

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE CALIZA Y AZUFRE  
EN CULTIVO DE SOJA**

**por**

Mauro MANSILLA

Santiago UTEDA

TESIS presentada como uno de los requisitos para  
la obtención del título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO

URUGUAY

2022

Tesis aprobada por:

Director:

---

Ing. Agr. Mónica Barbazán

---

Ing. Agr. Omar Casanova

---

Ing. Agr. Andrés Quincke

---

Ing. Agr. Amabelia del Pino

Fecha: 25 de mayo 2022

Autores:

---

Mauro Mansilla

---

Santiago Uteda

## AGRADECIMIENTOS

Para Mónica Barbazán, Omar Casanova, Lucia Rocha y todos los que colaboraron de alguna manera en la realización de este trabajo.

A Stephanie Colombo, y el personal de Biblioteca, quiénes con dedicación y agilidad nos ayudaron en la finalización de la misma.

A nuestras familias y amigos por su constante estímulo y apoyo durante toda nuestra carrera universitaria.

Y a todas las personas que conocimos durante todos estos años de carrera y que nos acompañaron en este lindo viaje.

## Tabla de contenido

<u>PÁGINA DE APROBACIÓN .....</u>	<u>ii</u>
<u>AGRADECIMIENTOS.....</u>	<u>iii</u>
<u>TABLA DE CUADROS.....</u>	<u>VI</u>
<u>TABLA DE FIGURAS.....</u>	<u>VII</u>
<u>1. INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>1</u>
<u>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</u>	<u>6</u>
2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CULTIVO DE SOJA .....	6
2.2. CONDICIONES AMBIENTALES .....	7
<u>2.2.1. Azufre.....</u>	<u>8</u>
<u>2.2.2. Acidez del suelo .....</u>	<u>15</u>
<u>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</u>	<u>21</u>
3.1. SUELO .....	21
3.2. PRECIPITACIONES.....	22
3.3. MANEJO DEL EXPERIMENTO.....	22
3.4. TRATAMIENTOS APLICADOS .....	22
3.5. MUESTREOS Y DETERMINACIONES ANALÍTICAS.....	24
<u>3.5.1. Muestreo de suelo.....</u>	<u>24</u>
<u>3.5.2. Muestreo de planta.....</u>	<u>24</u>
<u>3.5.3. Muestreo de grano .....</u>	<u>25</u>
<u>3.5.4. Análisis estadístico.....</u>	<u>25</u>
<u>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</u>	<u>27</u>
4.1. EFECTO DEL ENCALADO Y S EN EL CULTIVO.....	28
4.2. EFECTO DEL ENCALADO EN EL pH DEL SUELO .....	33

4.3. RELACIÓN ENTRE EL pH y EI RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE SOJA.....	35
4.4. RELACIÓN ENTRE ESTRATOS DE RENDIMIENTO, CONCENTRACIÓN DE N Y S Y pH EN EL SUELO DURANTE EL CICLO DEL CULTIVO.....	36
4.5. INTEGRACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS.....	39
<u>5. CONCLUSIONES .....</u>	<u>43</u>
<u>6. RESUMEN.....</u>	<u>44</u>
<u>7. SUMMARY .....</u>	<u>46</u>
<u>8. BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>47</u>
<u>9. ANEXOS.....</u>	<u>54</u>

