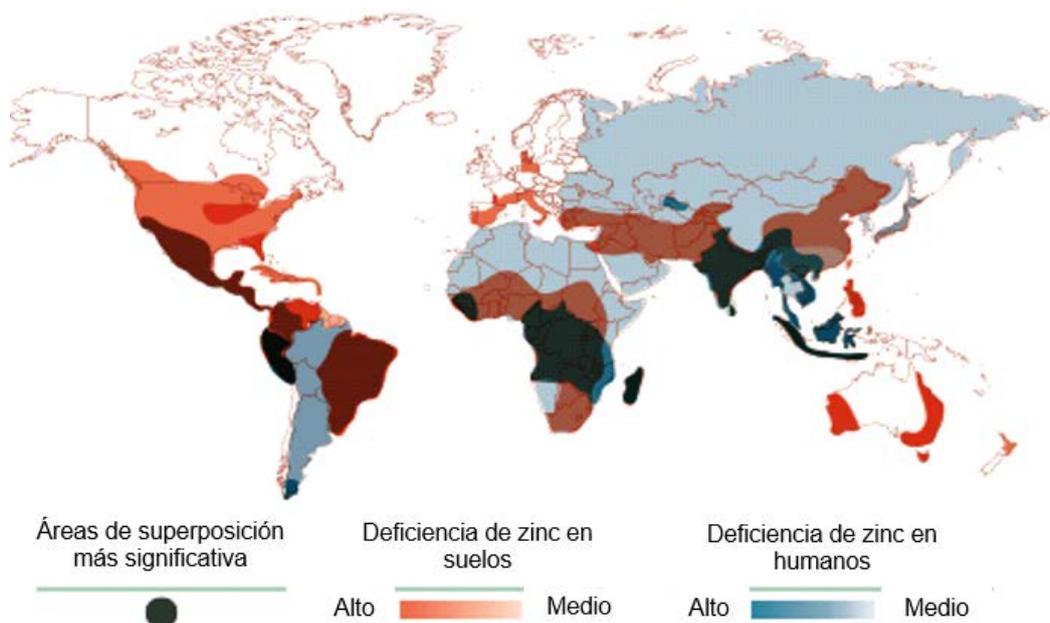


Figura 1. Distribución de las deficiencias de zinc en el suelo y en seres humanos en el mundo (Alloway, 2008a).

En los suelos de la región pampeana argentina (RPA), investigaciones recientes han alertado sobre importantes reducciones en los contenidos de micronutrientes, principalmente de Zn y luego de B, debido a la actividad agrícola (Figura 2 y Figura 3) (Sainz Rozas et al., 2019). La disponibilidad de Zn y B en los suelos agrícolas se redujo un 82% y un 50%, respectivamente, respecto a los suelos prístinos (Figura 2 y Figura 3) (Sainz Rozas et al., 2019). Dentro de la región, los menores contenidos de Zn y B ($<1 \text{ mg kg}^{-1}$), se registraron al norte de la RPA, con valores cercanos o inferiores a los umbrales críticos internacionales (Torri et al., 2011; Miretti et al., 2012; Barbieri et al., 2017). A su vez, esta zona es la que concentra la mayor producción de soja en la Argentina (Sainz Rozas et al., 2019).

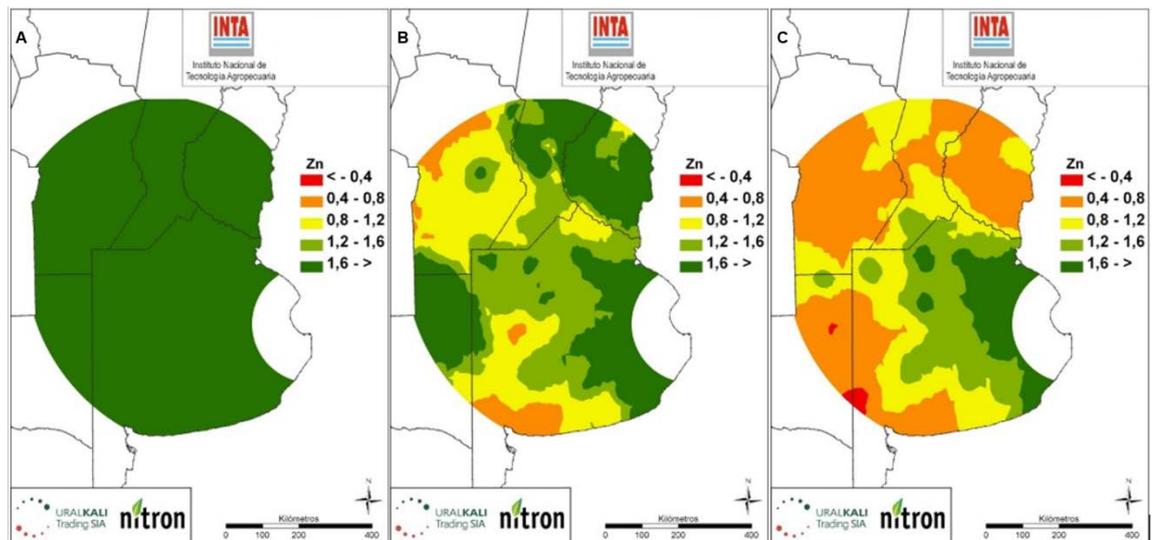


Figura 2. Concentración de zinc (Zn) extractable con DTPA (mg kg^{-1} ; 0-20 cm) en A) suelos prístinos (2011), B) con historia agrícola muestreados en 2011 y C) con historia agrícola muestreados en 2018 (Sainz Rozas et al., 2019).

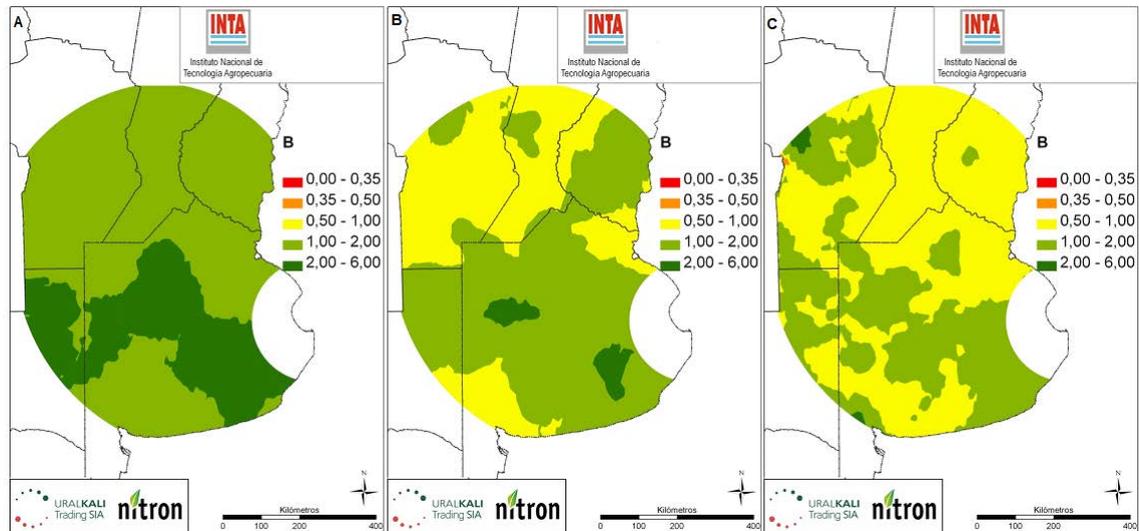


Figura 3. Concentración de boro (B) extractable con acetato de amonio (mg kg^{-1} ; 0-20 cm) en A) suelos prístinos (2011), B) con historia agrícola muestreados en 2011 y C) con historia agrícola muestreados en 2018 (Sainz Rozas et al., 2019).

Una de las causas de la disminución de la concentración de Zn y B en los suelos de la RPA, podrían estar relacionada con la escasa fertilización a los cultivos o reposición al suelo (García y Díaz Zorita, 2015). La escasa reposición de nutrientes ha sido atribuida a un conjunto de causas políticas y socio-culturales (Lavado y Taboada, 2009). Algunas son históricas y otras están relacionadas con la poca información sobre métodos de diagnóstico de la fertilidad, el bajo uso de análisis de suelos por parte de los productores y la creencia arraigada de la existencia de suelos con elevada fertilidad natural (Andrade, 2017). En este sentido, el muestreo de suelos es particularmente bajo en el cultivo de soja, dado que, a nivel nacional, sólo el 15% de los productores realizan análisis de suelo previo a la fertilización (Bolsa de Cereales de Buenos Aires, 2019).

En este contexto, se comenzaron a realizar estudios de respuesta a la aplicación de Zn y B en cultivos extensivos, como maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.) en distintas áreas de la RPA (Melgar et al., 2001; Sainz Rozas et al., 2003; Ferraris et al., 2009; Espósito et al., 2010; Barbieri et al., 2017). Sin embargo, para el cultivo de soja son menores los casos de estudio de fertilización con Zn y B. En la bibliografía internacional se ha reportado que la aplicación de Zn y B no se tradujo en aumentos de rendimiento (Enderson et al., 2015; Mallarino et al., 2017; Sutradhar et al., 2017), pero en estos casos los contenidos de dichos nutrientes en el suelo no eran limitantes.

En Argentina, el cultivo de soja representa el 55% de los casi 37 millones ha que se siembran en el país (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2022). Desde la década del '90 el incremento en la producción de soja se ha dado principalmente por un aumento de la superficie sembrada. En cambio, el rendimiento evolucionó a una tasa menor y aún no han sido alcanzados los rendimientos potenciales en secano (Aramburu et al., 2015). Los desbalances nutricionales son uno de los causantes de las brechas en el rendimiento. La brecha de rendimiento es la diferencia entre el rendimiento potencial en secano respecto al rendimiento promedio del productor. Resultados de investigaciones realizadas en la RPA demuestran una respuesta del cultivo de soja a la fertilización con fósforo y azufre para alcanzar el rendimiento potencial (Divito et al., 2015; Sucunza et al., 2018). Sin embargo, no han sido ampliamente documentados experimentos donde se evalúe la extracción y la respuesta del cultivo al agregado de Zn y B pese a su importancia en el país.

El cultivo de soja presenta requerimientos nutricionales por kg de grano producido e índices de cosecha de nutrientes mayores que los cereales. El índice de cosecha de Zn (ICZn) en soja es levemente superior en comparación con los principales cereales cultivados (0,59, 0,52 y 0,44 para soja, maíz y trigo, respectivamente) (Ciampitti et al., 2013; García y Reussi Calvo, 2014; Salvagiotti et al., 2018). En un estudio reciente en EEUU, determinaron un ICZn=0,69 para un cultivo de soja de 4,4 Mg ha⁻¹ de rendimiento en grano (Gaspar et al., 2018). En cambio, Salvagiotti et al. (2018) en diferentes ambientes de la RPA y de EEUU, determinaron un ICZn de 0,59. Además, el ICZn en soja, comparado con el resto de los micronutrientes es superior (Bender et al., 2015; Gaspar et al., 2018; Salvagiotti et al., 2018). En el caso de B, algunos autores reportaron que los valores del índice de cosecha de boro (ICB) estuvieron por debajo del 50% (Bender et al., 2015; Gaspar et al., 2018). A nivel nacional se determinó un ICB de 0,38 (Salvagiotti et al., 2018) que es significativamente menor que el de ICZn. El Zn posee mayor IC y requerimientos en el cultivo de soja con respecto al B, por lo que los niveles de extracción por tonelada de Zn cuadruplican a los de B (36 g Mg⁻¹ y 7 g Mg⁻¹ de Zn y B exportados en grano, respectivamente) (Gutierrez Boem y Salvagiotti, 2014). Esto sugiere que las deficiencias de Zn pueden aparecer antes y limitar el desarrollo del cultivo de manera más marcada.

1.2 Dinámica del zinc en el suelo y en la planta

Los suelos poseen reservas de Zn en diferentes fracciones que contribuyen de manera continua y en diferente grado al suministro de Zn a la solución del suelo (Zhang et al., 1991). Su concentración total en los suelos depende de la composición de las rocas o minerales del material originario. Los suelos de la llanura chaco-pampeana, se desarrollaron a partir del loess y el contenido pseudo total de Zn, varía entre 29,4 a 61,5 mg de Zn kg⁻¹ en la profundidad 0-60 cm (Buffa y Ratto, 2009). En la provincia de Córdoba, ubicada en el centro de esta llanura, donde predominan suelos loésicos y limo-loésicos, los valores promedio fueron de 53,5 a 56,5 mg Zn kg⁻¹ en el estrato de 0-20 cm (Buffa y Ratto, 2009). Otro aspecto importante al definir el contenido de Zn de los suelos es la presencia o no de arcillas en el material originario. En general, suelos con alto contenido de arcilla tienen mayores concentraciones de Zn original que los suelos arenosos, debido a su mayor concentración nativa de Zn y su mayor capacidad para adsorber y retener Zn (Alloway, 2008b). Por otro lado, la disponibilidad de Zn disminuye con el aumento del pH del suelo debido al aumento de la capacidad de adsorción, la formación de formas hidrolizadas de Zn, la posible quimisorción en el carbonato de calcio y la coprecipitación en óxidos de hierro (Alloway, 2009). La solubilidad del Zn es altamente dependiente del pH y disminuye 100 veces por cada unidad de aumento de pH. Por encima de 7,7 el nivel de Zn⁺² en la solución de suelo es muy bajo, y las formas predominantes son el ZnOH⁺, y en menor medida Zn(OH)₂[°], que no se solubilizan fácilmente (Lindsay, 1991). Por lo tanto, aquellos factores que eleven el pH del suelo, afectan la disponibilidad de Zn. Experimentos de sorción y desorción de Zn, mostraron que un alto contenido de CaCO₃ reduce la solubilidad del Zn por las reacciones de quimisorción entre el Zn y el CaCO₃ y debido al aumento de pH (Cakmak 2008). Por otra parte, la materia orgánica del suelo (MO) es fuente de ácidos orgánicos que actúan como agentes quelantes, incrementando la solubilidad y disponibilidad del Zn (Shuman, 1991; Torri et al., 2011). Puede observarse así que las características físico-químicas del suelo, como su textura, pH y contenido de CaCO₃ y MO son determinantes sobre el contenido y solubilidad del Zn.

Las plantas absorben Zn como catión y como componente de complejos orgánicos naturales y sintéticos. El mecanismo de transporte de Zn⁺² a las raíces es por difusión. La complejización o quelación por compuestos orgánicos que se encuentran en los exudados de las raíces o producidos a partir de la descomposición de residuos

orgánicos facilita la difusión de Zn a las raíces (Havlin et al., 2016). En las plantas el Zn desempeña un rol fundamental en la actividad enzimática, integridad de las membranas, unión de radicales libres y síntesis de clorofila. Es importante para la síntesis de triptófano, componente de algunas proteínas, y también para la producción de hormonas de crecimiento (auxinas) como el ácido indol acético (Havlin et al., 2016). Debido a estas causas, los síntomas de deficiencia de Zn incluyen clorosis en hojas y, en casos graves, muerte de hojas, acortamiento de entrenudos y reducción en el desarrollo de raíces (Rafique et al., 2012; Ren et al., 1993). En soja, Pawlowski et al. (2019) demostraron que la deficiencia de Zn provoca una disminución en los niveles de N en hojas, tallos y raíces, y menor nodulación. Por otro lado, se demostró que la deficiencia de Zn en soja aumenta su susceptibilidad a varios patógenos del cultivo como esclerotinia y pulgones (Helfenstein et al., 2015). Además, aplicaciones sub-óptimas de Zn resultaron en niveles más altos de P en semillas y hojas en comparación con el control (Pawlowski et al., 2019). Por otro lado, si bien la mayoría de las plantas son tolerantes al exceso de Zn, donde la toxicidad ocurre con concentraciones de Zn en hoja $>400 \text{ mg kg}^{-1}$ (Havlin et al., 2016), la soja posee mayor sensibilidad a la toxicidad, dado que la concentración de Zn crítica es menor, 140 mg kg^{-1} (Borkert et al., 1998).

1.3 Dinámica del boro en el suelo y la planta

La fuente natural más común del B del suelo es la turmalina (borosilicato) que luego de procesos de degradación queda en forma de H_3BO_3 . Desde el punto de vista químico, el B es un metaloide, y posee propiedades de metales y no metales. Es importante destacar que el B es el único elemento que las plantas absorben bajo forma molecular en lugar de iónica. En el suelo, el B es considerado como uno de los elementos más móviles. Por lo tanto, concentraciones ligeramente altas de B pueden volverse tóxicas para las plantas, siendo el rango entre su deficiencia y toxicidad relativamente estrecho (Paull et al., 1991). Al igual que el Zn, su disponibilidad está regulada por factores edáficos (Rashid et al., 2004; Arora et al., 2014; Havlin et al., 2016). Se comprobó que la disponibilidad de B es menor en suelos calcáreos (Elrashidi y O'Connor, 1982), debido a la precipitación del B bajo la forma de borato de calcio (Goldberg, 1993; Elrashidi y O'Connor, 1982). Otro factor importante que afecta la disponibilidad de B es el pH del suelo (Saha et al. 2017). A medida que se incrementa el pH de la solución del suelo, usualmente en un rango de 3 a 9, disminuye la disponibilidad de B para las plantas debido a que las dos especies acuosas

involucradas, H_3BOH_3 y $\text{B}(\text{OH})_4^-$, no sólo tienen diferentes afinidades para ser adsorbidas por los coloides del suelo, sino también a que sus proporciones en el equilibrio de la solución varían con el pH (Goldberg, 1997).

Por otro lado, se ha reportado una correlación significativa entre el contenido de B y la MO (Goldberg et al., 2020; Niaz et al., 2007). En trabajos previos, se indicó que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una propiedad importante para evaluar la disponibilidad de B (Raza et al. 2002), dado el rol dominante de los minerales de arcilla en facilitar la adsorción de B. Matula (2009) determinó regresiones significativas al combinar la CIC con el análisis de B extractable por varios métodos para evaluar la disponibilidad de B.

La absorción de B por las plantas ocurre por difusión pasiva a través de la bicapa lipídica, y parcialmente a través de canales de proteínas (Dordas et al., 2000). Las plantas absorben la mayor parte del B en forma de H_3BO_3 , y en una mínima proporción como BO_3^{-3} . El BO_3^{-3} forma enlaces éster con un componente de la pectina (rhamnogalacturona II) contribuyendo así a la arquitectura y función de la pared celular, que es su principal función (O'Neill et al., 2004). Por ello, el 90% de B se encuentra en la pared celular de las plantas (Brown et al., 2002). Además, el B forma compuestos complejos "cis-diol" con las glicoproteínas y glicolípidos de la membrana plasmática, que mantienen la estructura de la misma e interviene en el metabolismo y su funcionalidad (Bassil et al., 2004). El B regula la actividad enzimática, participa en el transporte de azúcares a través de la membrana, síntesis de flavonoides y lignina, metabolismo de auxinas, compuestos nitrogenados y fenoles (Goldbach y Wimmer, 2007). En especies leguminosas, como la soja, influye en la formación y desarrollo de nódulos y en la fijación biológica de nitrógeno (Yamagishi y Yamamoto, 1994; Bolaños et al., 2004; Marschner, 2012). Además, se demostró que el B interviene en procesos relacionados a la fotosíntesis y eficiencia en el uso del agua (Fujiyama et al., 2019). El B es significativamente móvil en floema en especies arbóreas frutales de los géneros *Prunus*, *Pyrus* y *Malus* pero es restringida en la mayoría de los cultivos anuales, como la soja. Esto se debe a las diferencias entre los productos de la fotosíntesis, que en los cultivos anuales es la sacarosa mientras que en los frutales son polialcoholes (sorbitol, manitol, dulcitol) con los que el B forma compuestos cis-diol, facilitando su movilidad respecto a la sacarosa (Brown y Shelp, 1997; Brown and Hu, 1996).

Ante una deficiencia de B en el cultivo de soja se puede observar un cese en el crecimiento de la raíz, causado por la inhibición de la síntesis de ADN, como resultado del déficit de bases de pirimidina (Blevins y Lukaszewski, 1998). La deficiencia de B, también afecta la capacidad fotosintética y el transporte de productos fotosintéticos. Por otro lado, disminuye la fertilidad masculina, al reducir la microesporogénesis, la germinación y el alargamiento del tubo polínico (Cakmak y Römheld, 1997; Brown y Hu, 1997; Dzondo-Gadet et al., 2002).

1.4 Métodos de diagnóstico

1.4.1 Análisis de la disponibilidad de zinc mediante metodologías en suelo y tejido

Los métodos de diagnóstico utilizados actualmente se basan en el análisis de suelo mediante el uso de sustancias químicas que extraen parte del pool de Zn disponible para las plantas. Existen gran variedad de procedimientos de extracción e incluyen la utilización de sales neutras (CaCl_2 , NH_4NO_3 y NaNO_3), extractantes ácidos (CH_3COOH y HCl), agentes acomplejantes como el ácido etilen-diaminotetraacético y el ácido dietilen-triaminopentaacético (EDTA y DTPA) y técnicas a base de resinas (Menzies et al., 2007). La extracción con DTPA-TEA se ha utilizado con mayor frecuencia para evaluar el Zn disponible en suelos de pH neutro, como China y EEUU (Liu, 1994) y las concentraciones de Zn extraídas se correlacionan con la absorción de Zn por la planta. A nivel nacional, éste extractante fue útil para diagnosticar la deficiencia de Zn en maíz en suelos de la RPA (Barbieri et al., 2017; Martínez Cuesta et al., 2020) y podría utilizarse en el diagnóstico de Zn en soja, aunque no existen registros de trabajos donde se haya evaluado en dicho cultivo.

