



Fertilización con micronutrientes en el cultivo de soja

Gudelj, Vicente - EEA INTA Marcos Juárez - gudelj.vicente@inta.gob.ar

Palabras clave: fertilización – soja - ensayos

A principio de la década de 1980 el consumo de fertilizantes en el país era bajo. En nuestra región, departamento Marcos Juárez, solo se utilizaba nitrógeno en los cultivos de trigo y maíz. Se aplicaba una bolsa de urea por hectárea y en algunos casos dos. Comparando los quinquenios 1983-87 y 2013-2017 se observa un aumento del 36,7 % en superficie implantada y del 128 % de producción total considerando los cultivos de maíz, trigo y soja, los cuales incrementaron en forma importante los rendimientos. Desde el punto de vista de la nutrición de los cultivos esta mayor agriculturización, con mayores rendimientos fue posible, sumando a lo aportado por el suelo, por la fertilización con nitrógeno (N), fósforo y azufre principalmente. Esta intensificación de la agricultura hizo que últimamente se hayan reportado respuesta en el rendimiento de soja por la aplicación de micronutrientes. Estos son elementos que se presentan en muy bajas concentraciones - mg kg⁻¹ - en los tejidos vegetales y son esenciales para el crecimiento. Según Arnon y Scout (1939), citado por Torri y col. (2014), los elementos esenciales para el crecimiento y reproducción vegetal cumplen funciones específicas en los procesos celulares y no pueden ser reemplazados en sus funciones por otros elementos. De acuerdo a lo anterior hay ocho elementos considerados micronutrientes que son: cinc (Zn), boro (B), molibdeno (Mo), manganeso (Mg), cobre (Cu), hierro (Fe), cloro (Cl) y níquel (Ni). Otro elemento es el cobalto (Co) si bien no es esencial para las plantas, si lo es para el crecimiento de los microorganismos fijadores de N. En el cultivo de soja las respuestas se consiguieron fundamentalmente con la aplicación de B, Zn y Co-Mo.

Los micronutrientes se encuentran asociados a enzimas que regulan distintos procesos metabólicos. Dentro de los que estamos considerando para soja, el Zn actúa en la respiración, la fotosíntesis y la síntesis de clorofila. El Mn en la fotosíntesis, el Mo es parte constitutiva de la enzima nitrato reductasa que cataliza la conversión de NO₃⁻ a NO₂⁻, reacción que ocurre fundamentalmente en los cloroplastos de las hojas. El Mo es también un componente estructural de la nitrogenasa, la enzima que está directamente involucrada en el proceso de fijación de N que tiene lugar en los nódulos resultantes de la simbiosis raíz-bacteria en leguminosas como la soja y, de allí, la especial importancia de este micronutriente para el cultivo. El Co no es considerado un nutriente esencial para las plantas, pero sí lo es para los microorganismos fijadores de N. Por lo tanto, el Co es requerido en los nódulos de las leguminosas como la soja. La esencialidad del Co para el crecimiento de microorganismos simbióticos como el rizobio se debe a su rol en la formación de la vitamina B₁₂ y a su participación en el metabolismo de la le hemoglobina y la ribonucleótido reductasa. El B tiene relación con el metabolismo de los azúcares y a la formación del tubo polínico.

El B, el Zn y el Mn al ser nutrientes inmóviles sus síntomas se presentan en las hojas más jóvenes o yemas apicales. El Mo si bien es inmóvil, está asociado a la fijación biológica del N, cuyos síntomas de deficiencia se presentan en hojas más viejas.

Síntomas de deficiencias: Si bien los síntomas visuales son importantes identificarlos como una forma de monitorear el estado del lote, no deberíamos esperar tener el síntoma para hacer la recomendación de fertilización con el micronutriente. Por otro lado, puede que haya síntomas de diferentes nutrientes

que sean parecidos; o que un estrés ambiental se parezca a la sintomatología de deficiencia de un micronutriente, también que haya deficiencia de dos o más micronutrientes a la vez y que se enmascaren los síntomas. Por eso es necesario además de monitorear el lote y observar el síntoma, corroborarlo con el análisis químico de suelo y/o planta. En el cuadro 1 se presentan síntomas característicos de deficiencia de micronutrientes que presentaron respuesta en los rendimientos cuando se aplicaron como fertilizantes en el cultivo de soja.