## TABLA DE CUADROS

Cuadro N.º .....	Página
1. Concentraciones suficientes de nutrientes en hojas de soja según distintos autores (adaptado de Melgar et al., 2011). .....	13
2. Características químicas y físicas del suelo de 0 a 20 cm .....	21
3. Tratamientos por unidad experimental. ....	23
4. Rendimiento del cultivo de soja según aplicación de caliza, azufre y nitrógeno .....	30
5. Concentración de S, N y relación N/S en planta al estadio V2-V3. Muestreo realizado el 19/12/2016 (31 días pos siembra) .....	30
6. Concentración de S, N y relación N/S en planta al estadio R1-R2. Muestreo realizado el 21/1/2017 (64 días pos siembra) .....	31
7. Concentración de S, N y relación N/S al estadio R6- R7. Muestreo realizado el 22/2/2017 (96 días pos siembra) .....	32
8. Concentración de S en grano de soja, según caliza y dosis de S .....	33
9. Evolución del pH del suelo medido en agua, previo a la aplicación de caliza y a los 29, 62 y 126 días posteriores a la aplicación, según dosis de caliza .....	34
10. Concentración de N y S, relación N/S en R1-R2 y pH en el suelo según estrato de rendimiento .....	37
11. Incrementos de rendimiento en grano por al agregado de S respecto al tratamiento control, y valores promedio de pH y de MO en esos estratos .....	42

**TABLA DE FIGURAS**

Figura N.º .....	Página
1. Precipitaciones durante el período en estudio y datos promedios de 44 años .....	27
2. Rendimiento en grano del cultivo en función del pH del suelo luego de 62 días de aplicada la caliza .....	35
3. Rendimiento en grano del cultivo en función del pH del suelo luego de 126 días de aplicada la caliza .....	36
4. Rendimiento relativo en función del pH del suelo, medido en agua, de estudios realizados por Bordoli y Casanova (2004).....	40
5. Rendimiento relativo según el nivel de sulfato en el suelo en estudios realizados por García et al. 2017.....	41

## **1. INTRODUCCIÓN**

El cultivo de soja [*Glycine max. (L.)*] es actualmente uno de los principales cultivos de verano en Uruguay. De ocupar unas 12 mil hectáreas en el año 2000 pasó a más de un millón (1.140.000 ha) en 2016, convirtiéndose en el cultivo sembrado más rentable (MGAP. DIEA, 2014). Pese a este notorio aumento en el área de siembra, el rendimiento promedio general se ha mantenido en el entorno de los 2000 kg/ha de grano (MGAP. DIEA, 2014), con variaciones temporales y espaciales asociadas, entre otros, a factores de manejo y/o ambientales. Entre estos factores se encuentran el manejo de nutrientes y la acidez del suelo (Bordoli et al., 2012). Dentro de los nutrientes, el fósforo (P) ha sido el que se ha aplicado con más frecuencia, aunque recientemente en los programas de fertilización se ha incorporado también el potasio (K). Sin embargo, todavía hay otros nutrientes que continuamente están siendo removidos del suelo y que, si no son repuestos, podrían llegar a limitar la producción, tanto de soja como de otros cultivos en el mediano y largo plazo (Bordoli et al., 2012). Uno de esos nutrientes es el azufre (S), un elemento esencial para las plantas, por lo que su deficiencia tiene un efecto negativo en la productividad de los cultivos (Marschner y Clarkson, 1995). A nivel mundial los reportes de deficiencias de S han ido aumentando (Scherer, 2001). Por ejemplo, en algunas zonas de Argentina se han observado deficiencias de S e incluso de micronutrientes, fundamentalmente a partir de la intensificación de la agricultura (mayores rendimientos y reducción de períodos bajo pastura) ocurrida en los últimos años (García, 2005).

En Uruguay varios estudios muestran que el S es otro de los elementos a considerar en el manejo de nutrientes de los cultivos (Morón y Baethgen, 1996, Mazzilli y Hoffman, 2010,

García Lamothe et al., 2017). En un relevamiento nutricional de maíz, Morón y Baethgen (1996) observaron que en los sistemas de producción más extractivos (corte para fardos, ensilaje) ubicados en la principal cuenca lechera del país (San José, Colonia y Canelones) el 30 % de los cultivos presentaban niveles de S en planta por debajo del límite inferior del rango óptimo (1,3 g S/kg de tejido seco, es decir, 0,13% de S) en la hoja opuesta a la mazorca en floración, mientras que un 30 % adicional se situó apenas por encima de ese límite. En el mismo relevamiento pero en suelos de la zona de Young, de menor intensidad agrícola que los anteriores, la mayoría de los niveles de S en planta se situaron dentro del rango óptimo según los límites inferiores citados (1,3 o 1,5 g S/kg de tejido seco, o sea entre 0,13 y 0,15% de S).