Por otra parte, el análisis de planta es una herramienta complementaria al diagnóstico por análisis de suelo, en virtud que refleja el estado nutricional de la planta (Correndo y García, 2012). La concentración total de Zn en el último trifolio superior maduro (CZnh) en época de plena floración (R_2) es un adecuado indicador de la disponibilidad de Zn en soja (Ritchie et al., 1985). Si bien existen rangos de suficiencia y deficiencia sugeridos para soja, estos niveles han sido calibrados en otras regiones del mundo (Jones, 1991; Sabbe et al., 2013; Bryson et al., 2014) y en Argentina aún no fue estudiada la factibilidad de utilizar la CZnh medida en R_2 como método predictor de la disponibilidad de Zn. A su vez, el análisis en dicha etapa fisiológica limita las posibilidades de corrección nutricional, por lo que sería relevante el uso CZnh en

estadios vegetativos tempranos como indicador del estado nutricional (Ross et al., 2006). En soja, en el estadio de V₇, el 40% del Zn se ha acumulado en la planta y las hojas constituyen el principal destino de acumulación de Zn (Bender et al., 2015). Por lo tanto, el análisis de la CZnh medido entre V₆-V₇ podría ser utilizado como método de diagnóstico y monitoreo temprano de la deficiencia de Zn. Sin embargo, la concentración de micronutrientes en tejido foliar presenta una variabilidad marcada en cada etapa de crecimiento del cultivo, particularmente para Zn (CV=45,6 %) (Gaspar et al., 2018). Esta variabilidad se suma a la dificultad para establecer rangos de suficiencia precisos y exactos que permitan monitorear la nutrición de las plantas, por lo que surge la necesidad de investigar métodos alternativos de evaluación (Enderson et al., 2015; Sutradhar et al., 2017).

Entre el análisis de hoja y de grano como tejidos diagnósticos, este último podría tener varias ventajas sobre el análisis de tejido foliar en soja. Las muestras de grano se obtienen y procesan de manera más sencilla, no hay una fecha crítica de muestreo, y, debido a que el grano se toma en la etapa final de desarrollo del cultivo, minimiza las diferencias en el contenido de nutrientes dada la etapa de crecimiento (Rashid y Fox, 1992). En este sentido, el análisis de grano podría ser un mejor indicador que el análisis de hoja (en V₇ ó R₂), debido a que integra todos los factores climáticos y edáficos que afectan la disponibilidad de nutrientes y su absorción por la planta durante el ciclo de cultivo y en casos de la deficiencia, esta condición no cambiaría, ya que no hay aportes externos de Zn. En un estudio de fertilización con Zn en suelos deficientes, Rashid y Fox (1992) propusieron al análisis de grano como tejido viable para el diagnóstico en soja, dado que no difiere del análisis de hoja. Hallmark et al. (1992) y recientemente Caires et al. (2020) también sugirieron sobre el potencial que el análisis de granos de soja tiene como herramienta de diagnóstico de nutrientes, y lograron establecer niveles de suficiencia. Si bien esta herramienta, no permite correcciones durante el ciclo del cultivo permite caracterizar el estado de disponibilidad del nutriente en el sitio. Sin embargo, en la actualidad son escasos los registros, a nivel nacional e internacional por lo que es necesario validar esta metodología.

1.4.2 Análisis de la disponibilidad de boro mediante metodologías en suelo y tejido

Para la cuantificación de la disponibilidad de B en el suelo se han utilizado varias soluciones extractoras para medir la cantidad total o una proporción del B disponible

para la planta, y se han correlacionado dichos valores con el crecimiento y la respuesta del cultivo. La metodología de extracción más difundida es mediante el empleo de agua caliente como extractante (Bingham, 1982; Sarkar et al., 2008; Saha et al., 2017), y permite extraer B de diferentes fuentes orgánicas y adsorbidas. Sin embargo, tiene limitaciones en la obtención de un extracto límpido y problemas de calentamiento homogéneo de las muestras (Sarkar et al., 2008). Para superar estos problemas, se propuso la utilización de cloruro de calcio 0,02 M (CaCl_2) caliente (Sarkar et al., 2008), que produce un extracto claro sin partículas disueltas, que de otra manera podrían interferir en la cuantificación por colorimetría. Mahler et al. (1983) realizaron una adaptación de la técnica con CaCl_2 en caliente utilizando bolsas de polipropileno, que se sumergen durante 5 minutos en agua caliente. El acetato de amonio (AcNH_4) es otro extractante efectivo en la estimación de B y fue propuesto como análisis universal (Mandal, 2009), debido a la correlación entre el B medido con este método y el B absorbido por la planta (Mandal y Pechová, 2006). La extracción con AcNH_4 a pH=5 favorece la desorción de B de los enlaces con los complejos orgánicos y la disolución de algunos componentes del suelo que adsorben B, (Mandal et al., 1993; Acuña, 2005). Además, se reportó su correlación con el B extraído con agua caliente y con CaCl_2 (Goldberg et al., 2002).

Otra herramienta recomendada para el diagnóstico de B, es el análisis de la concentración total de B (CBh) en la última hoja trifoliolada en la etapa R_2 . Pero, al igual que lo planteado para el caso de Zn, la recolección de muestras hojas de soja en estadios más tempranos de crecimiento podría permitir una ventana de tiempo más amplia para diagnosticar y corregir posibles deficiencias de B antes de que ocurran pérdidas de rendimiento (Ross et al., 2006). En el estadio de V_7 - V_8 el 40% del B se ha acumulado en la planta y aproximadamente el 50% de ese contenido se concentra en las hojas (Bender et al., 2015). Por lo tanto, la CBh medido en etapas tempranas de crecimiento puede estar correlacionada con la respuesta de la planta a la fertilización con B. Actualmente no existe información publicada sobre diagnóstico del estatus nutricional de B en plantas de soja basado en el análisis de hojas en la etapa temprana de crecimiento (V_5 - V_7) y tampoco existen niveles críticos de CBh medida en R_2 calibrados para condiciones locales.

De la misma manera que ocurre con el Zn, el análisis de B en tejido foliar presenta dificultades, aunque su variabilidad es menor que para Zn (CV=27,7%) (Gaspar et al., 2018). Por otro lado, los granos son una matriz más adecuada para la digestión en

seco que las hojas, por lo que, el diagnóstico utilizando el análisis de B en grano, podría aumentar la precisión. Recientemente Caires et al. (2020) ajustaron niveles críticos (NC) de CBg mediante el análisis de B en granos de soja para suelos del sur de Brasil. Aun así, existe escasa información sobre la utilización de la concentración total de B en el grano, como una herramienta de diagnóstico para evaluar el estado nutricional de B en soja.

El análisis del Zn y B extractables en el suelo son ampliamente utilizados, pero se ha informado la baja capacidad de los mismos como indicadores de disponibilidad para la planta y, por ende, como predictores de la respuesta en grano (Enderson et al., 2015; Sutradhar et al., 2017). En Zn, para el cultivo maíz se determinó una limitada asociación entre el Zn-DTPA y la respuesta a la fertilización con Zn, que si bien permitió determinar zonas de probabilidad de respuesta en función del Zn-DTPA, no fue suficiente para predecir su magnitud (Barbieri et al., 2017; Martínez Cuesta et al., 2021). Para el caso de B, no existen estudios de respuesta en función de la disponibilidad del B-AcNH₄ y B- CaCl₂. Por lo que, la incorporación de variables edáficas como textura, CaCO₃, pH, MO, CIC y P-Bray¹ a un modelo múltiple podría aumentar la precisión de la predicción de la respuesta y contribuir a mejorar el diagnóstico de la disponibilidad de Zn y B en soja.

1.5 Hipótesis

- El Zn-DTPA en suelo (0-20 cm) se asocia con la respuesta del cultivo de soja a la fertilización con Zn.
- El B-CaCl₂ en suelo (0-20 cm) se asocia con la respuesta del cultivo de soja a la fertilización con B.
- El B-AcNH₄ en suelo (0-20 cm) se asocia con la respuesta del cultivo de soja a la fertilización con B.
- La inclusión de variables edáficas como textura, pH, MO, CIC y contenido de P extractable en un modelo de diagnóstico basado en Zn-DTPA, mejora la capacidad predictiva de la respuesta al agregado de Zn.
- La inclusión de variables edáficas como textura, pH, MO, CIC y contenido de P extractable en un modelo de diagnóstico basado en B-CaCl₂, mejora la capacidad predictiva de la respuesta al agregado de B.
- La inclusión de variables edáficas como textura, pH, MO, CIC y contenido de P extractable en un modelo de diagnóstico basado en B-AcNH₄, mejora la capacidad predictiva de la respuesta al agregado de B.
- El análisis de tejido foliar de Zn en el estadio V₇ tiene similar capacidad predictiva que en R₂, y permite el diagnóstico temprano de la disponibilidad de Zn.
- El análisis de tejido foliar de B en el estadio V₇ tiene similar capacidad predictiva que en R₂, y permite el diagnóstico temprano de la disponibilidad de B.
- El análisis de la concentración total de Zn en grano se asocia con la respuesta del cultivo de soja a la fertilización con Zn.
- El análisis de la concentración total de B en grano se asocia con la respuesta del cultivo de soja a la fertilización con B.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

- Evaluar y comparar metodologías de diagnóstico de disponibilidad de Zn y B en el cultivo de soja, basados en el análisis de suelo o planta.

1.6.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la fertilización foliar con Zn, B y Zn+B sobre el rendimiento del cultivo de soja.
- Relacionar la respuesta en rendimiento debida a la fertilización con los valores de Zn-DTPA, de B-CaCl₂ y B-AcNH₄ en suelo (0-20 cm) y ajustar niveles críticos para el cultivo de soja.
- Estudiar las relaciones entre algunas variables edáficas (textura, pH, MO, P extractable, CIC) con los índices de disponibilidad de Zn y B y la respuesta del cultivo de soja.
- Evaluar la concentración de Zn y B en hoja y en grano como métodos de diagnóstico complementario de su disponibilidad en el cultivo de soja.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización de los sitios experimentales

2.1.1 Estudio principal

Durante las campañas 2017/2018 y 2018/2019 se llevaron a cabo experimentos a campo de fertilización foliar con Zn y B en el cultivo de soja, en 10 sitios ubicados en el centro de la provincia de Córdoba, en la zona noroeste de la RPA (Figura 4). Los ensayos se establecieron en lotes de producción agrícola y en lotes de la Estación Experimental Agropecuaria de INTA Manfredi, con más de 10 años de historia agrícola, en siembra directa y bajo condiciones de secano. El área de estudio está ubicada en la subregión que se conoce como basculada o pampa alta y presenta un relieve de lomas muy suavemente onduladas, desarrolladas sobre material loésico, de textura franco limosa (INTA, 2015). Los suelos predominantes son Haplustoles énticos y típicos (USDA, 1975) (Tabla 1). La temperatura media anual es de 16,6 °C, la media del mes más frío es de 9,5 °C y la media del mes más cálido es de 23,4 °C. La precipitación media anual es de aproximadamente 800 mm (600-900 mm), su régimen es de tipo monzónico (INTA, 2015) y muestra un gradiente creciente de oeste a este (Rolla et al., 2018). El clima del área de estudio se clasifica de acuerdo a Thornthwaite como sub-húmedo seco (Capitanelli, 1979; INTA, 2015). En la Tabla 1 se presentan las principales características de los sitios experimentales del estudio principal.

Tabla 1. Caracterización de los sitios experimentales evaluados en el estudio principal.

Año	Localidad	Provincia	Ref Ambiente	Tipo de suelo	PP ciclo (mm)	Antecesor	Variedad	Fecha de siembra	Densidad (sem ha⁻¹)
2018	Capilla Gazón	Córdoba	18-CG	Haplustol éntico	569	Soja	DM 4613	04/11/2017	230000
2018	Colonia Almada	Córdoba	18-CA	Haplustol éntico	426	Maíz	Nidera4611	25/11/2017	250000
2018	Laguna Larga	Córdoba	18-LL	Haplustol éntico	448	Maíz	DM 4212	16/11/2017	200000
2018	Manfredi	Córdoba	18-MA	Haplustol éntico	537	Maíz	FN 4.35	17/01/2018	400000
2018	Oncativo	Córdoba	18-ON	Haplustol éntico	842	Maíz	FN 4.35	20/11/2018	200000
2019	Pilar	Córdoba	18-PI	Haplustol éntico	842	Soja	DM 4270	29/11/2018	210000
2019	Manfredi	Córdoba	19-ML20	Haplustol típico	550	Maíz	DM 4615	28/11/2017	210000
2019	Manfredi	Córdoba	19-ML21	Haplustol éntico	598	Maíz	Nidera4611	17/11/2017	219000
2019	Río Tercero	Córdoba	19-RT	Haplustol típico	855	Maíz	40R16	15/11/2018	249000
2019	Tres Pozos	Córdoba	19-TP	Haplustol éntico	867	Maíz	4915	13/11/2018	288000

PP ciclo: precipitaciones de la estación de crecimiento de soja (Nov-Mar)

El diseño experimental fue en bloques completos al azar (DBCA) con 4 repeticiones. En cada sitio se evaluaron 4 tratamientos de fertilización (incluyendo al control sin fertilizar) quedando definidos los siguientes tratamientos: TT= testigo (sin aplicaciones de Zn ó B), TZn= con aplicación foliar de Zn, TB= con aplicación foliar de B y TZn+B= aplicación foliar de Zn y B. Las dosis utilizadas fueron 700 g Zn ha⁻¹ y 225 g B ha⁻¹ aplicadas de manera foliar, en los estadios entre V₇-V₈. En la campaña 2018/2019, la dosis de B se redujo a 100 g B ha⁻¹. Para realizar la aplicación se utilizó un aplicador manual con regulador de presión para garantizar homogeneidad en la dosis aplicada. La unidad experimental (UE) fue una parcela de 50 m². El largo de cada parcela fue de 12 m y de acuerdo a la separación entre surcos, se delimitaron entre 8-12 surcos.

Todos los experimentos se fertilizaron con 24 kg de P ha⁻¹ y 16 kg S ha⁻¹ utilizando como fuente superfosfato simple (9% P, 12% S y 18-20% Ca), de manera tal de no limitar el rendimiento del cultivo. Se realizaron prácticas de protección adecuadas contra plagas y enfermedades. En todos los sitios, los productores realizaron las prácticas agrícolas representativas de cada región.

2.2 Determinaciones en suelo

Previo a la siembra del cultivo en cada sitio se realizó un muestreo de suelos por bloque. Se tomaron muestras compuestas de suelo (25 submuestras) de la capa superficial (0-20 cm). Para su acondicionamiento, se extendieron sobre bandejas plásticas y se secaron a temperatura ambiente. Una vez secas, se molieron utilizando un mortero de madera y se tamizaron por malla de 2 mm para su análisis posterior.

Las determinaciones realizadas al suelo fueron: pH con un pHmetro (relación 1:2,5), textura por el método de la pipeta de Robinson (Gee y Bauder, 1986), MO (Walkey y Black, 1934), capacidad de intercambio catiónico (CIC; Chapman, 1965), contenido de carbonato de calcio (CaCO₃) por el método Schaibler (Calcímetro; Eijkelpamp Soil y Water, normas NEN5757 y DIN19682 y 19684), P-Bray¹ (Bray y Kurtz (1945) con posterior determinación colorimétrica del fosfato por el método de Murphy y Riley (1962).

2.2.1 Determinación de zinc extractable

Para la extracción y cuantificación de Zn-DTPA se utilizó la metodología propuesta por Lindsay y Norvell (1978), en la cual se utiliza DTPA como agente quelante. En un tubo de centrifuga de 50 ml se pesaron 10 g de suelo y se añadieron 20 ml de la solución extractora ajustada a pH 7,30 (0,005 M DTPA, 0,01 M de CaCl_2 y 0,1 M de TEA, trietanol amina). Se agitaron los tubos en posición horizontal durante 2 horas a 220 rpm en un agitador de vaivén a 20-25 °C. Luego, se procedió a centrifugar los tubos a fin de obtener un extracto límpido. Se filtró el extracto a través de un papel de filtro y por último se tomó una alícuota de sobrenadante para su cuantificación. La cuantificación de Zn se efectuó por espectrofotometría de absorción atómica por llama (Equipo Perkin Elmer PinAAcle 900H) y la concentración de Zn en el extracto se determinó utilizando estándares de Zn de 0,1; 0,2; 0,4; 0,8 y 1,2 mg ml^{-1} de concentración.

2.2.2 Determinación de boro extractable

B extractable con CaCl_2 (B- CaCl_2): La extracción de B se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Bingham (1982) adaptada para la utilización de bolsas plásticas sugerida por Mahler et al. (1983). Para ello, se pesaron 15,0 g de suelo seco molido en una bolsa de polipropileno (60 μm) y se añadieron 30 ml de solución de CaCl_2 0,02 M a través de un dispensador. Luego, se llevó a un baño en agua hasta ebullición y se dejó reaccionar por 10 minutos. El contenido de cada bolsa se filtró para obtener un extracto límpido. La cuantificación fue colorimétrica con azometina-H. En un tubo plástico de 12 ml, se añadieron 4 ml de extracto, 4 ml de solución buffer y 1 ml de solución colorante (azometina-H), se agitó y dejó reposar por 60 minutos para permitir el desarrollo de la reacción. La determinación B se realizó mediante espectrofotómetro UV/VIS a 420 nm utilizando estándares de B 0,2; 0,4; 0,8 y 1,6 mg ml^{-1} de concentración.

B extractable con acetato de amonio (B- AcNH_4): la extracción de boro se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Gupta y Stewart (1975) citada por Goldberg y Su (2007). Se pesaron 5 g de muestra de suelo y se transfirieron a un tubo de plástico de 50 ml. Se adicionaron 25 ml de la solución extractora de acetato de amonio, y se agitó por 30 minutos a 180 rpm en posición horizontal y en el sentido del vaivén del agitador. Luego, se filtró y se trasvasó una alícuota de 7,5 ml a un tubo de 15 ml. Para la reacción colorimétrica, se agregó 1 ml la solución de azometina-H, 1 ml de solución

de EDTA y 1 ml de la solución buffer. Se tapó el tubo, se mezcló y se dejó que desarrolle la reacción 2 horas. La determinación se realizó mediante espectrofotómetro UV/VIS a 420 nm, utilizando estándares de B 0,1; 0,2; 0,3; 0,5 y 1,0 mg ml⁻¹ de concentración.

2.3 Determinaciones en tejido vegetal

En los ensayos del estudio principal se realizaron muestreos de la última hoja trifoliolada expandida (sin pecíolo) en 30 plantas por unidad experimental en dos momentos del ciclo del cultivo: entre los estadios V₇-V₈, antes de realizar la fertilización con Zn y B, y luego, en R₁-R₂, luego de la fertilización (Fehr y Caviness, 1971). Las hojas fueron secadas en estufa a 60°C hasta peso constante. Una vez secas, se molieron con molinillo metálico y se tamizaron con tamiz malla <1mm.

2.3.1 Determinación de zinc total en tejido foliar y grano

La extracción de Zn se realizó mediante digestión ácida (Malavolta et al., 1997), para lo cual se agregaron 0,5 g de muestra de hoja o grano, 3 esferas de vidrio, y se añadieron 2,5 ml de ácido nítrico concentrado en un tubo de destilación. A continuación, se cubrió con embudo de vidrio y se dejó reaccionar durante 12 horas, bajo campana extractora de gases. Luego, se colocó en un bloque digestor y se elevó gradualmente la temperatura hasta los 150°C, una vez que se alcanzó dicha temperatura se dejó reaccionar por una hora. Finalizado el tiempo, se retiró el tubo del bloque, se dejó enfriar, se agregaron 2,5 ml de ácido perclórico y se elevó la temperatura a 205°C por dos horas. Se retiró del digestor, y una vez que se enfrió se diluyó con agua en matraz de 25 ml. La cuantificación se realizó por espectroscopia de absorción atómica por llama (Equipo Perkin Elmer PinAAcle 900H), utilizando concentraciones estándar de Zn de 0,2; 0,5; 1,0 y 2,0 mg ml⁻¹.

2.3.2 Determinación de boro total en tejido foliar y grano

Este método de análisis de B en tejido vegetal contempla la mineralización de la muestra por vía seca, mediante calcinación a una temperatura de 550°C durante 4 horas (Lohse, 1982) y luego se realiza la extracción de B utilizando una solución de H₂SO₄ 0,36 N. La cuantificación del B total se realiza por colorimetría con azometina-H y la lectura se efectúa a 420 nm de longitud de onda en espectrofotómetro UV/VIS

(Gaines y Mitchell, 1979), utilizando estándares de 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 y 5,0 mg ml⁻¹ de concentración.