Cuadro 1: síntomas de deficiencias de micronutrientes

BORO	<ul style="list-style-type: none"> -reducción del sistema radicular -se afectan los puntos de crecimiento, las hojas nuevas se deforman y arrugan. Se pueden engrosar y tomar color azulado oscuro. Puede haber muerte de hojas. -reducción del número+ de granos -Porción terminal de la planta presentando ligera atrofia o deformación
CINC	<ul style="list-style-type: none"> -Los folíolos tienen menor tamaño, aparecen áreas cloróticas entre las nervaduras y síntomas severos en las hojas basales. -Acotamiento de entrenudos -Escasa producción de vainas
MANGANESO	<ul style="list-style-type: none"> -Clorosis internerval que se inicia en hojas nuevas. Se tornan verde y amarillo pálido, pero las nervaduras permanecen verdes y resaltadas -Ramas finas y menor crecimiento de la planta.
MOLIBDENO	<ul style="list-style-type: none"> -Plantas jóvenes verde claro. -amarillamiento general y falta de crecimiento de la planta. -Pequeñas manchas blanquecinas en las nervaduras de las hojas viejas. -achaparramiento, pérdida de vigor generalizado. -Encurvamiento o doblamiento del limbo en la extremidad de la hoja a lo largo de la nervadura.

Fuente: compilación en base a información de varios autores

En soja se ha reportado respuesta principalmente cuando se fertilizó con B, Zn, Mn y Co-Mo. Respecto de Mn se encontró respuesta en dos de cuatro experimentos, tres realizados en las EEA INTA Oliveros y uno en la EEA INTA Marcos Juárez, (Gráfico 1) (Salvagiotti 2014).

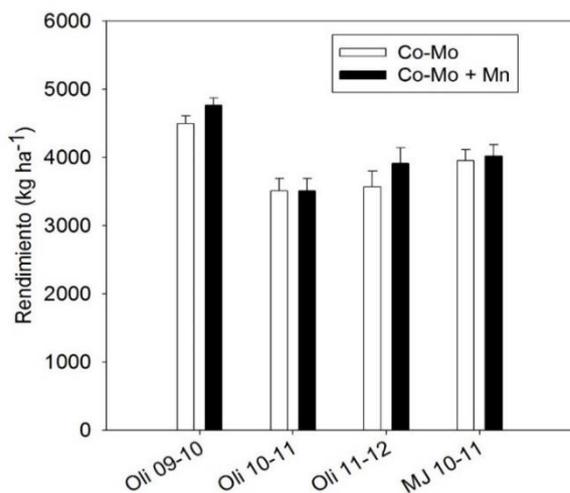


Gráfico 1-Rendimiento de soja en respuesta a la aplicación de Mn en el estadio de V5

Un metaanálisis realizado a partir de resultados obtenidos en las experimentales de INTA Oliveros, Balcarce, Pergamino y Marcos Juárez, donde se evaluaba el efecto puro de Zn, B y Co-Mo se puede observar en los gráficos 2, 3 y 4 respectivamente (Salvagiotti 2014).