En un trabajo comparando fuentes de N en colza, Mazzilli y Hoffman (2010) atribuyeron la respuesta encontrada a la aplicación de sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), al aporte de S que realiza esta fuente. Más recientemente, en un experimento realizado en soja sobre Argiudoles típicos del sudoeste del país durante seis zafras (2006-2007 a 2011-2012), en suelos con un contenido de carbono orgánico de entre 1,7 y 2,2 % y con varios años de agricultura, García Lamothe, et al. (2017) observaron una tendencia de respuesta positiva al agregado de S, aunque solo en dos de los 13 sitios encontraron diferencias significativas en rendimiento. Las diferencias entre tratamientos fueron en promedio 11 kg de grano / kg de S aplicado para la dosis de 30 kg/ha y 18 kg de grano/kg de S aplicado para la dosis de 15 kg/ha de S.

Otro factor que podría estar afectando el rendimiento del cultivo es la acidez del suelo, ya que esta puede afectar directa o indirectamente la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo de las plantas. El proceso de acidificación de los suelos en Uruguay ha sido mencionado

recientemente por varios autores (Morón y Quincke, 2010; García Lamothe et al., 2010, Bordoli et al. 2013, Beretta et al., 2019).

Morón y Quincke (2010) informaron que en suelos bajo agricultura de la Zona Suroeste, el pH era 50% y 31% menor que los mismos suelos sin historia agrícola (bajo alambrados), a la profundidad de 0-7.5 y 7.5-15 cm.

Bordoli et al. (2013), relevando 214 cultivos comerciales de soja distribuidos por todo el país encontraron que el 34% de los sitios presentaban pH por debajo de 5,3.

Beretta et al. (2019) han sugerido que, de seguir aumentando la acidificación de los suelos, se vería limitada la producción de los cultivos en general. A su vez, sostienen que de continuar este proceso de acidificación de suelos, este problema limitaría la productividad de los suelos, independientemente de las limitantes hídricas.

Según Morón (2005), el cultivo de soja crece bien hasta un pH mínimo de 5,3. Por debajo de este valor es esperable que se encuentren problemas de absorción de nutrientes y, por lo tanto, un menor rendimiento.

Sin embargo, en cultivos agrícolas la corrección de la acidez del suelo mediante encalado es una práctica que ha recibido escasa atención en el país. Los primeros estudios realizados para corregir la acidez en soja corresponden a fines de la década de los 70 y principios de la de los 80. Docampo et al. (1981) en la zafra da 1979-1980, instalaron un ensayo para evaluar respuesta en soja al agregado de caliza en dos suelos ácidos de Tacuarembó. Las dosis de caliza agregadas en ese estudio fueron 0, 1500 y 3000 kg/ha. En uno de los suelos encontraron respuesta significativa con el agregado de 1500 kg/ha de caliza, el cual rindió 500 kg/ha más que el testigo. Si bien en el segundo sitio no hubo respuesta significativa estadística, los tratamientos con 1500