2.4 Red de ensayos adicional

Además de los 10 ensayos de la provincia de Córdoba descriptos (Tabla 1), se adicionaron a este trabajo 18 experimentos de fertilización con Zn y B en soja. Dichos ensayos se llevaron a cabo en la región pampeana y extra pampeana durante las campañas 2014/2015 y 2015/2016 (Tabla 2)

El diseño experimental en estos ensayos fue en DBCA con 3 o 4 repeticiones. En cada sitio se evaluaron 4 tratamientos: TT= testigo (sin aplicaciones de Zn ó B), TZn= con aplicación foliar de Zn, TB= con aplicación foliar de B y TZn+B= con aplicación foliar de Zn y B. La fertilización fue de manera foliar de una dosis única de estos micronutrientes. Las dosis aplicadas variaron entre 100 y 225 g B ha⁻¹ y 700 g Zn ha⁻¹. El momento de aplicación de Zn se efectuó entre V₆-V₇ y para B entre V₆-V₇ o R₁-R₃. De cada experimento se contó con información de pH, P-Bray⁻¹, MO, Zn-DTPA y B-CaCl₂ en la capa superficial de suelo (0-20 cm) y rendimiento en grano. De manera complementaria se midió B-AcNH₄ en 7 de los 17 ensayos.

Tabla 2. Caracterización de los sitios experimentales del estudio adicional.

Año	Localidad /ensayo	Provincia	Referencia Ambiente	Tipo de suelo
2015	Balcarce INTA	Buenos Aires	15-BA1	Argiudol típico
2015	Santa Ana	Buenos Aires	15-BA2	Argiudol típico
2015	Oliveros	Santa Fe	15-OL	Argiudol típico
2015	Pergamino	Buenos Aires	15-PE	Argiudol típico
2016	Balcarce 1	Buenos Aires	16-BA1	Argiudol típico
2016	Balcarce 2	Buenos Aires	16-BA2	Argiudol típico
2016	Balcarce - Riego	Buenos Aires	16-BA-R	Argiudol típico
2016	Balcarce - Secano	Buenos Aires	16-BA-S	Argiudol típico
2016	Las Breñas	Chaco	16-CH	Haplustol óxico,
2016	Famaila	Tucumán	16-FA	Argiustol típico
2016	Oliveros 1	Santa Fe	16-OL1	Argiudol típico
2016	Oliveros 2	Santa Fe	16-OL2	Argiudol típico
2016	Pergamino 1	Buenos Aires	16-PE1	Argiudol típico
2016	Pergamino 2	Buenos Aires	16-PE2	Argiudol típico
2016	Rafaela 2	Santa Fe	16-RA	Argiudol típico
2016	El Palomar	Santiago del Estero	16-SE	Argiustol típico

2016	La Cocha Pintos	Tucumán	16-TUC	Argiustol típico
2016	La Cocha, Padovani	Tucumán	16-TUP	Argiustol típico

De esta forma, se conformó una red de 28 ensayos de fertilización foliar a campo a lo largo de la RPA y extra pamepeana, presentados en la Figura 4.

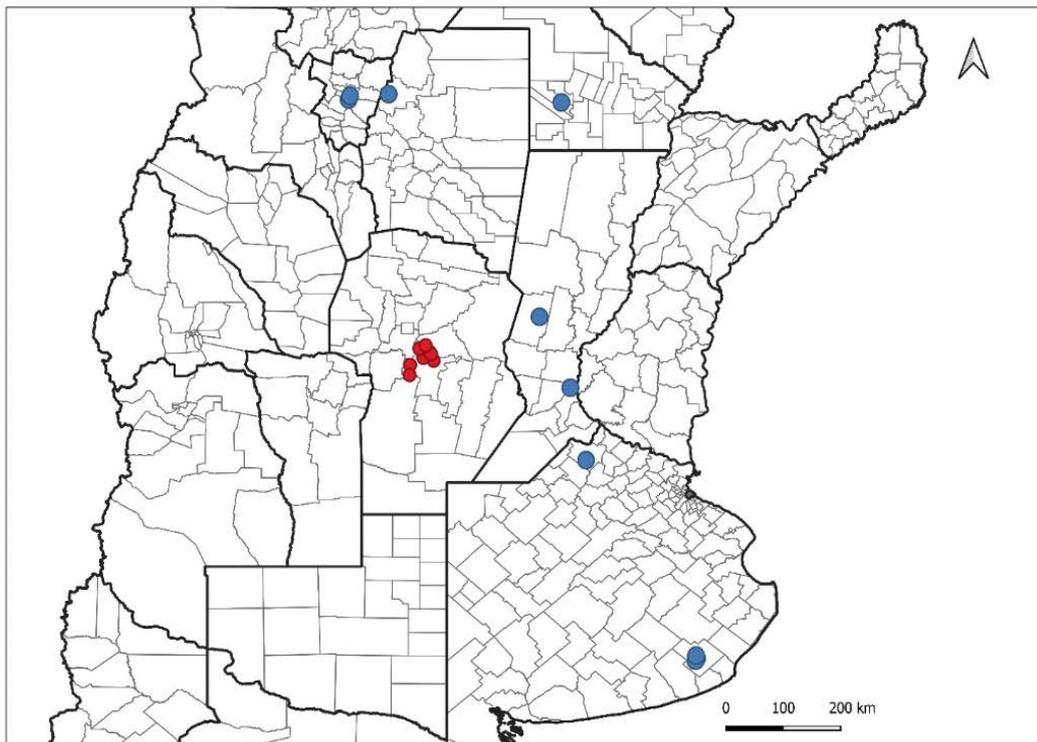


Figura 4. Ubicación de los sitios experimentales del estudio principal (círculos rojos) y del estudio adicional (círculos azules).

2.5 Determinación de rendimiento y cálculo de rendimiento relativo

En madurez fisiológica se determinó el rendimiento del cultivo del estudio principal, para lo cual se cosecharon manualmente 5 m² por parcela (seleccionando los 3 surcos centrales). Para medir el rendimiento en grano (Rg), las muestras de cada parcela fueron trilladas utilizando una trilladora estática, luego se pesaron y se midió contenido de humedad. El Rg se expresó en Mg ha⁻¹ a 13,5% de humedad.

Con el fin de determinar el aporte de cada nutriente al Rg, se evaluó la contribución individual de Zn y de B al TZn+B. No se determinó interacción significativa entre el B y el Zn (p-valor=0,137), para soja bajo las condiciones de estudio. Es decir que la aplicación conjunta de dichos elementos, no mejora la absorción individual de cada nutriente, indicando que estos nutrientes presentaron efectos aditivos sobre el Rg. Por lo tanto, la respuesta a la fertilización (ΔRg) se calculó como la diferencia entre el Rg del tratamiento fertilizado con Zn, B o Zn+B, y el Rg del tratamiento testigo, y se expresó en Mg ha⁻¹. Por otro lado, se calculó el rendimiento relativo (RR) como:

Ecuación 1

$$RR = \frac{Rg_{TT}}{Rg_{Tfertilizado}} \times 100$$

Donde, Rg_{TT} es el Rg del tratamiento testigo y $Rg_{Tfertilizado}$ es el Rg del tratamiento fertilizado con Zn, B ó Zn+B según el caso.

2.6 Modelo de respuesta en función de los indicadores de disponibilidad de Zn y B

Con la información obtenida del estudio principal y adicional se ajustaron modelos de predicción de respuesta de Rg del cultivo de soja a la fertilización con Zn y B y se determinaron niveles críticos de disponibilidad de Zn-DTPA, B-CaCl₂ y B-AcNH₄ en 0-20 cm. Para ello, se relacionaron RR y la disponibilidad de cada nutriente en el suelo utilizando la función arcoseno-logaritmo (CASL) descrita por Dyson y Conyers (2013) y adaptado por Correndo et al. (2017). El nivel crítico del análisis de suelo (NC) se estimó respecto a un nivel del RR del 95%. El modelo se describe a continuación:

Inicialmente, se transformaron a logaritmo natural las variables análisis de suelo (AS) y RR:

- Logaritmo natural del valor análisis de suelo = $\ln(AS)$, “Y”
- ArcoSeno (ASeno) de la raíz cuadrada del valor de RR = $\text{ASeno}[\sqrt{(RR/100)}]$, “X”.

Luego, el modelo centra los valores de X , respecto al RR para el cual se desea estimar el nivel crítico de análisis de suelo (ASC). Se definió para un RR=95%, y se restó a cada valor de X , el valor correspondiente del $\text{ASeno}\sqrt{(95/100)} = 1,345$. Luego, se realizó un diagrama de dispersión de $\ln-AS$ (eje Y), en función de los valores centrados del ASeno-RR (eje X). Se calculó el “ r_{xy} ”, que estima el coeficiente de correlación de Pearson entre X e Y . El paso siguiente fue la estimación de la ecuación de regresión lineal por el método de mínimos cuadrados (MC).

Ecuación 2

$$\hat{Y}_i = \hat{\alpha}_{MC} + \hat{\beta}$$

Donde, \hat{Y}_i son los valores estimados de $\ln-AS$, $\hat{\alpha}_{MC}$ es el estimador de la ordenada al origen por MC y $\hat{\beta}$ es el estimador de la pendiente.

Se procedió a la estimación de la función bivariada por el método de ejes principales estandarizados “SMA” (Standardized Major Axis). En este paso se rotó la función obtenida por MC comunes (Ec. 2) sobre el centroide de la elipse de datos. Para despejar la ecuación SMA, se relacionaron las pendientes de mínimos cuadrados ($\hat{\beta}_{MC}$) y de ejes principales estandarizados ($\hat{\beta}_{SMA}$) (Ec. 3). Posteriormente, se despejó la ordenada al origen ($\hat{\alpha}_{MC}$) mediante la igualdad de la Ec. 5. Finalmente, se obtuvo la función bivariada (SMA):

Ecuación 3

$$\hat{\beta}_{SMA} = \frac{\hat{\beta}_{MC}}{r_{xy}}$$

Donde, $\hat{\beta}_{MC}$ es el estimador de pendientes de mínimos cuadrados y r_{xy} es el estimador del coeficiente de correlación de Pearson entre X e Y

Ecuación 4

$$\bar{Y} = \hat{\alpha}_{MC} + \hat{\beta}_{MC} * \bar{X}$$

Donde, $\hat{\alpha}_{MC}$ es la ordenada al origen, $\hat{\beta}_{MC}$ es el estimador de pendientes de mínimos cuadrados y \bar{X} es el arcoSeno de la raíz cuadrada del valor de RR = $ASeno[\sqrt{(RR/100)}]$

Ecuación 5

$$\hat{\alpha}_{SMA} = \hat{Y} - \left[\left(\frac{\hat{\beta}_{SMA}}{r_{xy}} \right) * \bar{X} \right]$$

Donde, \hat{Y} es el estimador del logaritmo natural del valor análisis de suelo = $\ln(AS)$, $\hat{\beta}_{SMA}$ es el estimador de ejes principales estandarizados, r_{xy} es el estimador del coeficiente de correlación de Pearson entre X e Y y \bar{X} es el arcoSeno de la raíz cuadrada del valor de RR = $ASeno[\sqrt{(RR/100)}]$

Para la estimación del nivel crítico (NC), se consideró el modelo cuando $X=0$. Como en este caso los valores de X están centrados en RR=95%, la ordenada al origen representa el nivel $ASC_{95\%}$ (Ec. 6). Luego, se re transformó el estimador ($\hat{\alpha}_{SMA}$) a sus unidades originales mediante su recíproca (Ec. 7).

Ecuación 6

$$\hat{\alpha}_{SMA} = \ln(ASC_{95\%})$$

Donde, $ASC_{95\%}$ ordenada al origen para un RR=95%

Ecuación 7

$$ASC_{95\%} = e^{(\hat{\alpha}_{SMA})}$$

Donde, $\hat{\alpha}_{SMA}$ es el estimador de la ordenada al origen

Para estimar los intervalos de confianza (IC) del análisis del NC, se utilizó la estimación de error del estimador $\hat{\alpha}_{SMA}$ (Ec. 8 y Ec. 9). Un IC con un 95% de probabilidad equivale aproximadamente ± 2 errores estándar.

Ecuación 8

$$EE_{\hat{\alpha}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2} * \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \right]} = \sqrt{CME * \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{SC_x} \right]}$$

Donde, $EE_{\hat{a}}$ es el error estándar de la ordenada al origen, CME es el cuadrado medio del error del modelo (sumatoria de los residuales al cuadrado dividido los grados de libertad), SC_x es la sumatoria de los residuales al cuadrado de X , y n el número de observaciones.

Ecuación 9

$$IC_{\hat{\alpha}_{SMA}} = \hat{\alpha}_{SMA} \pm EE_{\hat{a}} * t_{(1-\frac{\alpha}{2}; n-2)}$$

Donde, $EE_{\hat{a}}$ es el error estándar de la ordenada al origen, y $t_{(1-\frac{\alpha}{2}; n-2)}$ es el valor de tabla de T de Student para una precisión igual α , y $n - 2$ grados de libertad.

Función de ajuste. La nueva ecuación de predicción de RR en función del AS se obtiene por despeje. La predicción del $\ln(AS)$ se realiza mediante una ecuación lineal (SMA) en función de los valores centrados de X estimados en el paso 2 (Ec. 10). La re-transformación de la variable a las unidades originales es mediante su función recíproca-exponencial-(Ec. 11). Finalmente, se obtiene la ecuación de predicción del RR (%) en función del nivel de AS (Ec. 12), donde $\hat{\alpha}_{SMA}$ y $\hat{\beta}_{SMA}$ fueron estimados previamente (Ec. 3; Ec.5).

Ecuación 10

$$\ln_{(AS)} = \hat{\alpha}_{SMA} + \hat{\beta}_{SMA} * \left[\text{Aseno} \sqrt{\frac{RR}{100}} - \text{Aseno} \sqrt{\frac{95}{100}} \right]$$

Donde, $\hat{\alpha}_{SMA}$ es el estimador de la ordenada al origen, $\hat{\beta}_{SMA}$ es el estimador de pendientes de mínimos cuadrados

Ecuación 11

$$AS = e^{\ln_{(AS)}}$$

Ecuación 12

$$RR(\%) = 100 * \left\{ \text{seno} \left[1,249 + \frac{\ln_{(AS)} - \hat{\alpha}_{SMA}}{\hat{\beta}_{SMA}} \right] \right\}^2$$

Para la estimación de NC de Zn-DTPA en 0-20 cm, se utilizó la información del ensayo principal (n=10) y de 18 ensayos del estudio adicional. Siguiendo el criterio descrito en la metodología de Conyers (2004), que recomienda eliminar del análisis casos en los que el análisis de suelo no es representativo de un ambiente, ó es un contenido elevado con respecto a la media y a la respuesta, se ajustó el modelo eliminando un ambiente fuera de rango (19-RT). El modelo fue ajustado para un n total=27, de acuerdo a la siguiente ecuación:

Ecuación 13

$$x (\ln Zn - DTPA) = e^{5,73 * \{ASIN[SQRT(\frac{RR}{100})]\}} - 7,45$$

Donde, $Zn - DTPA$ es la concentración de Zn-DTPA en el suelo y RR es el rendimiento relativo.

Para la estimación de NC de B disponible en 0-20 cm con B-CaCl₂, se utilizó información proveniente de los 10 experimentos del ensayo principal y de 14 ensayos del estudio adicional (n total=24). de acuerdo a la siguiente ecuación:

Ecuación 14

$$x (\ln B - CaCl_2) = e^{4,57 * \{ASIN[SQRT(\frac{RR}{100})]\}} - 6,47$$

Donde, $B - CaCl_2$ es la concentración de B-CaCl₂ en el suelo y RR es el rendimiento relativo.

Finalmente, para la estimación de NC de B disponible en 0-20 cm con B-AcNH₄, se utilizó información proveniente de los 10 experimentos del ensayo principal y de 7 ensayos del estudio adicional (n total=17), de acuerdo a la siguiente ecuación:

Ecuación 15

$$x (\ln B - AcNH_4) = e^{2,99 * \{ASIN[SQRT(\frac{RR}{100})]\}} - 4,31$$

Donde, $B - AcNH_4$ es la concentración de B- AcNH₄ en el suelo y RR es el rendimiento relativo.

2.7 Análisis estadístico

Para evaluar el efecto del agregado de Zn y B sobre la producción de granos de soja en una amplia gama de condiciones ambientales y de cultivo, se generó una nueva variable denominada "ambiente", cruzando el año de campaña por el sitio. Se ajustó un modelo lineal y mixto con efecto fijo tratamiento, ambiente, su interacción y

con efecto aleatorio del bloque anidado al ambiente. Los ajustes de modelos mixtos se realizaron con el paquete nlme (Pinheiro et al., 2013). A continuación, se presenta el modelo propuesto para explicar la variación del rendimiento en grano de soja.

Ecuación 16

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$i = 1,2,3,4$$

$$j = 1, \dots, 10$$

$$k = 1,2,3,4$$

Donde,

Y_{ijk} es el rendimiento en grano de soja en el k-ésimo bloque, en el j-ésimo ambiente, en la parcela que recibe el i-ésimo nivel de tratamiento,

μ es la media poblacional del rendimiento de soja,

τ_i es el efecto del i-ésimo nivel de tratamiento sobre el rendimiento de soja,

β_j es el efecto del j-ésimo ambiente sobre rendimiento de soja,

γ_k es el efecto aleatorio del k-ésimo bloque anidado dentro de cada ambiente,

$(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de interacción entre el i-ésimo nivel de tratamiento y el j-ésimo nivel de ambiente sobre el rendimiento de soja,

ε_{ijk} es el error de la observación en el k-ésimo bloque, en el j-ésimo nivel de ambiente y en la parcela que recibe el i-ésimo nivel de tratamiento.

Ante la falta de homogeneidad de varianza, se consideró una variabilidad residual distinta en cada ambiente, utilizando la función de varianza identidad (varIdent). Cuando se detectaron diferencias estadísticas significativas ($\alpha \leq 0,01$; 0,05 y 0,10), se realizaron comparaciones de medias mediante la prueba de comparación de medias DGC (Di Rienzo et al., 2018). Se consideró significativa la interacción ambiente y tratamiento (p-valor=0,0747) para el rendimiento de grano, y fue aceptada con un $\alpha \leq 0,10$. Los análisis se efectuaron empleando el software R (R Core Team, 2017)

mediante la interfaz RStudio (Versión 0.99.903) y utilizando el programa Infostat ((Di Rienzo et al., 2018).

Las correlaciones simples entre las variables de suelo fueron evaluadas usando el PROC CORR con tres niveles de significancia $\alpha=0,01$; 0,05 y 0,1. Por otro lado, se ajustaron modelos de regresión múltiple entre el ΔRg y las variables edáficas (textura, pH, $CaCO_3$, MO, CIC, P-Bray¹) para el estudio principal. El criterio de selección utilizado fue Stepwise, con un nivel de significancia del 0,05.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Variables edáficas de los sitios experimentales y su relación con el Zn y B extractables en el suelo

Los suelos presentaron una textura superficial franco limosa, con una composición granulométrica promedio de 60,12% de limo, 20,47% de arena y 19,41% de arcilla, en el horizonte superficial (Tabla 3). Se observó una elevada variabilidad en algunas propiedades edáficas, como en los contenidos de CaCO_3 y el P-Bray^{-1} (Tabla 3). Respecto a las variables de interés Zn-DTPA, B- CaCl_2 y B- AcNH_4 , se detectó una marcada variabilidad en los valores de Zn, y en menor medida en los de B. Entre los extractantes de B, el B- AcNH_4 presentó mayor coeficiente de variación respecto a B- CaCl_2 (Tabla 3).

La variación en los contenidos de Zn-DTPA ($\text{CV}=107,6\%$) encontrada en los sitios evaluados en esta región es concordante con la variabilidad espacial reportada por varios autores para estos suelos (Buffa y Ratto, 2005; Sainz Rozas et al., 2015). El comportamiento espacial de los niveles de Zn, se asocia al material parental, a las altas tasas de extracción dadas por la historia agrícola, a condiciones de manejo y frecuencia de cultivos de mayor o menor índice cosecha de Zn en grano en la secuencia (Gutiérrez Boem et al., 2005; Bender et al., 2015; Sainz Rozas et al., 2015).

Tabla 3. Parámetros edáficos en el estrato superficial del suelo (0 a 20 cm) y estadísticos descriptivos de los sitios experimentales para las variables textura (%); pH; carbonato de calcio (CaCO_3); materia orgánica (MO); capacidad de intercambio catiónico (CIC); fósforo extractable (P-Bray¹); zinc extractable con DTPA (Zn-DTPA); boro extractable con CaCl_2 (B- CaCl_2) y boro extractable con acetato de amonio (B- AcNH_4).