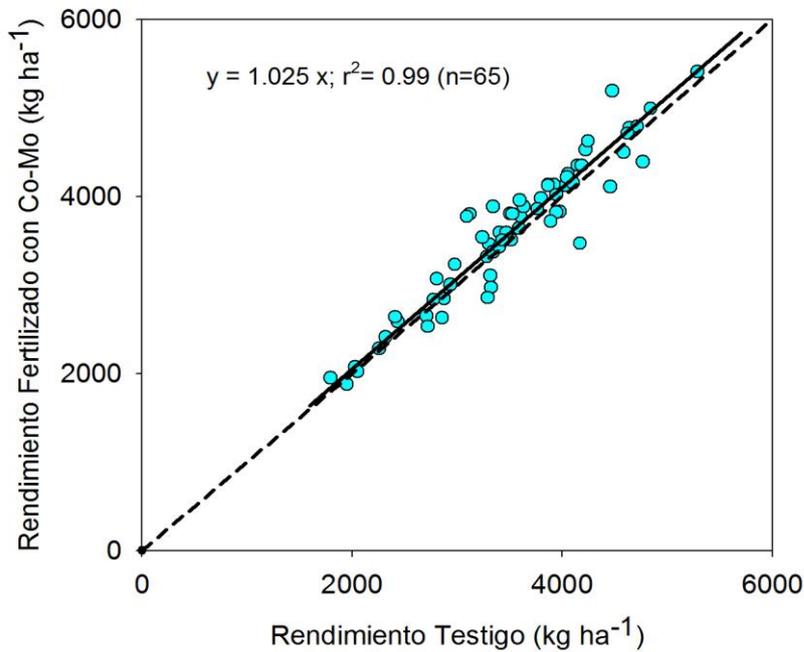


Gráfico 2 – Relación entre los rendimientos observados en los tratamientos testigo (Sin aplicación de Co-Mo) y el rendimiento observado en tratamientos que recibieron fertilización con Co-Mo.

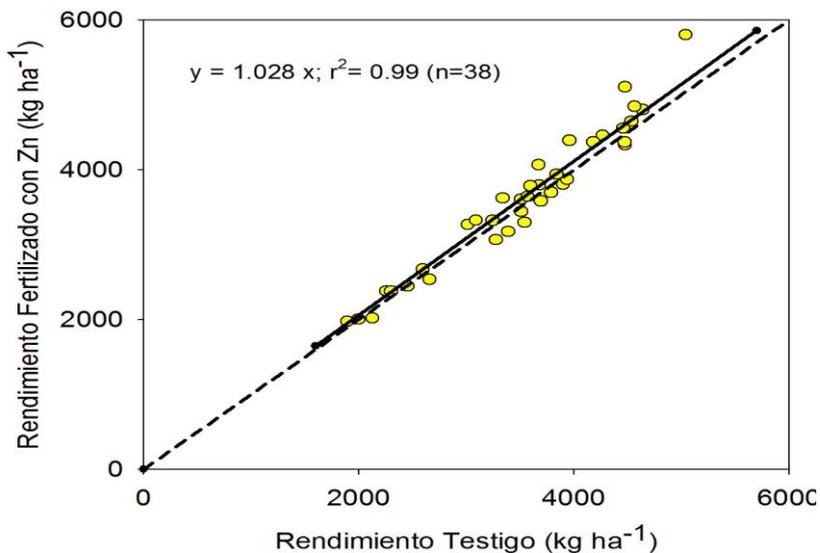


Gráfico 3 – Relación entre los rendimientos observados en los tratamientos testigo (Sin aplicación de Zn) y el rendimiento observado en tratamientos que recibieron fertilización con Zn.