kg/ha de caliza tuvieron rendimientos 300 kg/ha más de grano que el testigo. Si se tiene en cuenta que en general los rendimientos promedios fueron bajos por un efecto año (1196 kg/ha promedio de los dos testigos), hubo aproximadamente un 25% de aumento de rendimiento atribuido al agregado de caliza. En la zafra siguiente (1980-1981), Colombo y Collares (1982) instalaron un ensayo similar, con las mismas dosis de caliza, también en dos suelos ácidos de pH inicial 4,8 y 4,0, respectivamente. En este caso no hubo respuesta significativa a ninguno de los tratamientos de caliza. Los autores adjudican la falta de respuesta a que en esta zafra no ocurrieron deficiencias hídricas, a diferencia del año anterior durante el experimento de Docampo et al. (1981). En estos mismos suelos, Pereira et al. (1983) estudió la respuesta al agregado de caliza y al agregado de P realizando un experimento además, para estudiar el efecto de la residualidad de la caliza aplicada el año anterior. Concluyeron que el nivel intermedio de caliza (1500 kg/ha) sería suficiente para eliminar el efecto tóxico del aluminio (Al), logrando incrementos en rendimiento del orden del 16% para el primer año y del 9% para el segundo. Todos estos trabajos coinciden en que el agregado de caliza para estos suelos tiene una tendencia a aumentar los rendimientos, aunque no siempre se observaron diferencias estadísticas respecto al testigo. Además, coinciden en que mejora la expansión radicular del cultivo volviéndolo más tolerante a situaciones de estrés hídrico.

Por otro lado, Giménez y Urrestarazú (1979) instalaron un experimento en el departamento de Tacuarembó, manejando dos criterios de encalado: una dosis menor, calculada a partir de la determinación del Al intercambiable, multiplicada por un factor empírico de 1,5), y la otra hasta neutralizar la acidez titulable (la dosis más alta). Encontraron respuesta en producción de materia seca del cultivo y rendimiento para la dosis más alta de caliza (calculada

para neutralizar la acidez titulable del suelo), mientras que para la dosis más baja no hubo respuesta ni en materia seca producida ni en rendimiento en grano, sin embargo observaron mayor contenido de P en planta. Estos trabajos fueron resumidos por Bordoli y Casanova (2004).

Los objetivos de este trabajo fueron: a) estudiar la respuesta del cultivo de soja al encalado y al agregado de S; y b) determinar el efecto del agregado de caliza agrícola en el pH del suelo.

Las hipótesis planteadas fueron que el encalado aumenta el pH del suelo y por ello se favorece el rendimiento en grano y la absorción de S por el cultivo de soja.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CULTIVO DE SOJA**

Dentro de las características generales del cultivo de soja se destaca su sistema radicular, compuesto principalmente por raíces secundarias, ramificadas y de distribución lateral (Evans y Kamprath, 1970), que serían las encargadas de la exploración de nuevas zonas del suelo (Venturi y Amaducci, citados por Andrade et al., 2000).

Por otro lado, el tallo presenta consistencia leñosa, con forma cilíndrica, y con una longitud de 15 a 200 cm. Por lo general, el hábito de crecimiento es erecto, pudiéndose encontrar, además, formas semipostradas y postradas. Las hojas en el cultivo de soja se caracterizan por ser compuestas (trifoliadas), alternas y dispuestas de manera dística. Las flores son frecuentemente pequeñas, de color blanco o púrpura, y se sitúan en las axilas de las hojas. Los frutos tienen forma de vaina cubiertas de pelos, que contienen de dos a tres semillas, aunque a veces presentan hasta cuatro. Las semillas son de color amarillo (diversas tonalidades), aunque también pueden ser verdes, negras, castañas, pardo-amarillentas o mezcla de colores. La forma es variable pero generalmente son ovaladas y de superficie lisa (Merino Jiménez, 2006).

Una de las características fisiológicas más importantes de la soja es su respuesta al fotoperíodo. El crecimiento y desarrollo de este cultivo depende fundamentalmente de la duración del día, lo cual determina su altura y la duración del ciclo. Para que una planta de soja pase de su fase vegetativa a su fase reproductiva, es necesario que la duración del día sea más corta que su fotoperíodo crítico, que no es más que el período de luz más largo bajo el cual la planta puede florecer (Farías, 1995).

## 2.2. CONDICIONES AMBIENTALES

En relación a las condiciones de temperatura en la que el cultivo puede cultivarse, se destaca su adaptación a un amplio rango de temperatura, siendo el óptimo el situado entre los 20 y 30° C.