Sitio	Arcilla	Limo	Arena	pH	CaCO_3	MO	CIC	P-Bray ¹	Zn-DTPA	B- CaCl_2	B- AcNH_4
	%	%	%		%	g kg^{-1}	cmol kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}
15-BA1	-	-	-	5,9	-	43,4	-	13,4	0,77	-	-
15-BA2	-	-	-	6,0	-	42,7	-	26,3	1,49	-	-
15-OL	-	-	-	6,0	-	25,8	-	28,2	0,69	-	-
15-PE	-	-	-	5,5	-	32,8	-	17,9	0,78	-	-
16-BA1	-	-	-	6,0	-	46,6	-	25,4	1,77	1,27	-
16-BA2	-	-	-	6,2	-	62,0	-	35,6	4,03	1,20	-
16-BA-R	-	-	-	6,3	-	51,03	-	32,2	1,47	1,00	-
16-BA-S	-	-	-	6,0	-	42,7	-	26,3	1,70	1,00	-
16-CH	-	-	-	7,1	-	23,4	-	222,3	2,33	1,80	0,90
16-FA	-	-	-	8,0	-	12,9	-	80,0	1,84	2,10	-
16-OL1	-	-	-	5,9	-	23,2	-	16,1	1,75	0,70	0,60
16-OL2	-	-	-	6,3	-	19,9	-	34,5	1,55	0,80	0,50
16-PE1	-	-	-	5,5	-	37,0	-	19,7	0,79	1,50	-
16-PE2	-	-	-	5,4	-	34,0	-	15,7	0,87	0,60	-
16-RA	-	-	-	5,8	-	25,5	-	52,9	6,30	1,10	0,30
16-SE	-	-	-	8,0	-	23,2	-	84,2	3,80	1,40	2,00
16-TUC	-	-	-	6,9	-	28,4	-	11,2	1,90	0,70	0,60
16-TUP	-	-	-	7,8	-	20,8	-	110,3	7,10	1,70	0,60
18-CG	19,7	63,3	17,1	6,5	0,00	19,6	17,7	8,2	0,36	0,68	0,72
18-CA	25,0	59,3	15,7	6,3	0,03	23,3	18,9	29,6	0,88	0,42	0,63
18-LL	19,2	65,0	15,8	6,5	0,04	20,8	16,4	10,9	0,35	0,51	0,68

18-MA	13,7	61,1	25,2	6,2	0,01	18,9	15,8	35,0	0,59	0,55	0,68
18-ON	24,6	58,9	16,5	6,3	0,00	26,4	20,5	24,7	0,70	0,62	0,71
18-PI	17,9	64,2	17,9	6,4	0,02	19,5	18,0	7,1	0,40	0,47	0,65
19-ML20	21,2	57,4	21,4	6,3	0,04	19,3	19,8	48,6	0,98	0,59	0,97
19-ML21	20,9	58,9	20,2	6,1	0,00	18,0	18,6	40,6	0,59	0,53	0,70
19-RT	11,7	56,7	31,7	6,2	0,02	14,4	16,5	10,9	2,70	0,50	0,43
19-TP	20,5	56,2	23,3	5,9	0,00	18,4	17,5	20,4	0,63	0,50	0,52
Media	19,4	60,1	20,5	6,3	0,02	27,2	18,0	27,7	1,70	0,90	0,69
Mín.	11,7	56,2	15,7	5,4	0,00	8,0	14,8	5,3	0,29	0,35	0,35
Máx.	25,0	65,0	31,7	8,0	0,08	62,3	22,0	110,3	7,9	2,10	2,12
CV	21,7	5,30	25,0	10,5	67,5	43,9	9,9	87,7	97,2	53,9	40,1

El análisis de correlación entre las variables edáficas del ensayo principal muestra que, de todas las fracciones granulométricas del suelo, únicamente el limo se correlacionó de manera negativa con el Zn-DTPA (Tabla 4). Esto puede explicarse porque el limo contiene principalmente cuarzo y feldespatos, los cuales presentan escasos sitios de intercambio, y, por ende, baja capacidad de adsorción de Zn (Nielsen, 1990). Por otro lado, no hubo correlación entre el B-CaCl₂ y el B-AcNH₄ con la textura de los suelos (Tabla 4). Se determinó correlación positiva entre la CIC y el Zn-DTPA (Tabla 4), dado que este extractante cuantifica parte de la fracción intercambiable del Zn (Han et al., 2011). En cambio, no se detectó correlación entre la CIC y el B extractable con ambos métodos.

Tabla 4. Correlación entre variables edáficas, zinc extractable con DTPA (Zn-DTPA), boro extractable con cloruro de calcio (B-CaCl₂), boro extractable con acetato de amonio (B-AcNH₄), pH, carbonato de calcio (CaCO₃), materia orgánica (MO), fósforo extractable (P-Bray⁻¹), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y textura (%) en el horizonte superficial (0-20cm) en los ambientes del ensayo principal.

Variable	Unidad	Zn-DTPA	B-CaCl ₂	B-AcNH ₄	pH	CaCO ₃	MO	P-Bray ⁻¹	CIC	Arcilla	Limo	Arena			
		mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹		%	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol kg ⁻¹	%	%	%			
Zn-DTPA	mg kg ⁻¹	1,00													
B-CaCl ₂	mg kg ⁻¹	-0,08	1,00												
B-AcNH ₄	mg kg ⁻¹	0,21	0,33	**	1,00										
pH		-0,33	**	0,06	0,13	1,00									
CaCO ₃	%	0,18	-0,29	*	0,13	-0,01	1,00								
MO	g 100g ⁻¹	0,28	*	0,10	-0,10	0,25	-0,03	1,00							
P-Bray ⁻¹	mg kg ⁻¹	0,76	***	-0,02	0,31	* -0,44	***	0,14	-0,05	1,00					
CIC	cmol kg ⁻¹	0,53	***	0,22	0,16	0,01	-0,07	0,29	*	0,29	*	1,00			
Arcilla	%	0,47		0,35	0,43	-0,20	-0,02	0,61	*	0,25		0,69	1,00		
Limo	%	-0,68	**	0,21	-0,32	0,83	***	0,19	0,01	-0,66	**	-0,20	-0,43	1,00	
Arena	%	0,15		-0,52	-0,14	-0,54		-0,14	-0,60	*	0,35	-0,50	-0,59	* -0,47	1,00

Sobre la diagonal decreciente se pueden observar los coeficientes de correlación (r) en la capa superficial de suelo (0-20cm), donde *, ** y *** indican p<0,10; p<0,05 y p<0,01, respectivamente.

El pH se correlacionó negativamente con la concentración de Zn-DTPA (Tabla 4). En línea con este resultado, otros autores han reportado que la solubilidad de los diferentes minerales de Zn disminuye a medida que aumenta el pH del suelo y por otra parte hay mayor adsorción sobre arcillas y óxidos (Tisdale et al., 1985; Shuman, 1986; Alloway, 2009). Por otro lado, en el rango de pH del estudio principal (entre 5,9 y 6,8), el pH no se correlacionó con el B disponible para ninguno de los extractantes utilizados. Se ha informado que la absorción de H_3BO_3 por la planta no es afectada por el pH de la solución de suelo, cuando el rango de pH varía entre 3 y 7 (Bingham, 1982).

Para los ambientes y la profundidad de suelo explorada, el contenido de $CaCO_3$ de los suelos del estudio principal no se correlacionó con la disponibilidad de Zn-DTPA (Tabla 4). Sin embargo, el comportamiento fue diferente para el B, ya que se determinó una correlación negativa entre el $CaCO_3$ y el B- $CaCl_2$ (Tabla 4). Esta asociación podría ser mediada por el intercambio con grupos carbonato (Ichikuni y Kikuchi, 1972). El contenido de $CaCO_3$ no se relaciona con el B- $AcNH_4$ porque este extractante a pH 5 disuelve parte del $CaCO_3$ liberando el borato o B adsorbido.

La MO correlacionó en forma positiva pero débilmente con el Zn-DTPA ($r=0,28$) (Tabla 4), en línea a lo reportado previamente en el centro de la provincia de Córdoba por Buffa et al. (2009). Para un amplio rango de suelos de la región pampeana y extra pampeana argentina, también informaron una correlación positiva pero débil entre el Zn-DTPA y la MO (Barbieri et al., 2017). Se ha demostrado que los ácidos orgánicos de bajo peso molecular presentes en la MO, forman complejos solubles con el Zn, y contribuyen a aumentar la concentración soluble de Zn el suelo (Alloway, 2009). La formación de complejos orgánicos de Zn facilita su movilidad en el suelo y su disponibilidad para las plantas. A su vez, la unión del Zn a estos compuestos orgánicos, resulta en una menor adsorción sobre las superficies minerales (Alloway, 2009). Estos resultados indican que, cuando se estudia en conjunto suelos con características diferentes, por ejemplo, textura, no siempre un mayor contenido de MO indica mayor disponibilidad de Zn. En general los suelos de textura más fina tienen mayor contenido de MO (Rice, 2002), pero esto no implica una mayor disponibilidad de Zn dado que parte del mismo puede estar inmovilizado entre la MO y las arcillas (Mortvedt, 1991), o formando compuestos orgánicos de baja degradación (Havlin et al., 2017).

Para el caso del B, no se determinaron correlaciones entre la MO y el B-CaCl₂ y B-AcNH₄ (Tabla 4). En contraposición con la bibliografía internacional donde la MO se relaciona positivamente con el B debido a que forma complejos a través de enlaces cis-diol con los ácidos orgánicos (Goldberg et al., 1997).

El P-Bray⁻¹ se correlacionó significativamente con el Zn-DTPA. Si bien existen contradicciones entre la interacción del Zn con el P, en este trabajo la asociación fue positiva. La asociación positiva puede deberse a la presencia de Zn como impureza en los fertilizantes fosfatados utilizados (Li et al., 2007; Richards et al., 2011) y, además, algunas formas de fertilizantes fosfatados, como superfosfato, pueden tener un efecto acidificante sobre el suelo lo que aumentaría la solubilidad y disponibilidad de Zn (Alloway, 2009). Por otro lado, también fue significativa y positiva la correlación entre el B-AcNH₄ y el P-Bray⁻¹ en la capa superficial de suelo. Este resultado concuerda con lo reportado por otros autores, quienes describen una reducción en la adsorción de B en presencia de fosfatos, lo que indica que estos dos iones compiten por los mismos sitios de intercambio (Bloesch et al., 1987). Sin embargo, algunos autores han informado disminuciones del contenido de B-AcNH₄ del suelo bajo dosis crecientes de P (Mühlbachová et al., 2018).

De acuerdo a los resultados del análisis de correlación (Tabla 4), se detectó correlación positiva entre los extractantes de B evaluados, B-CaCl₂ y B-AcNH₄, pero el grado de asociación fue bajo ($r=0,33$). Esto sugiere que ambos extractantes no estarían extrayendo el B de las mismas fracciones del suelo. Sin embargo, otros autores han determinado una estrecha correlación positiva entre ambos extractantes ($r=0,88$). (Goldberg et al., 2002).

3.2 Respuesta a la fertilización foliar con Zn, B y Zn+B

3.2.1 Rendimiento en grano

El Rg promedio entre los ambientes fue de $3,69 \text{ Mg ha}^{-1}$ y mostró marcada variabilidad, ubicándose en un rango entre $1,37$ a $7,44 \text{ Mg ha}^{-1}$. Al analizar el efecto del agregado foliar de Zn y B sobre el Rg del cultivo de soja, en todos los ambientes ($n=24$), se determinó que la interacción fue significativa entre el ambiente y tratamiento para un $p < 0,10$ (Tabla 5).

Se detectó respuesta al agregado de Zn (TZn) en el 33% de los ambientes. En los ambientes con respuesta, la respuesta promedio (ΔRg) al TZn estuvo en un rango entre $0,19$ y $0,80 \text{ Mg ha}^{-1}$, y el promedio fue de $0,51 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Tabla 5). Por otra parte, se detectó efecto significativo del agregado de B (TB) en el 25 % de los ambientes (Tabla 5). En los ambientes con respuesta, la ΔRg al TB, varió entre $0,19$ y $0,52 \text{ Mg ha}^{-1}$ y el promedio fue de $0,39 \text{ Mg ha}^{-1}$. Por último, se detectó respuesta significativa al agregado Zn+B (TZn+B) en el 33% de los ambientes y la ΔRg , varió entre $0,35$ y $1,21 \text{ Mg ha}^{-1}$, con un promedio de $0,63 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Tabla 5).

Tabla 5. Media de rendimiento en grano (Rg) del cultivo de soja en Mg ha^{-1} y su error estándar (E.E.) del tratamiento testigo (TT), con agregado foliar de boro (TB), con agregado foliar de zinc (TZn) y con agregado foliar de zinc y boro (TZn+B) por ambiente evaluado en el estudio principal (en negrita) y adicional.

Ambientes	Rendimiento en grano (Mg ha^{-1})											Ambiente		
	Tratamientos											Media	E.E.	
	TT		TB		TZn		TZn+B		Media	E.E.				
Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.	Media			E.E.	Media	E.E.	
15-BA1	5,52	0,17	a	5,50	0,17	a	5,38	0,17	a	5,55	0,17	a	5,49	0,08
15-BA2	3,17	0,15	c	3,31	0,15	c	3,17	0,15	c	3,29	0,15	c	3,24	0,07
15-BA3R	4,07	0,20	b	4,06	0,20	b	3,70	0,20	c	4,37	0,20	b	4,05	0,20
15-BA3S	2,88	0,09	d	3,06	0,09	c	3,07	0,09	c	3,24	0,09	c	3,06	0,05
15-CHA	2,21	0,19	d	2,02	0,19	e	2,60	0,19	d	2,66	0,19	d	2,37	0,10
15-FA	3,27	0,15	c	3,29	0,15	c	3,31	0,15	c	3,53	0,15	c	3,35	0,07
15-OL1	4,50	0,12	b	4,56	0,12	b	5,00	0,12	a	4,85	0,12	a	4,73	0,06
15-OL2	3,34	0,21	c	3,28	0,21	c	3,62	0,21	c	3,21	0,21	c	3,36	0,11
15-PE1	4,99	0,48	a	5,19	0,48	a	5,18	0,48	a	5,78	0,48	a	5,28	0,25
15-PE2	4,18	0,20	b	4,47	0,20	b	4,37	0,20	b	4,37	0,20	b	4,35	0,10
15-RA	5,22	0,11	a	5,00	0,11	a	5,04	0,11	a	5,06	0,11	a	5,08	0,06
15-SE	3,03	0,13	c	3,13	0,13	c	3,10	0,13	c	3,16	0,13	c	3,10	0,06
15-TUC	2,90	0,08	d	2,74	0,08	d	2,52	0,08	d	2,40	0,08	d	2,64	0,08
15-TUP	2,26	0,30	d	1,70	0,30	e	2,04	0,30	e	1,56	0,30	e	1,89	0,15
18-CG	3,65	0,35	c	3,58	0,35	c	4,38	0,35	b	4,30	0,35	b	3,98	0,17
18-CA	2,93	0,14	d	2,74	0,14	d	2,94	0,14	d	2,77	0,14	d	2,85	0,07
18-LL	2,60	0,16	d	2,49	0,16	d	2,82	0,16	d	2,50	0,16	d	2,60	0,08
18-MA	2,07	0,20	e	2,36	0,17	d	2,33	0,15	d	2,46	0,17	d	2,31	0,09
18-ON	4,55	0,41	b	5,13	0,41	a	5,35	0,41	a	5,65	0,41	a	5,17	0,21
18-PI	1,77	0,16	e	1,86	0,16	e	1,86	0,16	e	2,03	0,16	e	1,88	0,08
19-ML20	4,00	0,15	b	4,45	0,15	b	4,34	0,15	b	5,21	0,15	a	4,50	0,08

19-ML21	4,89	0,21	a	5,26	0,21	a	5,29	0,21	a	5,31	0,21	a	5,19	0,10
19-RT	3,85	0,22	c	4,37	0,22	b	4,42	0,22	b	4,21	0,22	b	4,21	0,11
19-TP	3,27	0,17	c	3,60	0,17	c	3,71	0,17	c	3,42	0,17	c	3,50	0,09
Tratamiento	3,55	0,05		3,63	0,05		3,73	0,05		3,79	0,05			
<hr/>														
Valor P														
Ambiente	<0,0001													
Tratamiento	0,0028													
Ambiente*tratamiento	0,0747													

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada ambiente ($p \leq 0,10$).

El estudio principal fue realizado en un área geográfica limitada dentro de la provincia de Córdoba (análisis no mostrado) y a pesar de ello, se comprobó que el efecto de la fertilización con Zn y B ó Zn+B en soja depende de las características del ambiente. Al aumentar el área explorada y número de ambientes se refuerza más este efecto (Tabla 5).

En el cultivo soja, son escasos los reportes sobre la respuesta a la fertilización foliar con Zn en la RPA, pero existen reportes para el cultivo de maíz donde se informaron respuestas positivas en el Rg por aplicaciones foliares de Zn (Barbieri et al., 2017; Martínez Cuesta et al., 2020). Los primeros autores informaron una frecuencia de sitios con respuesta del 33% en maíz, similar a nuestros resultados. Por otra parte, en suelos Haplustoles y Hapludoles de la RPA, Boga y Ramírez (2014) reportaron que la aplicación de Zn al suelo a la siembra en el cultivo de soja incrementó el Rg en $0,36 \text{ Mg ha}^{-1}$. En ensayos conducidos en Australia, Rose et al., (1981) demostraron que la aplicación foliar de Zn antes de la floración en soja incrementó el Rg entre un 13 a un 208% en el 75% de las localidades estudiadas. En cambio, en una red de 42 ensayos a campo en Iowa, la fertilización foliar con Zn no tuvo efecto sobre el Rg (Anderson et al., 2015).

Para el caso de B, respuestas similares a las determinadas en este estudio se han registrado en otras zonas de la RPA al utilizar aplicaciones foliares. En dos ensayos ubicados en Santa Fe y uno en la Pampa Ondulada alta, se reportaron aumentos de Rg entre $0,24 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $0,59 \text{ Mg ha}^{-1}$ para aplicaciones en R_3 , respectivamente (Fontanetto et al., 2010; Gambaudo et al., 2011; Bengolea y Ratto 2015). A nivel internacional, en estudios anteriores no se observaron efectos positivos en el Rg con aplicaciones foliares divididas de B a dosis de $0,56$ o $1,12 \text{ kg ha}^{-1}$ ó $3,3 \text{ kg ha}^{-1}$ aplicadas en R_2 y R_3 en suelo franco limoso de Missouri (Martens et al., 1974; Reinbott y Blevins, 1995). En contraste, otros autores reportaron incrementos de $0,35 \text{ Mg ha}^{-1}$ y de $0,36 \text{ Mg ha}^{-1}$ por aplicaciones foliares entre R_3 y R_5 en suelos franco limosos (Reinbott y Blevins, 1995; Gascho y McPherson, 1997). En general, el incremento de Rg estuvo dado por un mayor número de vainas y número de granos por unidad de superficie, respecto del testigo (Schon y Blevins, 1987).

En la bibliografía internacional, las respuestas en Rg en soja a la fertilización con B estuvieron ligadas a la fertilidad del suelo y la condición climática (Da Silva Domingos et al., 2021). En zonas de producción de soja de Arkansas (EEUU) se determinaron

mayores respuestas al agregado de B foliar en soja en suelos alcalinos y de textura limosa (Espinoza et al. 2002; Ross et al., 2006). Por lo contrario, Bruns (2017) reportó respuestas inconsistentes en 3 ensayos en suelos de Misisipi, lo que se relacionó con una mayor disponibilidad de B en suelos más pesados de textura limo arcillosa (Tisdale et al., 1975). En línea a esto, Zhang (2001), y más recientemente Enderson et al. (2015) y Sutradhar et al. (2017), en suelos del oeste medio de EEUU (Iowa y Minnesota), no hallaron respuesta a la fertilización con B a lo largo de 77 experimentos a campo. Por lo que, dado la variabilidad ambiental y de prácticas de manejo del cultivo utilizadas en la RPA, es necesario continuar investigando sobre la validación de la disponibilidad de B para el cultivo, al fin ajustar las recomendaciones de fertilización.

Los resultados de este trabajo realizan un aporte al conocimiento, dado que existían escasos reportes de fertilización foliar con Zn y B en soja, sino que demuestra el déficit nutricional que presenta el cultivo a nivel regional. Existían escasos reportes en la RPA sobre la respuesta al agregado de foliar de Zn y B en el cultivo de soja, por lo que los resultados obtenidos en este estudio constituyen una información inédita y relevante en cuanto a la caracterización de la respuesta en el cultivo.

3.2.2 Relación entre la respuesta en rendimiento del cultivo de soja a la fertilización foliar con Zn y B y los rendimientos máximos

Cuando se analiza la media de la respuesta en rendimiento de grano (ΔR_g) debido al agregado de Zn y B, se detectó que, para Zn la ΔR_g no se relacionó con el rendimiento máximo del ambiente (Figura 5). Tomando como referencia el nivel crítico de $1,25 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn-DTPA para soja, obtenido en este trabajo (Figura 8), se observa que en general las respuestas positivas se asociaron a niveles de Zn-DTPA $< 1 \text{ mg kg}^{-1}$. Por lo tanto, la respuesta se asocia con la concentración de nutrientes en el área circundante las raíces y no con la demanda de Zn del cultivo, ya que incrementos o disminuciones de la misma como consecuencia de cambios en el rendimiento estarán asociados a cambios en la capacidad de adquisición del nutriente, por mayor o menor capacidad de exploración radical. Esto ocurre en nutrientes de baja movilidad como el Zn, dado que la llegada del Zn a las raíces es principalmente por difusión o interceptación radical y el volumen de suelo explorado es bajo (1 a 2%) (Bray, 1954). Para el cultivo de maíz, Barbieri et al. (2017) y Martínez Cuesta (2020), tampoco informaron asociación entre la respuesta a Zn y el rendimiento máximo y lo atribuyeron a la baja movilidad del Zn en el suelo.