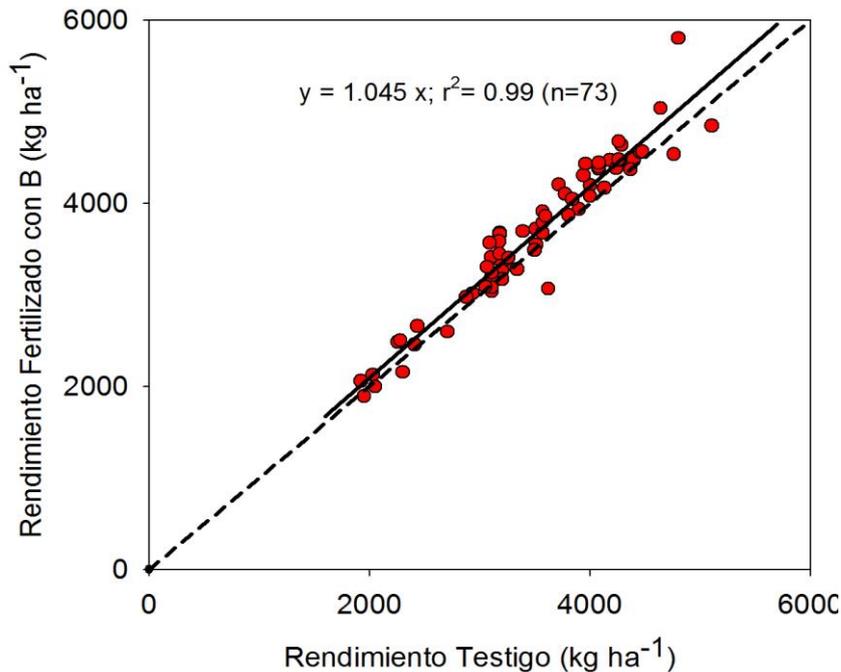


Gráfico 4 – Relación entre los rendimientos observados en los tratamientos testigo (Sin aplicación de B) y el rendimiento observado en tratamientos que recibieron fertilización con B.

Por la aplicación de Co-Mo en promedio se incrementó el rendimiento en un 2,5 % (Gráfico 2). Cuando se evaluó el Zn se observó una mejora del rendimiento que alcanzó el 2,8 % (Gráfico 3), mientras que con B el incremento fue del 4,5 %, (Gráfico 4).

En el cuadro 2 se muestran los rangos de niveles críticos de micronutrientes en el suelo, compilación de Sims y Johnson (1991), y los principales factores que afectan su disponibilidad. En la tabla 3 el valor crítico y rango de suficiencia para planta de soja según varios autores (Garcia y Ciampitti, 2009).

Cuadro 2. Concentración crítica de micronutrientes en suelos (Sims y Johnson, 1991)

MICRONUTRIENTE	FACTORES DE IMPORTANCIA	METODO	RANGO DE NIVEL CRITICO mg/kg
Boro	Rendimiento: pH, humedad del suelo, textura, MO	agua caliente	0.1 - 2
Manganeso	pH, textura, MO, presencia de CO ₃ de Ca	Melich 1 Melich 3 DTPA	5-10 4-8 1-5
Molibdeno	pH, cultivo	Oxalato de amonio pH 3	0,1-0,3
Cinc	pH, P, MO, presencia de CO ₃ de Ca, porcentaje de arcilla, CIC	Melich 1 Melich 3 DTPA	0,5-3 1-2 0,2 - 2

Cuadro 3. Concentración crítica de nutrientes en hoja en el cultivo de soja. Muestreo en floración (R1-R2) del primer trifolio maduro excluyendo el peciolo. (adaptado de Garcia y Ciampitti, 2009)

NUTRIENTE	EMBRAPA 1998	Martins (1998) 3600 kg/ha	Flannery-7963 kg/ha
	mg/kg		
Boro	21-55	51	46
Zinc	21-50	45	48
Manganeso	21-100	35	30
Molibdeno	1-5	-	-

Experiencias en INTA Marcos Juárez

En la EEA INTA Marcos Juárez se realizaron distintas experiencias de fertilización en el cultivo de soja con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de micronutrientes.

EXPERIENCIA 1 -evaluación del efecto de la aplicación de Co-Mo junto a la semilla con y sin inoculación.

EXPERIENCIA 2 -evaluación del efecto de la aplicación de Co, Mo y B en el cultivo de soja.

Las anteriores experiencias se realizaron en un mismo lote con las siguientes características:

Suelo: Argiudol típico. Serie Marcos Juárez

Años de agricultura: 18

Secuencia de cultivos: Trigo/Soja-Maíz-Soja

Cultivo antecesor: Soja

Resultados Experiencia 1

Cuadro 4. Análisis de suelo previo a la siembra

Prof. (cm)	% M.O.	PH	% Nt	P disp. Ppm	S-SO ₄ ppm	Zn ppm	Bo ppm	Co (ppm)	Mo (ppm)
0-18	2.32	5.8	0.116	21.6	10.6	0.82	0.85	0.18	0.11

Se observa en el cuadro que los valores de Zn, B y Mo estuvieron dentro del rango de valores que son considerados críticos para el cultivo. Las condiciones de disponibilidad hídrica durante el periodo reproductivo fueron buenas. En el cuadro 5 se muestran los tratamientos evaluados y rendimientos obtenidos.