La soja tiene altos requerimientos hídricos durante su ciclo para formar materia seca, y un período de bajos requerimientos durante la etapa de maduración, principalmente en el momento de la cosecha (Cunori, 1).

Las plantas que se adaptan a grandes cantidades de agua durante el período vegetativo desarrollan grandes áreas foliares. En caso de un posterior déficit hídrico, estas plantas pueden ser más afectadas que las que tuvieron una privación inicial de agua (Sylvester, 2001).

La soja tiene dos períodos críticos definidos por sus requerimientos hídricos, desde la siembra hasta la germinación, y durante la formación y desarrollo de los órganos reproductores. Durante la etapa de germinación, tanto el déficit como el exceso hídrico son perjudiciales para el proceso de crecimiento. Durante este período, el exceso de agua es mucho más perjudicial que el déficit hídrico (Salinas et al., 1989).

La soja puede, además, tolerar períodos cortos de estrés hídrico debido a sus raíces profundas y su período de floración relativamente largo (Mota, 1983). Tiene cierta plasticidad, y la caída de las primeras flores y frutos puede compensarse con flores que se forman más tarde, en condiciones de humedad.

Para poder germinar, una semilla de soja debe absorber alrededor del 50% de su peso seco como agua, de lo contrario, la germinación se retrasará y puede morir. Durante este período, tanto la deficiencia como el exceso de humedad perjudican la obtención de una base uniforme, y con un buen número de plantas por unidad de superficie.

Respecto al N, el aporte vía Fijación Biológica (FBN) generalmente es suficiente y la fertilización no es necesaria en la mayoría de las situaciones. Es fundamental asegurar la nodulación y sobrevivencia de rizobios mediante una correcta inoculación. Se ha estimado que la extracción de N que realiza un cultivo de soja, dependiendo de su rendimiento, es de 48-54 kg N/tonelada de grano (Marschner y Clarkson, 1995, Morón, 2007, Correndo y García, 2012).

El pH óptimo para la especie se encontraría por debajo del rango de 6-7 (Vázquez, 2007). Dentro de las leguminosas, la soja fue considerada de mediana a baja sensibilidad a la acidez (Evans y Kamprath, 1970). Sin embargo, el nivel crítico de pH informado por diferentes autores es muy variable. Posiblemente esto esté relacionado con otras propiedades del suelo, como los niveles de Al y Mn (Rhoads y Manning, 1989), el contenido de materia orgánica (MO) y, particularmente, el material genético utilizado (Rosolem, 1984, Bordoli y Casanova, 2004).

### 2.2.1. Azufre

El S es un elemento esencial para plantas y animales, considerado un macronutriente secundario junto al Magnesio (Mg) y al Calcio (Ca). Tiene un rol como estimulador de la FBN y participa en la síntesis proteica. El S forma parte de la proteína vegetal y se ha encontrado que la proporción N/S en la proteína vegetal es del orden de 12-15/1 para una variedad relativamente grande de cultivos (trigo, maíz, leguminosas). Es un elemento relativamente inmóvil en las plantas, por lo cual los síntomas de deficiencias aparecen primero en las hojas más jóvenes, manifestándose como clorosis (color verde pálido a amarillo). Las plantas deficientes en S presentan un menor tamaño y un crecimiento más lento, aunque los síntomas son difíciles de diferenciar, por su similitud con los de N (hojas jóvenes cloróticas, disminución de FBN).

La extracción de S en grano es de 3 kg S por tonelada de grano de soja (con 13% de humedad) (Correndo y García, 2012).