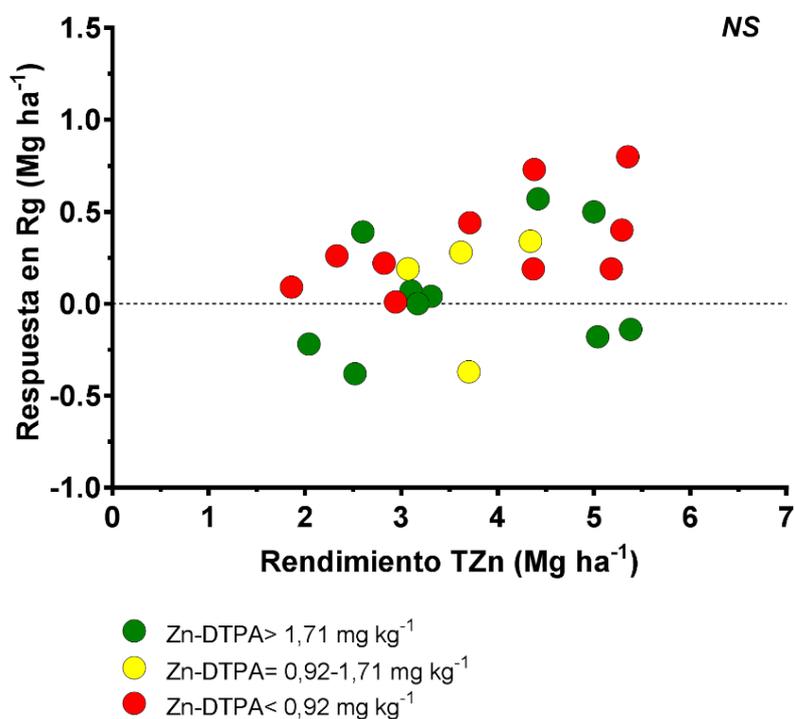


Figura 5. Relación entre el promedio de respuesta en rendimiento grano de soja en Mg ha⁻¹ (ΔRg) por el agregado de Zn en relación el rendimiento del tratamiento fertilizado con zinc (TZn) en Mg ha⁻¹ en los ambientes del estudio principal y adicional, según la disponibilidad de Zn-DTPA.

En cambio, la respuesta en rendimiento debido a la fertilización con B (ΔRg_B) estuvo asociada al Rg máximo del ambiente para los dos extractantes (Figura 6 y Figura 7). Cuando se añade el rendimiento máximo del sitio tomado como el Rg del TB (Rg_{TB}) a un modelo de regresión entre la ΔRg_B y el B- $CaCl_2$, ambas variables regresoras resultaron significativas (p-valor=0,014 y p-valor=0,033, respectivamente) y fueron seleccionadas (Stepwise) quedando definida la siguiente ecuación.

Ecuación 17:

$$\Delta Rg_B = -0,11 + 0,11 Rg_{TB} - 0,22 B.CaCl_2. (r^2=0,34)$$

Donde, ΔRg_B es la respuesta en rendimiento de grano por el agregado de B, Rg_{TB} es el rendimiento del tratamiento TB del sitio y B- $CaCl_2$ es la concentración de boro extractable con cloruro de calcio del sitio

De acuerdo a esto, la ΔRg_B aumenta a medida que los rendimientos alcanzables se incrementan y, por el contrario, se reduce a medida que los contenidos de B- $CaCl_2$ aumentan.

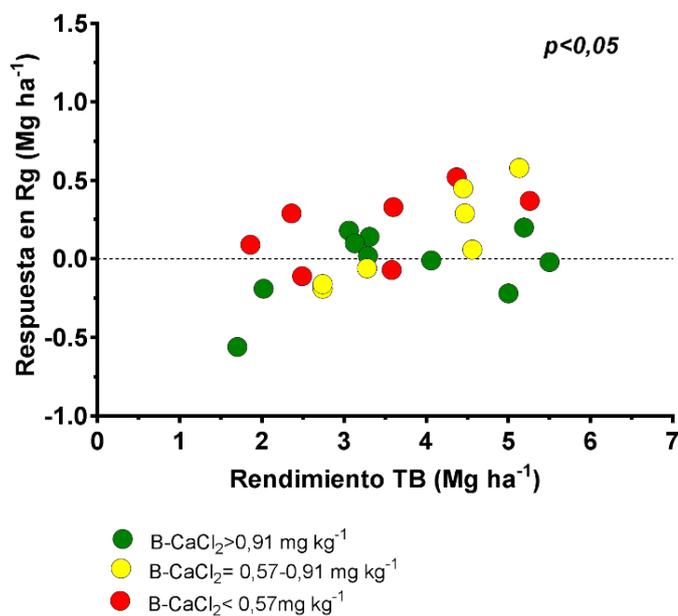


Figura 6. Relación entre el promedio de respuesta en rendimiento grano de soja en Mg ha^{-1} (ΔRg) por el agregado de B en relación el rendimiento del tratamiento fertilizado con boro (TB) en Mg ha^{-1} en los ambientes del estudio principal y adicional, según la disponibilidad de B-CaCl_2 .

Para B-AcNH_4 el ajuste del modelo fue significativo (p -valor= 0,0125) y la única variable predictora retenida por el método Stepwise, fue el Rg_{TB} , como se muestra en la Ecuación 18. Una probable explicación es que, para este extractante se contó con un menor número de datos, particularmente de los ambientes con respuesta.

Ecuación 18:

$$\Delta Rg_B = -0,46 + 0,16 Rg_{TB} (r^2=0,31)$$

Donde, ΔRg_B es la respuesta en rendimiento de grano por el agregado de B y Rg_{TB} es el rendimiento del tratamiento TB del sitio

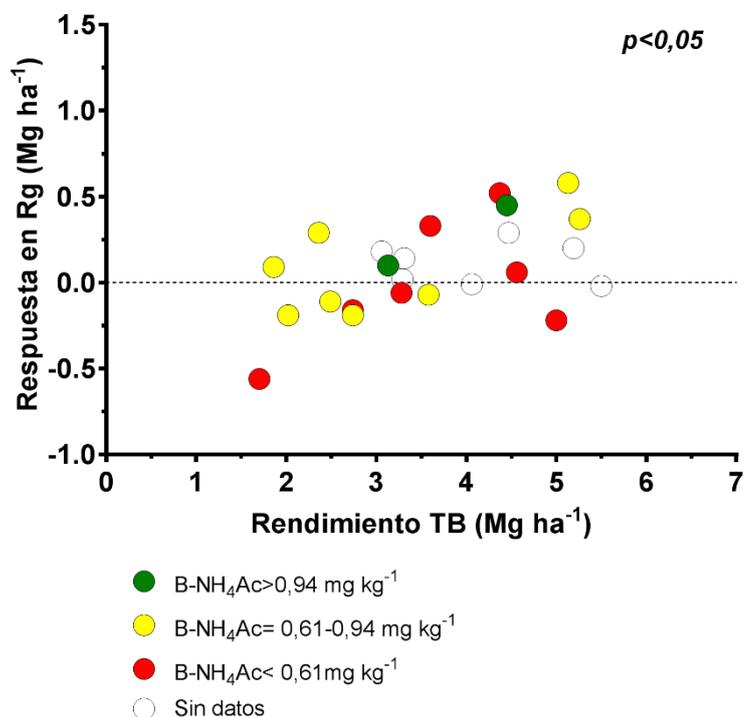


Figura 7. Relación entre el promedio de respuesta en rendimiento grano de soja en Mg ha⁻¹ (ΔRg) por el agregado de B en relación el rendimiento del tratamiento fertilizado con boro (TB) en Mg ha⁻¹ en los ambientes del estudio principal y adicional, según la disponibilidad de B-AcNH₄.

La existencia de una relación entre el B extractable (B-AcNH₄, B-CaCl₂) y el Rg_{TB} se debe a la movilidad del B. Los nutrientes móviles tienden a seguir la ley del mínimo y la cantidad necesaria para alcanzar el máximo rendimiento va a depender del rendimiento alcanzable en ese sitio o año (Bray, 1954). En este caso, las raíces del cultivo pueden absorber la mayor parte del H₃BO₃ presente en todo el volumen del suelo, ya que las moléculas de H₃BO₃ llegan a las raíces por flujo masal (Bray, 1954).

3.2.3 Concentración de Zn y B en tejido foliar en el estudio principal

Previo a la aplicación de los tratamientos, la concentración de Zn total en hoja (CZnh) en el estadio V_6 del cultivo de soja varió entre 28,95 y 69,19 mg kg^{-1} , y el promedio fue de 41,78 mg kg^{-1} . Por otro lado, la CZnh media en R_2 en el tratamiento testigo (TT) fue de 37,4 mg kg^{-1} (rango entre 26,35 y 52,80 mg kg^{-1}). Estos valores se encuentran en el rango de valores informados previamente por otros autores (Enderson et al., 2015; Caires et al., 2020). Por otro lado, los valores de CZnh no se correlacionaron entre ambos momentos de muestreo ($p\text{-valor}=0,2997$). Enderson et al. (2015) determinaron asociación entre la CZnh en V_6 y R_2 , sin embargo, la correlación fue débil.

Cuando se analizó el efecto de la fertilización sobre la CZnh en el estadio R_2 no se detectó efecto de la interacción, sino que fue significativo el efecto individual del ambiente y la fertilización (Tabla 6). Se observó que la aplicación de Zn (TZn) no incrementó la CZnh (Tabla 6). Por el contrario, existen reportes que muestran incrementos en la CZnh debido a la aplicación foliar del mismo (Grove y Schwab, 2010; Enderson et al., 2015; Sutradhar et al., 2017). La aplicación de B tampoco aumentó significativamente la CZnh, lo cual se encuentra en línea con el reporte de Sutradhar et al. (2017). Estos autores, si bien determinaron incrementos en la CZnh por efecto de la interacción entre el agregado de B y Cl, pero no un efecto individual del B sobre la misma, por lo que no puede concluirse sobre una absorción mayor de Zn debido a la fertilización con B. No obstante, el tratamiento TZn+B mejoró la utilización del zinc aplicado (Tabla 6). Sin embargo, el aumento en la CZnh fue leve, en promedio un 7 %.

Tabla 6. Concentración de Zn en hoja (CZnh) en el estadio R₂ del cultivo de soja en mg kg⁻¹ por ambiente y por tratamiento del estudio principal. Los tratamientos son: testigo (TT), con agregado foliar de zinc (TZn), con agregado foliar de boro (TB) y con agregado foliar de zinc y boro (TZn+B).

Ambiente	Concentración de zinc en hoja (mg kg ⁻¹)				Media ambiente	E.E.	
	TT	TB	TZn	TZn+B			
18-CG	37,2	37,3	41,7	39,3	38,9	2,05	bcd
18-CA	50,1	46,1	49,3	49,6	48,8	2,02	a
18-LL	40,7	44,9	39,6	42,7	41,9	1,94	b
18-MA	29,5	28,9	28,5	36,3	30,8	2,33	e
18-ON	35,1	35,4	43,4	40,1	38,5	2,28	bcd
18-PI	32,4	28,4	37,5	37,0	33,8	1,78	de
19-ML20	30,6	31,6	35,1	36,0	33,3	2,05	de
19-ML21	46,2	45,9	41,3	46,4	44,9	2,27	ab
19-RT	39,0	43,9	42,0	37,7	40,7	1,91	bc
19-TP	32,8	35,5	33,9	38,6	35,2	1,90	dce
Media Tratamiento	37,4 b	39,2 ab	37,8 b	40,4 a			
E.E.	1,03	1,00	1,04	1,03			
Valor P							
Ambiente	<0,0001						
Tratamiento	0,0371						
Ambiente*Tratamiento	0,1885						

Letras

distintas

indican

diferencias

significativas

(p<=0,05)

En cuanto a la concentración de B en hoja (CBh) en V_7 , previo a la fertilización, se determinó un rango entre 18,81 y 61,90 mg kg^{-1} , con un promedio de 43,50 mg kg^{-1} . Mientras que, la CBh en R_2 en el tratamiento testigo (TT) fue 54,52 mg kg^{-1} (rango entre 37,91 y 68,73 mg kg^{-1}). Estos valores de CBh se aproximaron a aquellos informados por otros autores (Enderson et al., 2015; Caires et al., 2020). La CBh en R_2 fue superior que en V_7 , y se corresponde con el aumento en la absorción de B por parte del tejido foliar entre dichos estados fenológicos (Bender et al., 2015). Por otro lado, no se determinó correlación entre la CBh medida en ambos estadios (p -valor=0,8087).

El análisis de la respuesta de la fertilización sobre la CBh indicó un efecto significativo de la interacción ambiente*fertilización (Tabla 7). Sin embargo, el efecto de la aplicación de B sobre la CBh no fue consistente, dado que en 3 sitios se incrementó mientras que, en dos 2 sitios, se produjo una disminución de la misma. Además, esta respuesta no se asoció con los valores de B en el suelo (Tabla 3). Antecedentes previos, informaron respuestas escasas e inconsistentes de la fertilización foliar sobre las concentraciones de micronutrientes foliares (Oplinger et al., 1993; Ross et al., 2006; Sutradhar et al., 2017). Estos autores explican estos resultados debido a las pequeñas cantidades aplicadas y al efecto de dilución de los nutrientes absorbidos en el nuevo crecimiento de las hojas. Por otra parte, el TZn tampoco tuvo efecto en la CBh, excepto en un ambiente, donde su valor fue menor con respecto al TT. Por último, en el TZn+B aumentó la CBh, pero solamente en dos sitios (Tabla 7).

Tabla 7. Concentración de boro en hoja (CBh) medida en el estadio R₂ del cultivo de soja en mg kg⁻¹ por tratamiento según el ambiente del estudio principal. Los tratamientos son: testigo (TT), con agregado foliar de zinc (TZn), con agregado foliar de boro (TB) y con agregado foliar de zinc y boro (TZn+B).

Concentración de boro en hoja (mg kg⁻¹)

Ambiente	Tratamiento												Ambiente	
	TT			TB			TZn			TZn+B			Media	E.E.
	Media	E.E.		Media	E.E.		Media	E.E.		Media	E.E.		Media	E.E.
18-CG	57,2	0,03	cde	61,8	0,03	bc	55,1	0,03	efg	61,9	0,03	bc	59,0	0,02
18-CA	62,2	0,01	abc	56,9	0,01	cdef	53,1	0,01	efg	55,5	0,01	efg	56,9	0,01
18-LL	55,8	1,86	defg	60,6	1,86	bcd	54,6	1,86	efg	63,9	1,86	abc	58,7	0,93
18-MA	41,8	0,03	i	47,6	0,03	h	42,0	0,03	i	52,4	0,03	efg	45,9	0,01
18-ON	38,4	0,52	i	39,4	0,52	i	40,5	0,52	i	40,3	0,52	i	39,6	0,26
18-PI	64,2	0,01	ab	59,5	0,01	cd	61,5	0,01	bc	62,7	0,01	abc	61,9	0,01
19-ML20	57,9	0,01	cde	52,7	0,01	efg	56,2	0,01	defg	65,2	0,01	ab	58,0	0,01
19-ML21	55,5	0,01	efg	53,1	0,01	efg	56,9	0,01	cdef	62,2	0,01	abc	56,9	0,01
19-RT	50,6	0,01	gh	57,9	0,01	cde	51,1	0,01	gh	45,7	4,02	hi	51,3	1,01
19-TP	57,1	2,98	cdef	67,9	2,98	a	56,8	3,37	cdefg	67,1	2,98	ab	62,3	1,54
Tratamiento	54,1	0,36		55,7	0,36		52,8	0,39		57,7	0,54			
Valor P														
Ambiente	<0,0001													
Tratamiento	0,2056													
Ambiente*Tratamiento	0,0115													

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada ambiente ($p \leq 0,05$).

3.2.4 Concentración total de Zn y B en grano de soja en el estudio principal

La concentración de Zn en grano (CZng) promedio de los experimentos fue de 33,48 mg kg⁻¹, y varió entre 23,65 y 43,53 mg kg⁻¹. Estos CZng coinciden con los valores reportados anteriormente (Enderson et al., 2015; Sutradhar et al., 2018; Caires et al., 2020). En la Tabla 8, se presentan las medias de CZng por ambiente y según el nutriente agregado. Se detectó efecto de la interacción ambiente*fertilización sobre la CZng (p-valor=0,0297), sin embargo, los efectos de la fertilización sobre la misma fueron inconsistentes (Tabla 8). De acuerdo a esto, en general se observó que la aplicación de Zn foliar no produjo incrementos en la CZng en la mayoría de los ambientes evaluados. Dado que la fertilización con Zn provocó un aumento en la producción de granos en la mayoría de los ambientes del estudio principal, la concentración de Zn pudo haber tenido un efecto de dilución en el grano (Bender et al., 2015). Estos resultados sugieren que las dosis de Zn utilizadas no serían suficiente para incrementar la concentración de dicho nutriente en grano.

Tabla 8. Concentración de zinc en grano (CZng) de soja en mg kg⁻¹ por tratamiento según el ambiente del estudio principal. Los tratamientos son: testigo (TT), con agregado foliar de zinc (TZn), con agregado foliar de boro (TB) y con agregado foliar de zinc y boro (TZn+B).

Ambiente	Concentración de zinc en grano (mg kg ⁻¹)												Ambiente	
	Tratamiento												Media	E.E.
	TT			TB			TZn			TZn+B				
	Media	E.E.		Media	E.E.		Media	E.E.		Media	E.E.		Media	E.E.
18-CG	26,3	0,71	ef	25,0	0,71	F	26,1	0,71	ef	26,8	0,71	ef	26,0	0,50
18-CA	40,2	0,92	ab	38,6	0,92	b	42,1	0,92	a	37,8	0,92	b	39,7	0,50
18-LL	32,5	1,14	cde	35,2	1,14	bc	35,1	1,14	bc	35,9	1,14	b	34,7	0,50
18-MA	36,7	1,61	b	38,7	1,61	ab	33,2	1,61	bcd	37,1	1,61	b	36,4	0,50
18-ON	29,2	0,47	de	27,7	0,47	de	29,4	0,41	de	30,3	0,47	de	29,1	0,56
18-PI	34,2	0,74	bc	33,3	0,74	bcd	34,1	0,74	bc	33,9	0,74	bc	33,9	0,50
19-ML20	29,1	1,08	de	31,1	1,08	de	30,8	1,08	de	30,1	1,08	de	30,3	0,50
19-ML21	33,3	1,20	bcd	33,7	1,20	bcd	34,9	1,39	ab	32,5	1,39	bcde	33,6	0,54
19-RT	36,5	0,88	b	36,3	0,88	b	38,0	0,88	b	38,7	0,88	ab	37,4	0,50
19-TP	33,2	1,66	bcd	28,9	1,66	de	32,8	1,91	bcd	33,1	1,66	bcd	32,8	0,54
Tratamiento	33,1	0,32		33,2	0,32		33,6	0,32		33,6	0,32			
Valor P														
Ambiente	<0,0001													
Tratamiento	0,5473													
Ambiente*Tratamiento	0,0297													

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada ambiente (p<=0,05)

Por otra parte, la concentración promedio de B en grano (CBg) fue de 27,89 mg kg⁻¹, y varió entre 11,98 y 45,84 mg kg⁻¹, valores que se encontraron dentro de los rangos publicados (Enderson et al., 2015; Caires et al., 2020). Se detectó efecto de la interacción ambiente*fertilización sobre la CBg, pero los resultados fueron inconsistentes (Tabla 9). La fertilización con B no incrementó la CBg en ninguno de los ambientes. Solamente en el ambiente 17-PI, el tratamiento TZn+B incrementó la CBg respecto del testigo. La escasa respuesta del tratamiento TZn+B y la no respuesta del TB sobre CBg, confirma la escasa movilidad y translocación del B al grano en soja (Bender et al., 2015; Gaspar et al., 2018).

Tabla 9. Concentración de boro en grano (CBg) de soja en mg kg^{-1} por tratamiento según el ambiente del estudio principal. Los tratamientos son: testigo (TT), con agregado foliar de zinc (TZn), con agregado foliar de boro (TB) y con agregado foliar de zinc y boro (TZn+B).