Hubo diferencias significativas entre los tratamientos (test LSD de Fisher al 5%). Se puede observar un efecto significativo del Co-Mo cuando se aplicó en semilla que también fue inoculada. La inoculación no fue efectiva cuando no fue acompañada del tratamiento con Co-Mo. Los valores de Mo en el análisis de suelo estuvieron en el rango donde es posible esperar respuesta en los rendimientos por su aplicación.

Cuadro 5. Tratamientos evaluados y rendimientos obtenidos (Experiencia 1).

Tratamiento	Rto. soja (kg.ha ⁻¹)
4 = Inoculado y fertilizado (semillas tratadas con Co-Mo y con inoculante)	4364.00 a
3 = Fertilizado (semilla tratada con Co-Mo y sin inoculantes)	4225.75 a b
2 = Inoculado (semillas sin fertilizantes y con inoculantes)	4119.00 b c
1 = Testigo (semillas sin fertilizantes ni inoculantes)	4063.75 c

Coefficiente de variación: 2.33. Medias con una letra común no son significativamente diferentes

Resultados Experiencia 2

Análisis de suelo previo a la siembra: ídem experiencia 1. Los valores de Zn, B y Mo estuvieron dentro del rango de valores que son considerados críticos para el cultivo.

Las condiciones de disponibilidad hídrica durante el periodo reproductivo fueron buenas. En el cuadro 6 se muestran los tratamientos evaluados y rendimientos obtenidos.

No hubo diferencias entre los tratamientos que se compararon con el test LSD de Fisher al 5%

Cuadro 6. Tratamientos evaluados y rendimientos obtenidos (Experiencia 2)

Tratamiento	Rto. soja (kg.ha ⁻¹)
T2 = Co-Mo 120 cc/ha	3999.25
T3 = Co-Mo 120 cc/ha + Boro 1 l / ha R1	4108.00
T1 = Testigo	4158.00
T4 = Co-Mo 120 cc/ha + Boro 2 l / ha R1	4158.25

Coefficiente de variación: 2.88. Sin diferencias significativas entre tratamientos

EXPERIENCIA 3-

Evaluación del efecto sobre el rendimiento del cultivo de soja de la aplicación de:

Co- Mo en semilla, combinado con aplicaciones foliares de manganeso Mn, Zn y B, en un lote de producción de la EEA INTA Marcos Juárez con las siguientes características:

Suelo: Argiudol típico. Serie Marcos Juárez

Años de agricultura: 23

Secuencia de cultivos: Trigo/Soja-Maíz-Soja

Cultivo antecesor: trigo-Soja

Resultados Experiencia 3

En el cuadro 7 se presentan los valores de los análisis de suelo previo a la siembra

Cuadro 7. Análisis de suelo previo a la siembra 0-18 cm de profundidad

Prof. (cm)	% M.O.	PH	P disp. ppm	S-SO ₄ ppm	Zn ppm	Bo ppm	Mn ppm
0-18	2.77	6	31	7.7	0.67	0.58	92

Se observa en el cuadro que los valores de Zn y B estuvieron en el rango considerado disponibilidad crítica. Los valores de Mn al momento de la siembra fueron altos, fuera del rango considerado crítico. Hubo diferencias entre los tratamientos que se compararon con el test LSD de Fisher al 8,61 % (Cuadro 8). La disponibilidad hídrica, considerando precipitaciones y agua útil en el suelo al momento de la siembra fue de 599 mm. De todos modos, el periodo entre R5 y R 6.5 fue de escasas precipitaciones. El rendimiento promedio del ensayo fue de 4087 Kg. ha⁻¹, el cual se puede considerar bueno, aunque pudo haber sido afectado por las bajas precipitaciones durante el periodo de llenado de granos.

Cuadro 8. Tratamientos evaluados y rendimientos obtenidos. (Experiencia 3).