La concentración de proteína en grano está directamente relacionada con la absorción de N y S durante el ciclo del cultivo y los rendimientos alcanzados por este. En concordancia con esto, Ferraris et al. (2015), en un ensayo realizado en Pergamino (Argentina), concluyeron que en soja el nivel de estos nutrientes son claves para la concreción del rendimiento y, a partir de ahí, determinan su concentración en grano. La relación entre concentración de proteína y rendimiento fue ajustada según una función cuadrática. En bajos rendimientos se observó una relación contraria rendimiento-proteína, hasta un nivel medio en el cual el N deja de ser eficiente para producir rendimiento y comienza a incrementar la concentración de proteína en los granos. De acuerdo a García Lamothe et al. (2017), cuando el S va alcanzando grados de deficiencia, puede que, aun sin traducirse en una disminución de los rendimientos, se dé la formación deficiente de proteína y la acumulación de N no proteico (aminas, amidas, nitratos, etc.).

En el suelo, el S se puede encontrar en forma orgánica e inorgánica. Las formas orgánicas constituyen el 90 % del S del suelo, dentro de las cuales muchos de los compuestos orgánicos de S no han sido identificados. Según los reactivos utilizados en su separación o en relación a los grupos de compuestos azufrados atacados por los reactivos, las formas orgánicas de S en el suelo se pueden clasificar en tres grupos, S orgánico no unido directamente al C (C-O-S) 50 % del S orgánico total, S orgánico directamente unido al C (C-S) 10-30 % aminoácidos que contienen S (metionina, cisteína), y S orgánico inerte, muy estable 30-40 % (Rabuffetti, 2017). Mediante el proceso de mineralización el S presente en las fracciones orgánicas se transforman en  $\text{SO}_4^{2-}$  biodisponibles para las plantas. Esta se da de dos maneras; por mineralización biológica

(microorganismos de la MO) y por mineralización bioquímica (enlace tipo éster: C-O-S / enzima sulfatasa). La mineralización bioquímica, implica la liberación de  $\text{SO}_4^{2-}$  desde el pool de sulfato-ésteres a través de una hidrólisis enzimática. La arilsulfatasa es la principal enzima catalizadora en suelos. La biomineralización de S depende de la demanda de C por parte de los microorganismos para proporcionar energía para su crecimiento, liberando  $\text{SO}_4^{2-}$  como subproducto de la oxidación de C a  $\text{CO}_2$ . Este proceso está afectado por la temperatura, la composición de los restos, los efectos de la rizósfera y el manejo del suelo (Rabuffetti, 2017).

Dentro de las formas inorgánicas, se encuentra el sulfato inorgánico o ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en tres formas distintas: en la solución del suelo, adsorbido o precipitado como sales.

El sulfato en solución constituye entre el 1 y el 10 % del S total del suelo, y llega a la raíz por medio de difusión o flujo masal. En suelos de zonas templadas, la presencia del sulfato en solución es variable, dependiendo de la mineralización de la MO y de las condiciones climáticas imperantes en los diferentes períodos del año.

Si bien el sulfato es un anión, los suelos tienen capacidad de retenerlo con cierta energía (a diferencia de los nitratos), y este sulfato es llamado “sulfato adsorbido”. Esta forma de sulfato se encuentra en mayor proporción en suelos con altos contenidos de óxidos de hierro (Fe) e hidróxidos de Al, en suelos con altos niveles de caolinita y en suelos de bajo pH (Rabuffetti, 2017).

En el mercado hay una variada oferta de distintas fuentes de S, con distintas características. Además se pueden combinar en distinta relación N, P, K y S fuentes líquidas y sólidas, algunas de ellas con marcadas diferencia en solubilidad (Melgar y Torres Duggan, 2005).