Ambiente	Concentración de boro en grano (mg kg^{-1})											Ambiente		
	Tratamiento												Media	E.E.
	TT			TB			TZn			TZn+B				
	Media	E.E.		Media	E.E.		Media	E.E.		Media	E.E.		Media	E.E.
18-CG	26,5	2,19	b	26,5	2,19	b	23,9	2,19	c	27,2	2,19	b	26,0	1,48
18-CA	28,9	2,06	b	25,7	2,06	b	29,6	2,06	b	32,1	2,06	b	29,0	1,43
18-LL	23,8	2,10	c	19,1	2,10	c	22,2	2,10	c	20,4	2,10	c	21,4	1,45
18-MA	33,5	2,52	b	22,2	1,90	c	27,1	1,79	b	25,8	1,9	b	27,1	1,43
18-ON	37,7	1,39	a	40,0	1,39	a	38,3	1,39	a	38,9	1,39	a	38,8	1,22
18-PI	32,8	2,85	b	31,8	2,85	b	29,7	2,85	b	26,4	2,85	b	30,2	1,74
19-ML20	27,1	1,76	b	23,4	1,95	c	24,2	1,76	c	22,3	1,95	c	24,3	1,36
19-ML21	18,9	2,34	c	22,5	2,34	c	22,8	2,66	c	27,6	2,34	b	22,9	1,57
19-RT	28,8	1,85	b	25,1	1,85	b	26,8	1,85	b	29,3	1,85	b	27,5	1,36
19-TP	32,6	1,53	b	34,4	1,53	b	31,3	1,53	b	31,2	1,53	b	32,4	1,26
Tratamiento	29,1	0,66		27,1	0,65		27,6	0,65		28,1	0,65			
Valor P														
Ambiente	<0,0001													
Tratamiento	0,5811													
Ambiente*Tratamiento	0,0011													

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada ambiente ($p \leq 0,05$)

3.3 Relación entre la respuesta a la fertilización foliar y la disponibilidad de Zn y B en el suelo

3.3.1 Relación entre la respuesta en rendimiento relativo de soja y la disponibilidad de Zn-DTPA en el suelo del estudio principal y estudio adicional

El análisis de Zn-DTPA en el suelo fue útil para diagnosticar la disponibilidad de Zn para el cultivo y se asoció con la respuesta en soja. Se determinó un ajuste significativo (p -valor=0,0008) entre el rendimiento relativo (RR), y la concentración de Zn-DTPA (Figura 5). A continuación, se muestran los resultados del análisis de calibración:

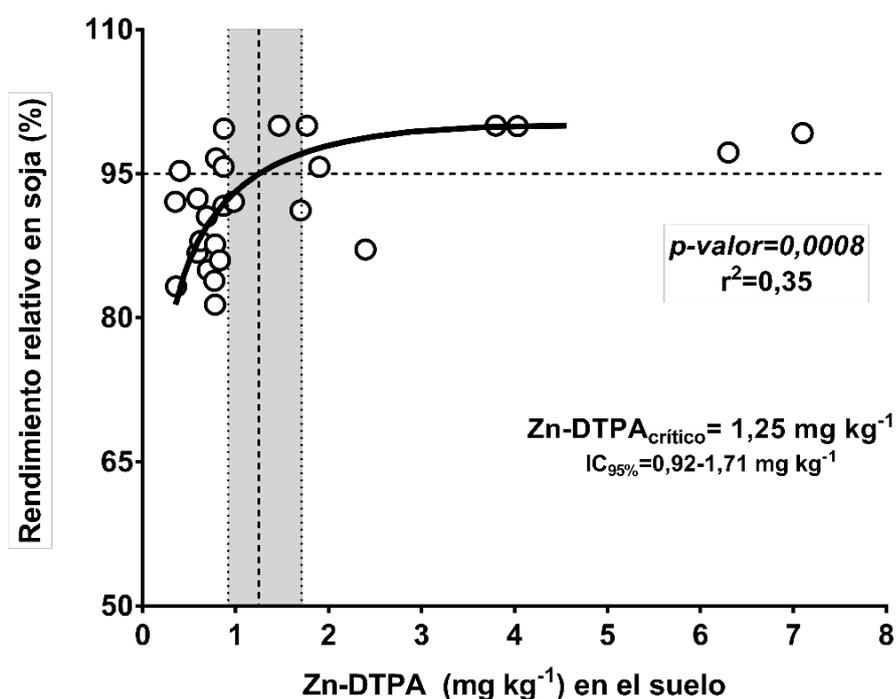


Figura 8. Relación entre el rendimiento relativo de soja (RR%) sin aplicación de Zn y la concentración de Zn-DTPA en mg kg⁻¹ (0-20 cm) ajustado con el modelo arcoseno-logaritmo ($n=26$). Se excluyeron dos ambientes con valores anormales de Zn-DTPA y bajo %RR. El NC fue ajustado al 95% del RR.

El ajuste del modelo permitió definir tres rangos de probabilidad de respuesta de acuerdo a la disponibilidad de Zn-DTPA: uno de probabilidad de respuesta elevada en suelos con concentraciones de Zn-DTPA < 0,92 mg kg⁻¹; probabilidad de respuesta media en suelos con concentraciones de Zn-DTPA entre 0,92 y 1,71 mg kg⁻¹ y

probabilidad de respuesta baja, en suelos con concentraciones de Zn-DTPA > 1,71 mg kg⁻¹. Se determinó un NC medio de Zn-DTPA de 1,25 mg kg⁻¹, valor por debajo del cual estuvieron el 65% de los ambientes estudiados.

Para el cultivo de soja, no se contaba a nivel nacional o internacional, con NC de Zn-DTPA a partir de ensayos calibrados a campo. Algunos autores informaron NC de Zn-DTPA menores a 1 < 1 mg kg⁻¹, pero en condiciones controladas en ensayos en macetas (Mustafa et al., 1994; Han et al., 2011). En otros cultivos, como maíz y trigo, los NC reportados fueron inferiores respecto nuestro NC, pero también fueron determinados en ensayos en macetas, con valores de Zn-DTPA en el suelo entre 0,45 y 0,80 mg kg⁻¹ (Brown et al., 1971; Lindsay y Norvell, 1978; Zheng et al., 1982). Para los suelos de la RPA y extra pampena, en el cultivo de maíz, Barbieri et al. (2017) y Martínez Cuesta et al. (2020) informaron NC similares al valor determinado en el presente estudio en 64 ensayos a campo (NC=1,13 mg kg⁻¹). Estos autores determinaron que el Zn-DTPA fue un correcto indicador de la disponibilidad de Zn en el suelo para el cultivo de maíz, pero no fue tan robusto para predecir la magnitud de la respuesta a la fertilización.

Hasta el momento no se conocía el NC de Zn para el cultivo de soja, por lo que estos resultados son un aporte importante ya que contribuyen al manejo racional de Zn en soja. El conocimiento de su concentración crítica y la probabilidad de respuesta, ayudaría a evitar deficiencias de manera preventiva y a evitar su aplicación en situaciones donde la disponibilidad sea elevada.

3.3.2 Relación entre la respuesta en rendimiento relativo de soja y la disponibilidad de B-CaCl₂ en el suelo

Se determinó que el RR se asoció con la concentración de B-CaCl₂ y se ajustó el modelo utilizando la función CASL (Figura 6).

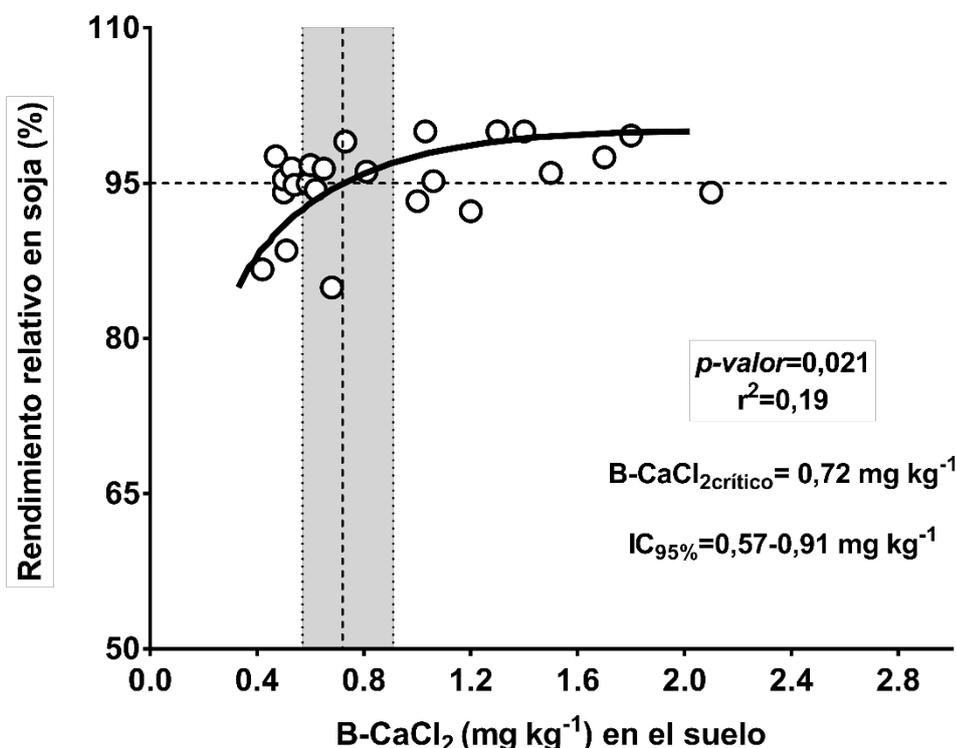


Figura 9. Relación entre el rendimiento relativo de soja (RR%) sin aplicación de B y la concentración de B-CaCl₂ en mg kg⁻¹ (0-20 cm) ajustado con el modelo arco-seno-logaritmo (n=24). El NC fue ajustado al 95% del RR.

El NC de B-CaCl₂ fue de 0,72 mg kg⁻¹ y de acuerdo a su disponibilidad, se definieron tres rangos de probabilidad de respuesta en rendimiento por a la fertilización con B: uno de probabilidad de respuesta elevada en suelos con concentraciones de B-CaCl₂<0,57 mg kg⁻¹; probabilidad de respuesta media en suelos con concentraciones de B-CaCl₂ entre 0,57 y 0,91 mg kg⁻¹ y probabilidad de respuesta baja en suelos con concentraciones de B-CaCl₂>0,91 mg kg⁻¹ (Figura 6). El 50 % de los ambientes estudiados mostraron contenidos de B-CaCl₂ en suelo por debajo del NC ajustado.

A nivel internacional, no se han reportado NC de B-CaCl₂ calibrados en ensayos a campo. En 25 suelos ácidos del este de India, Datta et al. (1998) informaron un NC de 0,65 mg kg⁻¹ B-CaCl₂ para soja, levemente inferior al ajustado en este trabajo, pero fue determinado en un experimento en condiciones controladas. En trigo, Dey et al. (2014) informaron que el B extraído con CaCl₂ era el extractante más adecuado para la determinación del B disponible ya que es capaz de extraer las tres fracciones más fácilmente disponibles de B para la planta: B soluble, B ligado orgánicamente y el B específicamente adsorbido. Por lo que hace aún más relevantes los resultados de este trabajo, ya que contribuirían al manejo racional de la fertilización con B a nivel de lote.

3.3.3 Relación entre la respuesta en rendimiento relativo de soja y la disponibilidad de B-AcNH₄ en el suelo del estudio principal y estudio adicional

Para las condiciones ambientales del estudio principal (n=10), al utilizar el análisis de B-AcNH₄ en 0-20 cm como variable explicativa del RR en soja, se logró un ajuste significativo (p-valor=0,0061) (Figura 7). Se determinó un IC95% de B-AcNH₄ entre 0,61y 0,94 mg kg⁻¹, siendo el NC de 0,76 mg kg⁻¹. En este modelo, el 82% de los casos fue correctamente diagnosticados y se comprobó que el 76% de los ambientes estudiados están por debajo del NC encontrado.

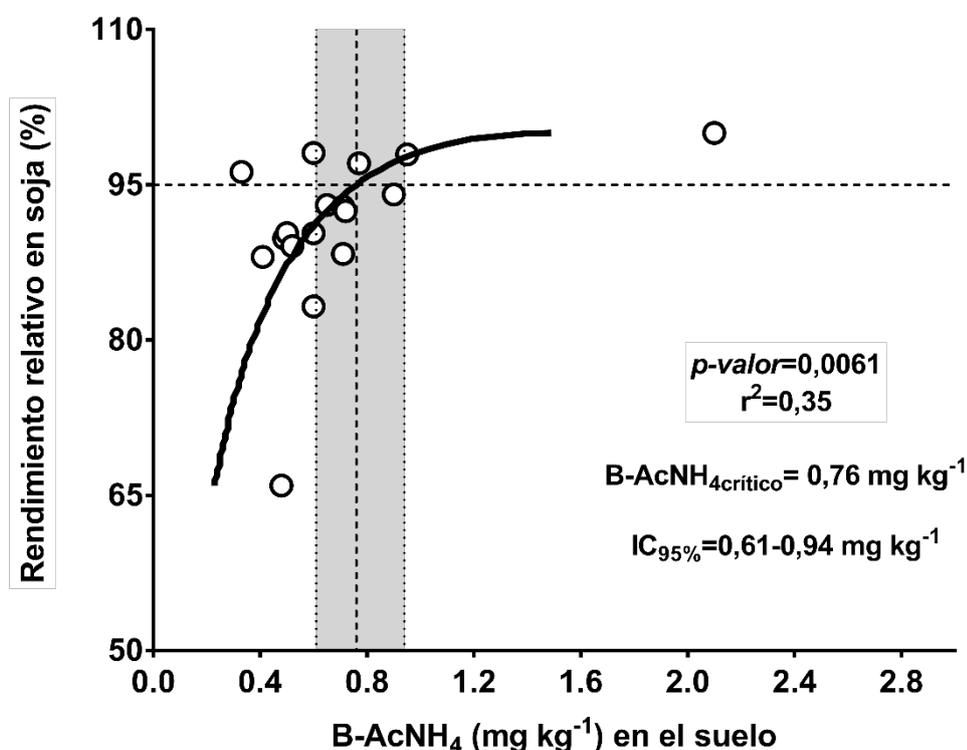


Figura 10. Relación entre el rendimiento relativo de soja (RR%) sin aplicación de B y la concentración de B- AcNH₄ en mg kg⁻¹ (0-20 cm) ajustado con el modelo arcoseno-logaritmo (n=17). El NC fue ajustado al 95% del RR.

De acuerdo a su disponibilidad, se definieron tres rangos de probabilidad de respuesta en rendimiento por a la fertilización foliar con B, uno de probabilidad de respuesta elevada en suelos con concentraciones de B-AcNH₄<0,61 mg kg⁻¹; probabilidad de respuesta media en suelos con concentraciones de B-AcNH₄ entre 0,76 y 0,94 mg kg⁻¹ y probabilidad de respuesta baja en suelos con concentraciones de B- AcNH₄>0,94 mg kg⁻¹ (Figura 7).

De todas formas, si bien el valor del NC ajustado por ambos métodos de extracción de B fue similar, 0,72 y 0,76 mg kg⁻¹ con B-CaCl₂ y B-AcNH₄ respectivamente, el modelo que explicó mejor la variabilidad fue el de B-AcNH₄ en comparación con el ajuste realizado con B-CaCl₂ (menor p-valor) (Figura 6 y Figura 7). Además, el % de casos correctamente diagnosticados fue superior para B-AcNH₄ respecto al % B-CaCl₂ (82% vs 63%, respectivamente). Esto indicaría que la efectividad del diagnóstico fue superior con B-AcNH₄ con respecto a B-CaCl₂, ya que presentaría mayor confiabilidad siendo un mejor indicador de la disponibilidad de B. Por otra parte, se determinó correlación débil entre ambos extractantes (Tabla 5), lo que podría sugerir que los mismos extraen el B de diferentes fracciones del suelo.

Hasta el momento no existían registros para el cultivo de soja que compararan dos extractantes en calibraciones realizadas a campo. Por otra parte, Matula y Pechová (2006) informaron mejor correlación entre el B absorbido por el cultivo de cebada y el B-AcNH₄ ($r = 0,67$) que con el B extractable con Mehlich-3 ($r = 0,07$). Por lo tanto, si bien este último tiene la capacidad de ser un extractante multinutriente, y por este motivo es adoptado por muchos laboratorios, no sería un extractante adecuado para evaluar la disponibilidad de B. En la bibliografía internacional, se reporta un NC de B-AcNH₄ de 0,35 mg kg⁻¹ para alfalfa y trébol rojo (Gupta et al., 2008), pero no hay registros de valores publicados para soja tanto a nivel nacional como internacional. Por otra parte, el rango crítico determinado para el B con ambos extractantes fue más acotado que el determinado para Zn-DTPA, información que es clave para el manejo de la fertilización con B, dado que el rango entre suficiencia y toxicidad es particularmente estrecho (Paull et al., 1991).

3.3.4 Relación entre la respuesta en rendimiento del cultivo de soja debido a la fertilización foliar con Zn y B y las variables edáficas

La inclusión de las variables edáficas arcilla, pH, CaCO₃, MO, CIC y P-Bray⁻¹ en un análisis de regresión lineal múltiple entre la respuesta en rendimiento por el agregado de Zn (ΔRg_{Zn}) y el Zn-DTPA en suelo, no resultó en un mejor ajuste del modelo de predicción en los ambientes del estudio principal. Ninguna de estas variables fue retenida por el modelo de selección Stepwise, esto concuerda con el análisis de correlación (Tabla 4). Dónde, la mayoría de las variables edáficas se correlacionaron entre sí y con el Zn-DTPA, lo que indica la falta de independencia entre ellas. Nuestros resultados concuerdan con Enderson et al (2015), quienes informaron que la CIC, MO

y arcilla no mejoraron la relación entre el Zn-DTPA y la respuesta en rendimiento en 42 sitios en sitios experimentales de EEUU. En línea con ello Barbieri et al. (2017), tampoco determinaron una clara contribución de las variables edáficas para predecir la respuesta a la fertilización foliar con Zn en maíz.

Con respecto al B, la predicción de la respuesta en rendimiento en función del B- CaCl_2 y B- AcNH_4 tampoco mejoró cuando a estas variables independientes se les adicionó arcilla, pH, CaCO_3 , MO, CIC y P-Bray¹.

3.4 Relación entre la respuesta y la concentración total de Zn y B en tejido foliar en el estudio principal

3.4.1 Relación entre la respuesta a Zn y su concentración foliar en V_7 y R_2 en soja

El RR no se relacionó con la CZnh en ninguno de los momentos de muestreo, V_7 ó R_2 ($p > 0,05$) y no fue posible ajustar un NC de CZnh para las condiciones bajo estudio. (Figura 11 A y B, respectivamente). Por otro lado, la CZnh en V_7 y R_2 no se relacionaron con la concentración de Zn-DTPA en suelo ($p\text{-valor}=0,512$).

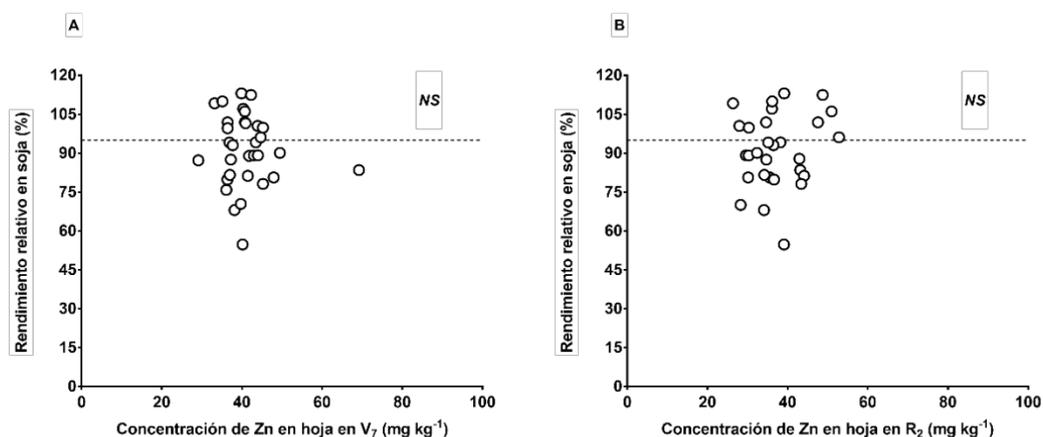


Figura 11. Relación entre el rendimiento relativo en soja (RR) en % y la concentración total de zinc en hoja (CZnh) del cultivo de soja del estudio principal en mg kg^{-1} medido en A) V_7 y B) en R_2 .

Estos resultados, concuerdan con lo reportado por Enderson et al. (2015) y Gaspar et al. (2018), para 6 ensayos en Minesota, quienes determinaron una variabilidad sustancial en las CZnh medidas entre V_7 y R_2 , y dentro de cada etapa de crecimiento, lo que no permitió establecer NC o rangos de suficiencia de Zn que se correspondan con la respuesta en rendimiento debido a la fertilización foliar. En línea, Enderson et al.

(2015) también informaron la falta de relación entre la CZnh medida en V_5 - V_6 o R_2 - R_3 y la respuesta a la fertilización foliar en 42 sitios en Iowa.

La variabilidad determinada en la CZnh y la falta de relación con la respuesta a la fertilización o su disponibilidad en el suelo, sugiere que el análisis de hoja no es un buen indicador de la disponibilidad de Zn en el suelo para las condiciones de este estudio. No obstante, estos datos deben ser tomados con precaución dado que se necesitarían mayor cantidad de sitios dado la variabilidad de este parámetro.

3.4.2 Relación entre la respuesta a B y su concentración foliar en V_7 y R_2 en soja

El RR no se relacionó con la CBh analizada en V_7 por lo que no fue factible determinar un NC de CBh en estadios tempranos del cultivo (Figura 12, A). Si bien no existen publicados valores críticos para soja en V_6 - V_7 , Enderson et al. (2015) sugirieron que valores superiores a $24,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de CBh son suficientes y no habría respuesta a la fertilización foliar en soja cuando la CBh supera este nivel.