Tratamiento en semilla	Tratamientos foliares	Rto. soja (kg.ha ⁻¹)
T6= 70 mm CoMo	500 cc Boro en R1-R2	4307 a
T4= 70 mm CoMo	300 cc Cinc en V5-V6	4281 a
T8= 70 mm CoMo	300 cc Cinc en V5-V6 +500 cc Boro en R1-R2	4183 ab
T5= 70 mm CoMo	600 cc Manganeso en V5-V6 + 300 cc Cinc en V5-V6	4116 ab
T9= 70 mm CoMo	600 cc Manganeso + 300 cc Cinc en V5-V6 + 500 cc Boro en R1-R2	4031 ab
T3= 70 mm CoMo	600 cc Manganeso en V5-V6	4022 ab
T1= Testigo	Sin aplicar	3955 b
T2= 70 mm CoMo	Sin aplicar	3949 b
T7= 70 mm CoMo	600 cc Manganeso + 500 cc Boro en R1-R2	3936 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes

El test muestra algunas diferencias significativas. El tratamiento 4 de CoMo en semilla combinado con una aplicación foliar de Zn en V5, y el tratamiento 6 de CoMo en semilla combinado con una aplicación foliar de B en R2, se diferenciaron significativamente del testigo.

EXPERIENCIA 4

Evaluación del impacto en rendimiento de diferentes productos fertilizantes igualando dosis de P. En el cuadro 9 se muestran las características generales del sitio don se realizó la experiencia

Cuadro 9. Características generales y manejo en cada sitio experimental

SITIO	Marcos Juárez
CARACTERISTICAS	
Tipo de suelo	Argiudol Típico Clase I - Serie Marcos Juárez
Años de agricultura	30
Años en Siembra Directa	18
Antecesor	Maíz
Fecha de implantación	11-10-2017
Variedad utilizada	DM 40R16 STS
Densidad	27 semillas/m lineal a52,5cm entre hileras
Materia orgánica (%)	2,85
pH (1:2,5)	5,9
N-Nitratos (ppm)	15,2
P (Bray I) (ppm)	22,2
S-Sulfatos (ppm)	20,9
Zinc (ppm)	0,81

Los resultados del análisis de suelo observados en el cuadro 9 indicaron valores de fósforo y azufre por encima del nivel crítico donde habría posibilidad de encontrar respuesta en los rendimientos por la fertilización con productos que contengan estos nutrientes. Tampoco hubo respuesta a la aplicación de Zn si bien el análisis de suelo determinó un valor donde sería esperable obtener respuesta en el rendimiento por la fertilización con este nutriente. Los tratamientos y valores de rendimientos obtenidos se pueden observar en el cuadro 10. El análisis estadístico no determinó diferencias significativas.

Cuadro 10. Tratamientos evaluados y rendimientos obtenidos (Experiencia 4).

TRATAMIENTOS	Rto. soja (kg.ha ⁻¹)
100 kg/ha Súper-Triple (20 P)	5250 a
220 kg/ha Arrancador SSP (20 P + 26.4 S)	5327 a
100 kg/ha Arrancador MicroEssentialsS9 (10 N+ 20 P + 9 S)	5198 a
118 kg/ha Arrancador MicroEssentialsZn (14 N + 20 P + 11,8 S + 1,18 ZN)	5162 a
TESTIGO	4976 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

EXPERIENCIA 5

Efectos de la reposición de nutrientes sobre los rendimientos en la secuencia maíz-trigo/soja.

Desde el ciclo 1999-2000, en el área de la Agencia de Extensión de Corral de Bustos, EEA INTA Marcos Juárez se condujeron dos experiencias con diferentes alternativas de fertilización en la secuencia maíz-trigo/soja con todos los cultivos implantados bajo SD. Los lotes donde se realizaron las experiencias están ubicados en los establecimientos “Don Osvaldo” (DO) y “Los Chañaritos” (LCH) en las zonas rurales de Camilo Aldao y Corral de Bustos, provincia de Córdoba, respectivamente. Los suelos son Argiudoles típicos de la serie Hansen (INTA, 1985). Al inicio de la experiencia, DO tenía una historia agrícola de 31 años de agricultura continua con sólo dos pasturas en los últimos 100 años, 2,4 % de MO y 8 mg.kg⁻¹ de P extractable (Pe) hasta 18 cm de profundidad. El pH del suelo era 6,1 y 6,2 de 0-5 cm y 5-18 cm de profundidad, respectivamente. Por otro lado, LCH contaba con 12 años de agricultura continua (AC), 3,12 % MO y 15 mg.kg⁻¹ de Pe. El pH del suelo era 6,2 y 6,25 de 0-5 cm y 5-18 cm de profundidad, respectivamente. Es necesario aclarar que LCH, además de la mejor condición inicial de suelo del sitio, presentó napas de agua a escasa profundidad, de donde las raíces de los cultivos pudieron haberse abastecido de agua en periodos secos. En cambio, en el sitio DO las napas estaban a mayor profundidad fuera del alcance de las raíces. Los experimentos se realizaron a campo en franjas contiguas y cada tratamiento tuvo una superficie de 6300 m² en DO y 3600 m² en LCH.