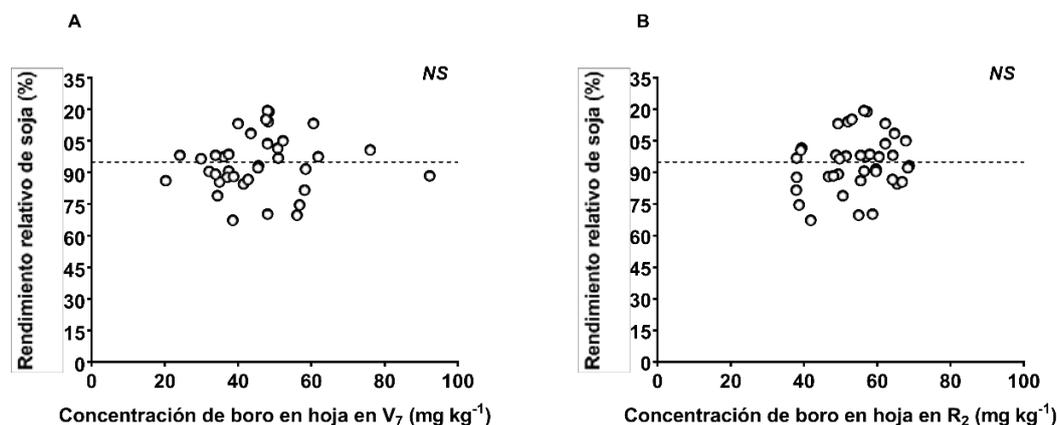


Figura 12. Relación entre el rendimiento relativo en soja (RR) en % y la concentración total de boro en hoja (CBh) del cultivo de soja del estudio principal en mg kg^{-1} medido en A) V_7 y B) en R_2 .

La mismo que sucedió en V_6 - V_7 en R_2 el RR tampoco se relacionó con la CBh y no se logró determinar un NC (Figura 12, B). Por lo tanto, en las condiciones ambientales exploradas, no existe evidencia de relación significativa entre el análisis de B en tejido en ninguno de los momentos de evaluados, V_7 y R_2 y el RR de soja. Actualmente se han informado un NC de CBh en R_2 en soja de 44 mg kg^{-1} (rango de suficiencia entre

24-64 mg kg⁻¹) (Antunes de Souza et al., 2020). En el presente estudio, las CBh se encontraron, en la mayoría de los casos, por encima de los niveles de suficiencia definidos en la literatura. Esto se relaciona con el bajo porcentaje de ambientes donde hubo efecto de la fertilización con B sobre el rendimiento en grano (11%; Tabla 5).

La ausencia de correlación entre el RR y la CBh también fue informada por otros autores, los cuales atribuyen estos resultados a la escasa sensibilidad de la concentración de B total en planta para detectar deficiencias (Goldbach et. al., 2000, Sutradhar et al., 2017). Por ende, surge la necesidad medir un *pool* más sensible de B en la planta, ya que el análisis de B total sólo es buen indicador en especies que contienen polialcoholes, encargados de la translocación y removilización de B por floema (Brown y Shelp, 1997). En cambio, para el diagnóstico en especies que no presenten dichas moléculas, como es el caso de soja, el análisis de la fracción más fácilmente extractable (H₃BO₃ libre o complejos de B solubles) en tejidos jóvenes, podría ser mejor indicador del estado nutricional de la planta (Goldbach et. al., 2000).

En síntesis, los resultados de este trabajo indican que el análisis foliar de la CZnh y CBh, no permitieron caracterizar la disponibilidad de los mismos para el cultivo. Esto se relacionó a la elevada variabilidad de las concentraciones dentro de la misma etapa de muestreo y entre etapas de crecimiento del cultivo de soja, lo que dificulta establecer niveles críticos o de suficiencia de los mismos. No obstante, se debe profundizar más en el estudio e interpretación de la movilidad y translocación de estos micronutrientes en la planta, para identificar los momentos oportunos de muestreo, selección de tejido a analizar y cuál o cuáles son las formas químicas de Zn y B más apropiadas para analizar en esta especie.

3.5 Relación entre la respuesta a la fertilización foliar y la concentración total de Zn y B en el grano

3.5.1 Relación entre la respuesta a Zn y su concentración en grano de soja

La CZng se relacionó con el RR en soja (Figura 13) donde se observó que el 80% de los casos fueron correctamente diagnosticados. En base a esto se determinó un NC de CZng de 36,11 mg kg⁻¹ (32,29-40,38 mg kg⁻¹) empleando el modelo de CASL para el 95% de RR, que resultó en un mejor ajuste que modelos lineales ($r^2=0,25$) (datos no mostrados). La mayoría de los ambientes se encontraron por debajo de la

CZng crítica, lo que se corresponde con la respuesta a la fertilización observada (Tabla 5).

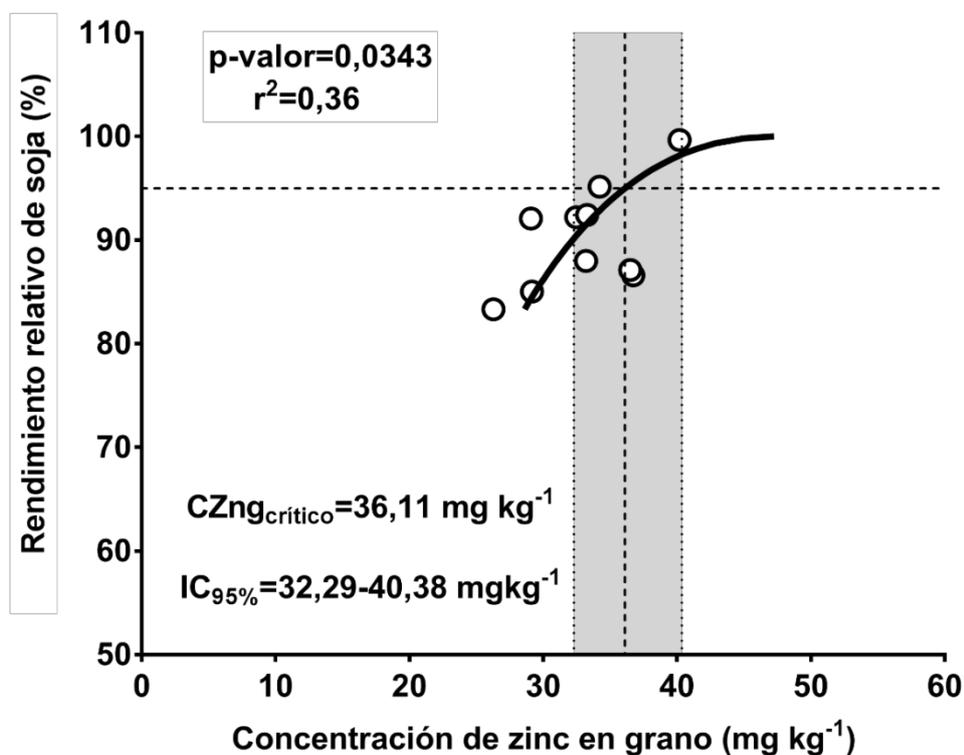


Figura 13. Relación entre la concentración total de Zn en grano en mg kg^{-1} y el rendimiento relativo de soja (%) en los ambientes del estudio principal.

Rashid y Fox (1992) y Caires et al. (2020) propusieron un NC CZng de 43 mg kg para un 95% de RR en soja, similar al NC de CZng ajustado en nuestro estudio. Además, los mismos autores, reportaron que dicho valor fue significativamente mayor a los NC determinados para cereales como maíz, trigo y sorgo ($10\text{-}15 \text{ mg kg}^{-1}$) (Rashid y Fox, 1992). De acuerdo a nuestros resultados se demuestra que el análisis de Zn total en grano tiene ventajas sobre el análisis de hojas en soja y fue útil para evaluar la deficiencia de Zn en plantas de soja.

Si bien este análisis, no permite corregir la deficiencia en el ciclo del cultivo, sería valioso para evaluar la disponibilidad de Zn en suelo en futuras campañas. Teniendo en cuenta, la escasa movilidad de Zn en el suelo y el bajo aporte de las otras fracciones no disponibles.

3.5.2 Relación entre la respuesta a B y su concentración en grano de soja

De la misma manera que en concentración de B en hojas de soja, la CBg no se relacionó con el RR en soja (Figura 14). Esto puede deberse a la baja movilidad y translocación del B a la planta (Bender et al, 2015). De la misma forma, Enderson et al. (2015) demostraron la falta de relación entre el RR y la CBg en soja.

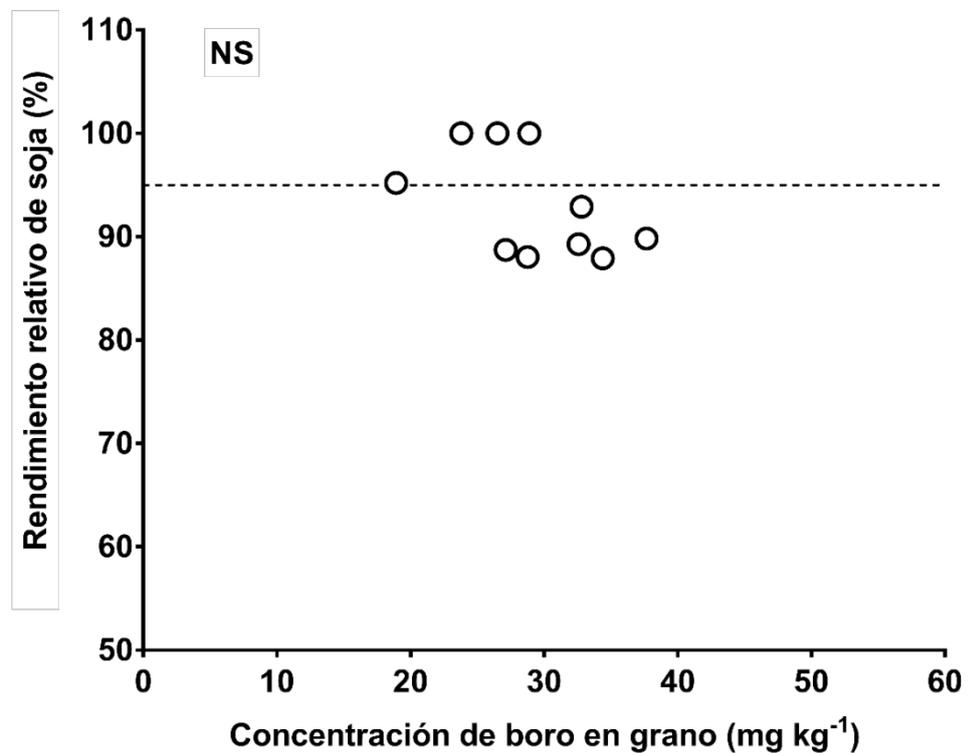


Figura 14. Relación entre la concentración total de boro en grano en mg kg⁻¹ y el rendimiento relativo de soja (%) en los ambientes del estudio principal

4. CONSIDERACIONES FINALES

La fertilización con Zn y B incrementó el Rg de soja en el 33% y en el 25% de los ambientes, respectivamente. El incremento del Rg fue de un 16% y un 11% para Zn y B, respectivamente, en una amplia gama de ambientes de Argentina. Para ambos micronutrientes, se comprobó que la respuesta se asoció a la movilidad de los mismos tanto en el suelo como en la planta. Así, en el caso de Zn, que es un elemento poco móvil en el suelo, la respuesta a la fertilización no se relacionó con el Rg máximo, mientras que la respuesta al agregado B depende del rendimiento potencial del ambiente y del nivel de B en el suelo, cuando la extracción se realizó con CaCl_2 . Por otro lado, la fertilización no produjo aumentos significativos en la concentración de Zn y B en hoja o grano.

En cuanto al diagnóstico de Zn, se determinó que el análisis de Zn-DTPA en suelo es buen indicador de la disponibilidad de Zn para el cultivo de soja, ya que se asoció con la respuesta a la fertilización. Esta metodología permitió establecer un nivel crítico de Zn-DTPA y rangos de probabilidad de respuesta a la fertilización con Zn en experimentos a campo, información inédita para este micronutriente. Por otro lado, el diagnóstico a través del análisis de la concentración de Zn total en hoja presentó marcada variabilidad dentro de cada momento de muestreo y no se asoció con la respuesta ni en V_7 ni R_2 . En cambio, el análisis de la concentración de Zn en grano fue un buen indicador del grado de deficiencia de Zn de la planta, por lo que podría considerarse una herramienta complementaria para el monitoreo del estatus de Zn, y planificar correcciones en las campañas siguientes. Sin embargo, dicho índice de disponibilidad debe ser validado en un mayor rango de sitios.

En el caso de B, el análisis de su disponibilidad en el suelo fue la única metodología que se asoció con la respuesta a la fertilización con B, para los dos extractantes evaluados. Fue posible establecer niveles críticos de B- CaCl_2 y B- AcNH_4 y rangos de probabilidad de respuesta para el cultivo de soja en ensayos en condiciones de campo, información inédita para este nutriente. Para ambos extractantes, el rango entre suficiencia y deficiencia fue estrecho. El B- AcNH_4 fue mejor indicador de la disponibilidad del nutriente que el B- CaCl_2 , ya que presentó mayor capacidad para predecir la disponibilidad de B, y fue más efectivo en cuanto al % de casos correctamente diagnosticados. Además, dada su mayor practicidad metodológica, el análisis de B- AcNH_4 debería ser adoptada como análisis de rutina por los laboratorios

que presten servicios. Por otro lado, el diagnóstico a través del análisis de la concentración de B total en hoja en V_7 ó en R_2 , no fue útil para predecir la respuesta a la fertilización con B. En línea a esto, el análisis de la concentración total de B en grano tampoco se relacionó con la respuesta en rendimiento. La nula asociación entre la concentración de B total en tejido y la respuesta en rendimiento, sugiere la necesidad continuar investigando sobre la factibilidad de analizar un pool más sensible de B en la planta de soja que refleje su disponibilidad.

5. CONCLUSIÓN

Las evidencias recopiladas no son suficientes para rechazar la Hipótesis 1, que afirma que los niveles de Zn-DTPA del estrato superficial del suelo (0-20 cm) se asocian con la respuesta al agregado de Zn en soja.

Existe evidencia para no rechazar la Hipótesis 2 que plantea que los niveles del B-CaCl₂ del estrato superficial del suelo (0-20 cm) se asocian con la respuesta al agregado de B en soja.

Existe evidencia para no rechazar la Hipótesis 3 que plantea que los niveles del B-AcNH₄ del estrato superficial del suelo (0-20 cm) se asocian con la respuesta al agregado de B en soja.

Las evidencias encontradas fueron suficientes para rechazar la Hipótesis 4, que indica que la inclusión de variables edáficas como textura, pH, MO, CIC y contenido de P-Bray-1 en un modelo de diagnóstico de Zn-DTPA mejoran la predicción de la respuesta al agregado de Zn.

De la misma manera en B, las evidencias encontradas fueron suficientes para rechazar la Hipótesis 5 y 6.

Asimismo, la información analizada contribuye con evidencias para rechazar las Hipótesis 7 y 8, que indican que el análisis de Zn y B en tejido en una etapa temprana del cultivo permite el diagnóstico de la disponibilidad de ambos nutrientes.

Existe evidencia para no rechazar la Hipótesis 9 que plantea que la CZn en grano se asocia con la respuesta al agregado de Zn en soja.

Por último, la información analizada contribuye con evidencias para rechazar la Hipótesis 10, que afirma que la CB en grano se asocia con la respuesta al agregado de B en soja.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, A. M. 2005. Los suelos como fuente de boro para las plantas. *Revista Científica UDO Agrícola*, 5(1), 10-26.
- Alleoni, L. R. F.; Camargo, O. A. D. 2000. Boron adsorption in soils from the State of São Paulo, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35, 413-421
- Alloway, B.J. 2008a. *micronutrients and crop production: an introduction*. In: Alloway B.J. (eds) *Micronutrient deficiencies in global crop production*. Springer, Dordrecht, pp 1-39.
- Alloway, B. J. 2008b. *Zinc in soils y crop nutrition*. 2nd ed. IZA, IFA. Brussels, Belgium, pp 32-46.
- Alloway, B.J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops y humans. *Environmental Geochemistry Health* 31, 537-548.
- Andrade, F. H.(comp.); Taboada, M. A.; Lema, R. D.; Maceira, N. O.; Echeverria, H. E.; Posse Beaulieu, G.; Mastrangelo, M. E. 2017. *Los desafíos de la agricultura argentina: satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental*. Ediciones INTA. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/2149>
- Antunes de Souza, H.; de Melo, P.F.; Vieira, J.; Rozane, D.E.; Sagrilo, E.; Carvalho Leite, L.F.; Melo Ferreira, A.C. 2020. Critical levels y sufficiency ranges for leaf nutrient diagnosis by two methods in soybean grown in the Northeast of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20190125>.
- Aramburu Merlos, F.; Monzon, J.P.; Mercau, J.L.; Taboada, M; Yrade, F.H.; Hall, A.J.; Jobbagy, E.; Cassman, K.G.; Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*. 184: 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>
- Arora, S.; Chahal, D. S. 2014. Forms of boron in alkaline alluvial soils in relation to soil properties y their contribution to available y total boron pool. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(17), 2247-2257.
- Barbieri, P. A.; Sainz Rozas, H. R.; Wyngaard, N.; Eyherabide, M.; Reussi Calvo, N. I.; Salvagotti, F.; Colazo, J. C. 2017. Can edaphic variables improve DTPA-Based Zinc Diagnosis in Corn? *Soil Science Society of America journal* 81 (3): 556-563.
- Barker, A.V.; Eaton, T.E. 2015. *Zinc*. In: Barker, A. V.; Pilbeam, D.J. *Handbook of plant nutrition* (2nd ed.). CRC press, Boca Raton, FL, USA, pp. 537-564. <https://doi.org/10.1201/b18458>.
- Bassil, E.; Hu, H.; Brown, P. H. 2004. Use of phenylboronic acids to investigate boron function in plants. Possible role of boron in transvacuolar cytoplasmic strands and cell-to-wall adhesion. *Plant Physiology*. 136(2):3383-95
- Bender, R. R.; Haegele, J. W.; Below, F. E. 2015. Nutrient uptake, partitioning, y remobilization in modern soybean varieties. *Agronomy Journal*, 107(2), 563-573.
- Bengolea, B. B.; Ratto, S. E. 2015. Ensayo de fertilización y rendimiento del cultivo de soja en la Pampa Ondulada: ¿Boro o Nitrógeno? *Agronomía y Ambiente*, 35(1).
- Bingham, F.T. 1982. *Boron*. In: Page, A.L., (ed.), *Methods of soil analysis Part-2 Chemical and mineralogical properties*, ASA: Madison, pp.431-448

- Blevins, D.G.; Lukaszewski, K.M. 1998. Boron in plant structure y function. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49, 481–500.
- Boga, L.; Ramirez, H. 2014. Efecto de la fertilización con fósforo, azufre y zinc en el cultivo de soja en la región pampeana norte de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamerica*. (16), 7-19.
- Bolaños, L.; Lukaszewski, K.; Bonilla, I.; Blevins, D. 2004. Why boron? *Plant Physiology and Biochemistry*, 42(11), 907-912.
- Bolsa de Cereales de Buenos Aires. 2019. Soja 2018/19. *Informe RETAA N°25* <https://www.bolsadecereales.com/imagenes/retaa/2019-10/188informemensualn25soja1819.pdf>
- Borkert, C.M.; Cox, F.R.; Tucker, M. 1998. Zinc and copper toxicity in peanut, soybean, rice, and corn in soil mixtures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29(19-20), 2991-3005.
- Bray, R.H.; Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic y available form of phosphorus in soil. *Soil Science*. 59, 360-361.
- Brown, P.H.; Bellaloui, N.; Wimmer, M.A.; Bassil, E.S.; Ruiz, J.; Hu, H.; Römheld, V. 2002. Boron in plant biology. *Plant Biology*, 4(02), 205-223.
- Brown, P. H.; Shelp, B. J. 1997. Boron mobility in plants. *Plant and Soil*, 193,85-101.
- Brown, P.H.; Hu, H. 1997. Does boron play only a structural role in the growing tissues of higher plants? *Plant and Soil*, 196, 211–215.
- Bruns, H.A. 2017. Soybean micronutrient content in irrigated plants grown in the Midsouth. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(7), 808-817.
- Bryson, G. M.; Mills, H. A. 2014. Zinc. En: Bryson, G.M.; Mills, H.A.; Sasseville, D.N.; Jones, J.B.; Barker, A.V. *Plant analysis handbook III: A guide to sampling, preparation, analysis, interpretation y use of results of agronomic y horticultural crop plant tissue*. Micro-Macro Publishing, Athens, GA, pp 383-413.
- Buffa, E.V.; Ratto, S.E. 2005. Disponibilidad de cinc, cobre, hierro y manganeso extraíble con DTPA en suelos de Córdoba (Argentina) y variables edáficas que la condicionan. *Ciencia del Suelo*, 23(2), 107-114.
- Caires, E.F.; Poltronieri, R.; Guimarães, A.M. 2020. Soybean seed analysis as a nutritional diagnostic tool. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(21), 2712-2725.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 302(1), 1-17.
- Cakmak, I.; McLaughlin, M.J.; White, P. 2017. Zinc for better crop production and human health. *Plant and Soil* 411, 1–4
- Capitanelli, R. 1979. *Geomorfología*. En: Vázquez, J.B., Roqué, M.E. (eds.) *Geografía física de la provincia de Córdoba*. Boldt; Córdoba, pp.213-296.
- Chapman, H.D. 1965. Cation-exchange capacity. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 891-901.
- Ciampitti, I.A.; Vyn, T.J. 2013. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: II. Calcium, magnesium, and micronutrients. *Agronomy Journal*, 105(6), 1645-1657.