Los tratamientos que se evaluaron fueron los siguientes:

- 1) testigo sin fertilizar (T)
- 2) azufre (S)
- 3) nitrógeno (N)
- 4) nitrógeno + fósforo (NP)
- 5) nitrógeno + fósforo + azufre (NPS) (para estos tratamientos se utilizó la dosis que utiliza el productor medio de la zona que en promedio fue de 80 kg. ha⁻¹ de N, 17 kg.ha⁻¹ de P y 15 kg.ha⁻¹ de S, para maíz, y 80 kg.ha⁻¹ de N, 21 kg.ha⁻¹ de P y 14 kg.ha⁻¹ de S, para trigo/soja)
- 6) nitrógeno + fósforo + azufre de reposición (NPSr) (se reponen el nitrógeno, fósforo y azufre que se llevan los granos con la cosecha)
- 7) NPSr + micronutrientes (NPSrm) (igual al tratamiento 6, más reposición de zinc y boro).

La determinación de la dosis de reposición se realizó en función de un rendimiento objetivo definido para cada cultivo y de los requerimientos por tonelada de grano de cada uno de ellos, utilizando el valor referenciado por el Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (García & Correndo, 2016). Se consideró que un 60% del N de la soja proviene de la fijación biológica, según lo evaluado por Salvagiotti et al. (2015).

En el gráfico 5 se muestran los rendimientos promedios de cada tratamiento para el cultivo soja en cada sitio en el periodo evaluado.

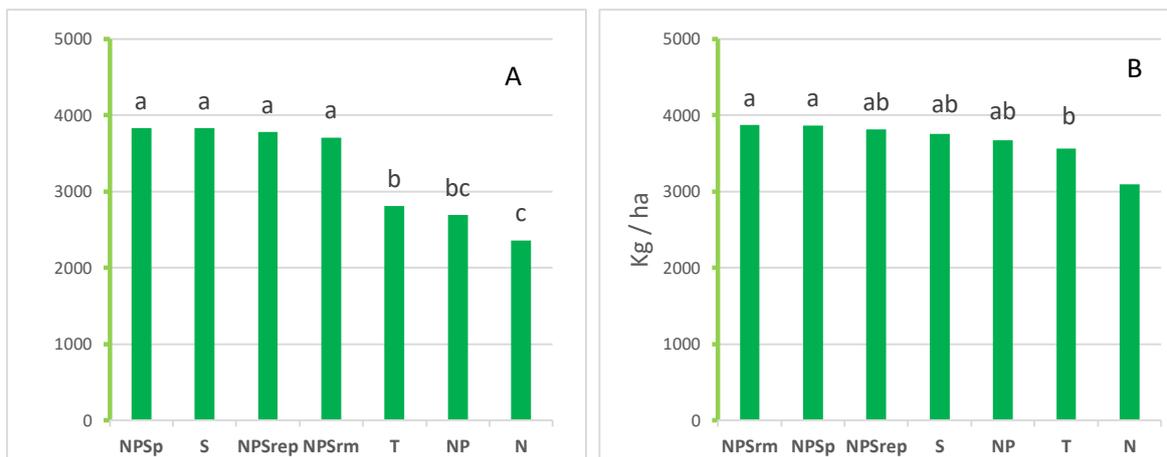


Gráfico 5. Rendimiento promedio del cultivo de soja A): Don Osvlado y B): Los Chañaritos, periodo 1999/2000-2016/2017. T: testigo sin fertilizar; S: azufre; N: nitrógeno; NP: N+ fósforo; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Ídem NPSr + reposición de micronutrientes.