- Correndo, A.A.; Salvagiotti, F.; García, F.O.; Gutiérrez Boem, F.H. 2017. A modification of the arcsine–log calibration curve for analysing soil test value–relative yield relationships. *Crop and Pasture Science*. 68(3): 297-304.
- Correndo, A.A.; García, F.O. 2012. *Alternativas de diagnóstico para el manejo nutricional en cultivos extensivos*. En VI Congreso Boliviano de la Ciencia del suelo (Vol. 8).
- Da Silva Domingos, C.; Neto, M.E.; Besen, M.R.; de Oliveira Zampar, É.J.; Batista, M. A.; Scapim, C.A.; Braccini, A.L. 2019. Foliar applications of phosphorus, calcium, boron and potassium and their impacts on the seed yield and physiological and nutritional qualities of soybean. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 31(8):626-634.
- Datta, S.P.; Bhadoria, P.B.S.; Kar, S. 1998. Availability of extractable boron in some acid soils, West Bengal, India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29.15-16: 2285-2306.
- Dey, A.; Dwivedi, B.S.; Meena, M.C.; Datta, S.P.; Kumar, A. 2014. Soil boron fractions and their contribution towards boron availability and uptake by wheat on a Typic haplustept under long-term fertilization. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 62(4), 384-390.
- Di Rienzo J.A.; Casanoves F.; Balzarini M.G.; Gonzalez L.; Tablada M.; Robledo C.W. InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina <http://www.infostat.com.ar> .
- Divito, G.; Echeverría, H.E.; Andrade, F.H.; Sadras, V.O. 2015. Diagnosis of S deficiency in soybean crops: performance of S y N:S determinations in leaf, shoot y seed. *Field Crops Research*, 180,167-175.
- Dordas, C.; Chrispeels, M.J.; Brown, P.H. 2000. Permeability y channel mediated transport of boric acid across membrane vesicles isolated from squash roots. *Plant Physiol*. 124, 1349–1361. doi: 10.1104/pp.124.3.1349.
- Dupré, R.L.C.; Khiari, L.; Gallichand, J.; Joseph, C.A. 2019. Multi-factor diagnostic and recommendation system for boron in neutral and acidic soils. *Agronomy*, 9(8), 410.
- Dyson, C.B.; Conyers, M.K. 2013. Methodology for online biometric analysis of soil test–crop response datasets. *Crop and Pasture Science*, 64(5), 435-441.
- Dzondo-Gadet, M.; Mayap-Nzietchueng, R.; Hess, K.; Nabet, P.; Belleville, F.; Dousset, B. 2002. Action of boron at the molecular level. *Biological Trace Element Research*, 85(1), 23-33.
- Elrashidi, M.A.; O'Connor, G.A.1982. Boron sorption and desorption in soils. *Soil Science Society of American Journal* J. 46, 27-31.
- Enderson, J.T.; Mallarino, A.P.; Haq, M.U. 2015. Soybean yield response to foliarapplied micronutrients y relationships among soil y tissue tests. *Agronomy Journal*. 107(6), 2143-2161.
- Espinoza, L.; Mozaffari, M.; Slaton, N. A.; Wimberly, R.; Thompson, R.; Klerk, R. 2002. Soybean yield response to foliar-and soil-applied boron rates. In: Slaton, N.A. (ed.). Wayne E. Sabbe Arkansas soil fertility studies 2020, Arkansas Agricultural Experiment Station, pp. 32-35.
- Espósito, G.; Balboa, G.; Castillo, C.; Balboa, R. 2010. *Disponibilidad de zinc y respuesta a la fertilización del maíz en el sur de Córdoba*. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario, Santa Fe. Argentina. Junio 2010.

- Fehr, W.; Caviness, S. E. 1977. *stages of soybean development agriculture and home* Iowa State University of Science and Technology: Ames, Iowa. Special Report; 80 <https://core.ac.uk/download/pdf/83024475.pdf>
- Ferraris, G.; Couretot, L. 2009. Respuesta del maíz a la fertilización complementaria con zinc, boro y otros nutrientes. *Revista Agromercado*, 25(291), 22-24.
- Fontanetto, H.; Keller, O.; Albrecht, J. 2010. Efecto de la fertilización foliar con boro y nitrógeno sobre el cultivo de soja. IPNI. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 47,. 19-22.
- Fujiyama, B. S.; Silva, A. R. B. E.; Silva Júnior, M. L. D.; Cardoso, N. R. P.; Fonseca, A. B. D.; Viana, R.G.; Sampaio, L. S. 2019. Boron fertilization enhances photosynthesis y water use efficiency in soybean at vegetative growth stage. *Journal of Plant Nutrition*, 42(19), 2498-2506.
- Gaines, T.P.; Mitchell, G.A., 1979. Boron determination in plant tissue by the azomethine H method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 10(8), 1099-1108.
- Gambaudo, S.; Racca Madoery, M.S.; Fontanetto, H. 2011. Respuesta al agregado de micronutrientes en el cultivo de soja en suelos de diferente aptitud agrícola, IPNI, *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 3:1-5.
- García, F.O.; Díaz Zorita, M. 2015. *La fertilidad de los suelos y el uso de nutrientes en la producción agrícola extensiva de Argentina*. En: Casas, R.R y Albarracín G.F. (eds.) *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina*. Fundación Ciencia, Educación y Cultura: Ciudad Autónoma de Buenos Aires. v.1. pp.183-198.
- García, F.O.; Reussi Calvo, N.I. 2014. *Trigo*. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. (2ª ed.). Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA, pp. 401-434.
- Gaspar, A.P.; Laboski, C.A.; Naeve, S.L.; Conley, S.P. 2018. Secondary and micronutrient uptake, partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels. *Agronomy Journal*, 110(4), 1328-1338.
- Gee, G.W.; Bauder, J.W. 1986. *Particle-size analysis*. En: Klute, A. (ed.) *Methods of soil analysis Part 1*. Soil Science Society of America Book Series 5, Madison, Wisconsin, USA, pp. 383-411.
- Goldbach, H. E.; Wimmer, M. A.; Findelee, P. 2000. Discussion paper: Boron—how can the critical level be defined? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(1), 115-121.
- Goldberg, S.; Forster, H.S 1991 Boron sorption on calcareous soils and reference calcites. *Soil Science*. 152, 304-310.
- Goldbach, H.E.; Wimmer, M.A. 2007. Boron in plants y animals: is there a role beyond cell-wall structure? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(1), 39-48.
- Goldberg, S. 1997. Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, 193(1-2): 35-48.
- Goldberg, S.; Shouse, P. J.; Lesch, S. M.; Grieve, C. M.; Poss, J. A.; Forster, H. S.; Suarez, D. L. 2002. Soil boron extractions as indicators of boron content of field-grown crops. *Soil Science*, 167(11), 720-728.

- Grove, J.H.; Schwab, G.J. 2010. Micronutrient nutrition for corn y soybean: Emerging issues in Kentucky. In: Proceedings 40th North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference, Des Moines, IA. Int. Plant Nutrition Inst., Brookings, SD. pp. 16– 18.
- Gupta, U.C.; Wu, K.N.; Liang, S.Y. 2008. Micronutrients in soils, crops, y livestock. *Earth Science Frontiers* 15, 110–125.
- Gutierrez Boem, F.H.; Salvagiotti, F. 2014. *Soja*. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. (2ª ed.). Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA, pp. 479-481.
- Gutiérrez Boem, F.; Rubio, G.; Alvarez, R. 2005. *Diagnóstico de la disponibilidad de nutrientes*. En: Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Facultad de Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina, pp 27-36.
- Han, X.; Li, X.; Uren, N.; Tang, C. 2011. Zinc fractions y availability to soybeans in representative soils of Northeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 11(4), 596-606.
- Hang, S.; Negro, G.; Becerra, A.; Rampoldi, A. E. 2015. *Suelos de Córdoba: Variabilidad de las propiedades del horizonte superficial*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Harter, D.R. 1991. *Micronutrient Adsorption-Desorption Reactions in Soils*. En: Mortvedt J.J.; Cox, F. R.; Shuman, L.M.; Welch, R. M.; Mickelson, S.H.; Luxmoore, R.J.; Miller, F.P. Micronutrients in agriculture (2nd edition). *Soil Science Society of America*, Madison, Wisconsin, USA, pp. 74-78. <https://doi.org/10.2136/sssabookser4> .
- Havlin, J.L.; Beaton, J.D.; Tisdale, S.L.; Nelson, W.L. 2016. *Micronutrients*. In: Soil fertility y fertilizers, an introduction to nutrient management. Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. pp. 254-279.
- Helfenstein, J.; Pawlowski, M.L.; Hill, C.B.; Stewart, J.; Lagos-Kutz, D.; Bowen, C.R.; Frossard, E.; Hartman, G.L. 2015. Zinc deficiency alters soybean susceptibility to pathogens y pests. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178 (6):896–903.
- Hotz, C.; Brown, K. H. 2004. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations y options for its control. *Food Nutrition Bulletin* 25 (1), 194–95.
- Ichikuni, M.; Kikuchi, K. 1972. Retention of boron by travertines. *Chemical Geology*, 9(1-4), 13-21.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y Gobierno de la provincia de Córdoba. s.f. *Hoja 3163-32 "Oncativo"*. Cartas de Suelos de Córdoba. Recuperado el 1 de septiembre de 2022. <http://suelos.cba.gov.ar/index.html>
- Keren, R. 1996. *Boron*. In: Sparks, D.L. et al. (eds.). *Methods of soil analysis Part 3. Chemical Methods*, 5.3. SSSA Book Series, pp.603-626. doi:10.2136/sssabookser5.3.c21.
- Lavado, R.S.; Taboada, M.A. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agresource. *Journal of Soil and Water Conservation*, 64(5), 150A-153A.
- Lindsay, W.L.; Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, y copper. *Soil Science Society of America Journal*. 42(3), 421-428.

- Lindsay, W.L. 1991. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. En: Mortvedt, J.J. et al. (eds.). *Micronutrients in agriculture*, 2nd ed. SSSA: Madison, WI, pp.102–103.
- Liu, X. Y.; Jin, T. Y.; Nordberg, G. F.; Sjostrom, M.; Zhou, Y. 1994. Influence of zinc and copper administration on metal disposition in rats with cadmium-metallothionein-induced nephrotoxicity. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 126(1), 84-90.
- Lohse, G. 1982. Microanalytical azomethine-H method for boron determination in plant tissue. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 13(2), 127-134.
- Mahler, R. L.; Naylor, D.V.; Fredrickson, M. K. 1984. Hot water extraction of boron from soils using sealed plastic pouches. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15(5), 479-492.
- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. D. 1997. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato: Piracicaba, pp. 236-291
- Mallarino, A.P.; Kaiser, D.E.; Ruiz-Diaz, D.A.; Laboski, C.A.; Camberato, J.J.; Vyn, T. J. 2017. *Micronutrients for soybean production in the north central region*. Iowa State University Extension and Outreach. CROP 3135. <https://store.extension.iastate.edu/product/15259.pdf>.
- Mandal, B.; De, D. K. 1993. Depthwise distribution of extractable boron in some acidic Inceptisols of India. *Soil Science*, 155(4), 256-262.
- Mandal, B.; Adhikari, T. K.; De, D. K. 1993. Effect of lime y organic matter application on the availability of added boron in acidic alluvial soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 24, 1925 -1935.
- Marschner, P. 2012. *Function of Nutrients: Micronutrients*. In: Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. London: Academic Press, pp. 233-242.
- Martínez Cuesta, N.; Wyngaard, N.; Saínz Rozas, H.R.; Reussi Calvo, N.; Carciochi, W.; Eyherabide, M.; Colazo, J. C.; Barraco, M.; Guertal, E. A.; Barbieri, P. 2020. Determining Mehlich-3 y DTPA extractable soil zinc optimum economic threshold for maize. *Soil Use and Management*, 1– 13. <https://doi.org/10.1111/sum.12657> .
- Matula, J.; Pechová, M. 2006. Relation between multinutrient soil tests and boron in barley. *Plant Soil Environ* 52, 295–300.
- Matula, J. 2009. Boron sorption in soils and its extractability by soil tests (Mehlich 3, ammonium acetate and water extraction). *Plant, Soil and Environment*, 55(1), 42-49.
- Melgar, R.J.; Lavyera, J.; Duggan, M.T.; Ventimiglia, L. 2001. Respuesta a la fertilización con boro y zinc en sistemas intensivos de producción de maíz. *Ciencia del Suelo*, 19(2), 109-114.
- Menzies, N.W.; Donn M.J.; Kopittke P.M. 2007. Evaluation of extractantes for estimation of the phytoavailable trace metals in soils. *Environmental Pollution* 145(1):121-30.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (30/08/2022). *Estimaciones Agrícolas* [Dataset]. <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar>

- Miretti, M.C.; Pilatti, M.; Lavado, R.S.; Imhoff, S.D. 2012. Historia de uso del suelo y contenido de micronutrientes en Argiudoles del centro de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Ciencia del Suelo*. 30(1): 67-73.
- Mühlbachová, G.; Čermák, P.; Káš, M.; Marková, K.; Vavera, R.; Pechová, M.; Lošák, T. 2018. Crop yields, boron availability and uptake in relation to phosphorus supply in a field experiment. *Plant, Soil and Environment*, 64(12), 619-625.
- Niaz, A.; Ranjha, A. M.; Rahmatullah, A. H.; Waqas, M. 2007. Boron status of soils as affected by different soil characteristics—pH, CaCO₃, organic matter and clay contents. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 44(3), 428-435.
- O'Neill, M. A.; Ishii, T.; Albersheim, P.; Darvill, A. G. 2004. Rhamnogalacturonan II: structure y function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide. *Annual Review of Plant Biology* 55, 109-139.
- Paull, J.G.; Rathjen, A.J.; Cartwright, B. 1991. Major gene control of tolerance of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) to high concentrations of soil boron. *Euphytica*, 55(3), 217-228.
- Pawłowski, M.L.; Helfenstein, J.; Frossard, E.; Hartman, G.L. 2019. Boron y zinc deficiencias y toxicities y their interactions with other nutrients in soybean roots, leaves, y seeds. *Journal of Plant Nutrition*, 42(6), 634-649.
- Payne, G.G.; Sumner, M.E.; Plank, C.O. 1986. Yield and composition of soybeans as influenced by soil pH, phosphorus, zinc, and copper. *Communications in soil Science and Plant Analysis*, 17(3), 257-273.
- Pinheiro, J.; Bates, D.; R Core Team 2022. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-159, <https://CRAN.R-project.org/package=nlme> .
- Rafique, E.; Rashid, A.; Mahmood-UI-Hassan, M. 2012. Value of soil zinc balances in predicting fertilizer zinc requirement for cotton-wheat cropping system in irrigated Aridisols. *Plant and Soil* 361, 43–55.
- Rashid, A.; Ryan, J. 2004. Micronutrient constraints to crop production in soils with Mediterranean-type characteristics: a review. *Journal of Plant Nutrition*. 27(6): 959-975.
- Rashid, A.; Fox, R. L. 1992. Evaluating internal zinc requirements of grain crops by seed analysis. *Agronomy Journal*, 84(3),469-474.
- Raza, M.; Mermut, A.R.; Schoenau, J.J.; Malhi, S. S. 2002. Boron fractionation in some Saskatchewan soils. *Canadian Journal of Soil Science*. 82(2):173-179.
- R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing, version 3.6.1 (2019-07-05) -- "Action of the Toes". R. Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria <http://www.R-project.org/>
- Ren, F.; Liu, T.; Liu, H.; Hu, B. 1993. Influence of zinc on the growth, distribution of elements, y metabolism of one-year old American ginseng plants. *Journal of Plant Nutrition* 16 (2):393–405. doi: 10.1080/01904169309364539.
- Rice, C.W. 2002. *Organic matter and nutrient dynamics*. In: Encyclopedia of soil science. Marcel Dekker Inc.: New York, USA, pp. 925– 928
- Ritchie, S.W.; Hanway, J.J.; Thompson, H.E. 1985. *How a soybean plant develops* Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service. Special Report N°53 <https://core.ac.uk/download/pdf/83024446.pdf>

- Rolla, A.L.; Nuñez, M.N.; Guevara, E.R.; Meira, S.G.; Rodriguez, G. R.; de Zárata M. I. 2018. Climate Impacts on Crop Yields in Central Argentina. *Adaptation Strategies. Agricultural Systems* 160: 44–59. doi: 10.1016/j.agsy.2017.08.007.
- Rose, I.A.; Felton, W. L.; Banks, L. W. 1981. Responses of four soybean varieties to foliar zinc fertilizer. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 21(109), 236-240.
- Ross, J.R.; Slaton, N.A.; Brye, K.R.; De Long, R. E. 2006. Boron fertilization influences on soybean yield leaf and seed boron concentrations. *Agronomy Journal*, 98(1), 198-205.
- Saha, A.; Mani, P.K., Hazra, G.C.; Mitran, T. 2017. Assessing suitability of different extractants for determining available boron in soil. *Journal of Plant Nutrition*, 40(19), 2651-2661.
- Sainz Rozas, H.R; Echeverría, H.E.; Calviño, P.A.; Barbieri, P.; Redolatti, M. 2003. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de zinc y cobre en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 21: 52-58.
- Sainz Rozas, H.S.; Puricelli, M.; Eyherabide, M.; Barbieri, P. A.; Echeverría, H. E., Calvo, N. I. R.; Martínez, J. P. 2015. Available zinc levels in soils of Argentina. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research* 7(5), 59-71.
- Sainz Rozas, H.R.; Eyherabide, M.; Larrea, G.; Martínez Cuesta, N.; Angelini, H.; Reussi Calvo, N.; Wyngaard, N. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la Región Pampeana. 14° Simposio de Fertilidad. Rosario 8-9 de mayo d 2019
- Salvagiotti, F.; Barbagelata P.; Barraco, M.; Condori, A.; Di Mauro, G.; Enrico, J.; Echeverría, H.; Ferrari, M.; García, F.; Gudelj, V.; Ortez, O.; Rotundo, J.; Ciampitti, I. 2018. *Requerimientos de nutrientes en soja: curvas de dilución y acumulación e índice de cosecha*. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Tucumán 15 al 18 de mayo de 2018
- Sarkar, D.; Mandal, B.; Kundu, M.C.; Bhat, J.A. 2008. Soil properties influence distribution of extractable boron in soil profile. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(15-16), 2319-2332.
- Shuman, L. M. 1986. Effect of liming on the distribution of manganese, copper, iron, and zinc among soil fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1236-1240.
- Shuman, L. M. 1991. *Chemical forms of micronutrients in soils*. En: Mortvedt J.J; Cox, F. R.; Shuman, L.M.; Welch, R. M.; Mickelson, S.H.; Luxmoore, R.J.; Miller, F.P. *Micronutrients in agriculture* (2nd edition). Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, pp. 113-144. <https://doi.org/10.2136/sssabookser4.2ed>
- Sillanpaa, M. 1982. Micronutrients y the nutrient status of soils: A global study. *FAO Soils Bulletin* 48:169-179.
- Sucunza, F.A.; Boem, F.H.G.; Garcia, F.O.; Boxler, M.; Rubio, G. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean y maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels y balances. *European Journal of Agronomy*, 96, 87-95.
- Sutradhar, A.K.; Kaiser, D.E.; Behnken, L.M. 2017. Soybean response to broadcast application of boron, chlorine, manganese, y zinc. *Agronomy Journal*, 109(3), 1048-1059.
- Tariq, M.; Mott, C.J.B. 2007. The significance of boron in plant nutrition y environment-A review. *Journal of Agronomy*, 6(1), 1 <http://dx.doi.org/10.3923/ja.2007.1.10>

- Tisdale, S.L.; Nelson, W.L. 1975. *Soil fertility y fertilizers*. Macmillan Publishing: New York, NY, pp. 560-564
- Torri S.; Urricariet A.S.; Lavado, R. 2011. *Micronutrient availability in crop soils of the Pampas region, Argentina*. In: Miransari, M. (ed.). *Soil nutrients*. Nova Science Publishers pp.277-296.
- USDA, NRCS. (3 march 2020). The PLANTS Database. National Plant Data Team, Greensboro, NC USA. <http://plants.usda.gov>
- Walkley, A.; Black, Y. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter y proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-37.
- Watson, M.E. 1998. *Boron test*. In: Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region, North Central Regional Publication No 221 (revised), pp 45-48. https://www.canr.msu.edu/uploads/234/68557/rec_chem_soil_test_proce55c.pdf
- Wessells, K.R.; Brown, K.H. 2012. Estimating the global prevalence of zinc deficiency: results based on zinc availability in national food supplies y the prevalence of stunting. *PloS one*, 7(11), e50568.
- Yamagishi, M.; Yamamoto, Y. 1994. Effects of boron on nodule development y symbiotic nitrogen fixation in soybean plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, 40(2), 265-274.
- Zhang, L. 2001. Effects of foliar applications of boron and dimilin on soybean yield. *Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station, Research Report 22 (16):1-5*.
- Zhang, F.; Romheld, V.; Marschner, I. 1991. Release of zinc mobilizing root exudates in different plant species. *Journal of Plant Nutrition* 14(7) <https://doi.org/10.1080/01904169109364234>