En DO (gráfico 5a) la única respuesta que se observa es por la aplicación de azufre, obteniéndose un plus de rendimiento del 36,3% al comparar S con T. No existen diferencias en los tratamientos que incluyen azufre entre los nutrientes aplicados. Se manifestó una marcada limitación de azufre disponible en el sistema, el trigo utilizó el poco, azufre disponible, induciendo a una mayor deficiencia de este nutriente, que se acentuó cuando sólo se fertilizó con nitrógeno.

En LCH (gráfico 5b), Las diferencias de rendimientos entre tratamientos fertilizados respecto del testigo sin fertilizar no son significativas excepto cuando se compara el testigo con los tratamientos NPSrm o NPSp, aunque no se manifiestan diferencias entre estos y NPSr, S o NP. No es muy clara la respuesta. Todo indica que, al ser un lote con menos años de agricultura, más rico en MO, y con mayor posibilidad de ofrecer azufre disponible permite que no sea aún deficitario este nutriente para el cultivo. Se observó una depresión del rendimiento cuando solo se fertiliza con N pudiendo suponer el efecto negativo sobre la fijación biológica de este nutriente cuando no se aplica conjuntamente con azufre o fósforo o fósforo + azufre.

En ambos sitios la falta de respuesta a la aplicación de micronutrientes en soja, NPSr versus NPSrm, se podría explicar porque los valores de los mismos en el suelo; al final de la experiencia, estuvieron por encima de los considerados críticos $0,6 \text{ mg.kg}^{-1}$ para B (Reussi Calvo, Unidad Integrada Balcarce EEA INTA-FCA UNMP, comunicación personal) y 1 mg.kg^{-1} para Zn (Barbieri et al. 2015).

Consideraciones finales

-Previo a la decisión de fertilización con micronutrientes deben estar resueltos otros factores de manejo como el control de plagas y malezas, la fertilización con macronutrientes, la elección de variedad adecuada etc. de forma de hacer un uso eficiente del agua para apuntar a obtener altos rendimientos.

-Resuelto lo anterior, si el análisis de una muestra de suelo del lote nos indica valores dentro del rango considerado crítico, es posible tener respuesta en el rendimiento del cultivo por la fertilización con micronutrientes.

-Si bien, según información internacional, el rango de valores críticos es amplio, nuestra experiencia local nos indica que es más factible obtener respuesta por la fertilización con B y Zn cuando los valores de estos nutrientes en el suelo previo a la siembra son menores a $0,6 \text{ g.kg}^{-1}$ y 1 g.kg^{-1} respectivamente.

-La observación y monitoreo del cultivo es un factor importante a considerar en el diagnóstico de fertilización, más aún en el caso de los micronutrientes donde no hay suficiente información local para la definición del mismo.

Bibliografía consultada

Fancelli A. y Vázquez, M. Micronutrientes en la fisiología de las plantas. 2006. En Micronutrientes en la agricultura 1° Edición. Editora Mabel Vázquez.

García F y Ciampitti I. La nutrición del cultivo de soja. 2009. Manual de manejo del cultivo de soja. Instituto Internacional de Nutrición de Plantas.

Gudelj V.J.; H. Ghío; O. Gudelj; C. Lorenzon; B. Conde; C. Galarza; P. Tamburrini; F. García. 2019 Efectos de la reposición de nutrientes sobre los rendimientos en la secuencia maíz-trigo/soja. Simposio de Fertilidad 2019. Mayo 2019, Rosario.

Salvagiotti F. 2014. Respuesta a la fertilización y requerimientos de micronutrientes en cultivos de la región pampeana. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca 5 al 9 de mayo de 2014.

Secretaría de Agroindustria 2019, Series históricas.

Torri S.I.; S. Urricariet; R. Lavado. Micronutrientes y elementos traza. 2014. En Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA. Editores Hernán Echeverría y Fernando García