Algunos de estos son: Sulfato de Amonio con 24% de S, Sulfato de K con 18 % S, Sulfato de K-Mg con un 22 % S, Yeso agrícola con un 12 a 18 % S, Sulfato de Mg con un 14% S, S de mina con un 33% de S superfosfato simple con 12 % de S y el superfosfato triple, con < 2 % de S (Neira, 1986, Valverde et al., 1998, Oyarzún et al., 2002). Las fuentes solubles tienen S en forma de sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), mientras que en las fuentes insolubles el S existe en forma elemental ( $\text{S}_0$ ). Entre las fuentes líquidas, se encuentra una mezcla de urea-nitrato de amonio (UAN) y tiosulfato de amonio (TSA), que se aplica al suelo para producir proporciones iguales de S y sulfato elementales. Por su parte, el fertilizante de S elemental es un fertilizante apto para la producción orgánica por su origen natural, y por su efecto acidificante, también puede ser utilizado en suelos sódicos para bajar su pH (Carciochi et al., 2016.)

En Uruguay la importancia del S en la producción de cultivos es cada vez más reconocida. En los últimos años, las deficiencias de este nutriente se han vuelto más frecuentes. Morón y Baethgen (1996) observaron que bajo sistemas de producción extractivos (corte para fardos, ensilaje), el 30 % de los cultivos de maíz presentaba niveles de S en planta deficientes (menor a 1,3 g S/ kg de materia seca) y solo un 30 % presentaba niveles suficientes. Posteriormente, estudiando la respuesta al S en trigo con laboreo convencional y siembra directa, se encontró que en un 20 % de los casos hubo respuesta en rendimiento al agregado de S (García Lamothe, 2002).

En el caso de Uruguay, la expansión del cultivo de soja y la intensificación agrícola podrían generar una menor capacidad de aporte de S del suelo (García Lamothe y Quincke, 2011), por lo cual el rendimiento del cultivo de soja podría verse limitado por la baja disponibilidad del S.

En términos generales, los suelos de texturas arenosas y de bajo contenido de MO tienen menos capacidad de mantener el suministro de S a las plantas. Por ello, es de esperar que los suelos sometidos a la misma intensidad de producción que otros suelos más pesados presenten antes deficiencias de S. Sin embargo, incluso en suelos con alto contenido de MO, el proceso de mineralización puede no ser lo suficientemente rápido como para cubrir los requerimientos de S de un cultivo (Zamalvide, 1995).

Dentro de las herramientas de diagnóstico de deficiencias de S, está el análisis de tejido vegetal. Según Fontavine et al. (1996) un rango considerado como crítico sería de 0,14 a 0,20 % para sojas fertilizadas, como concentración de S en hoja en R5. Por otro lado, Cordone y Martínez (2004) determinaron concentraciones de S en hoja de 0,16 y 0,28 % para tratamientos testigos y fertilizados, respectivamente.

En un relevamiento del estado nutricional en soja realizado en Uruguay en las zafra 2009-2010 a 2011-2012, se encontró que el valor promedio de la concentración de S en hoja más pecíolo de 214 cultivos comerciales de soja en R1-R2 fue de 0,31 %, con un valor mínimo de 0,19 % y un valor máximo de 1,76 % (Bordoli et al., 2013). Estos autores concluyeron que, según el nivel crítico de 0,20% que se maneja para este cultivo (Reuter y Robinson, 1986), la mayoría de las chacras relevadas no presentaban deficiencias de S.

El cuadro 1 muestra niveles críticos de nutrientes en hojas de soja en floración reportados por diferentes autores. La información de EMBRAPA (2018) es orientativa para zonas de producción de soja de Brasil. Los datos de Martins (citado por Yamada, 1999) corresponden a la media de sitio de la zona de los Cerrados de Brasil con producción promedio superior a 3600

kg/ha. Los datos de Flannery (1989) corresponden a parcelas de alto rendimiento (7963 kg/ha) en EE.UU. Se incluyen, además, los valores observados para la región pampeana para un rendimiento promedio de 3900 kg/ha (Melgar et al., 2003) y los valores registrados para la zona núcleo de Argentina, para un rendimiento mayor a 3978 kg/ha (Arévalo, 2015).

Cuadro 1. Concentraciones suficientes de nutrientes en hojas de soja según distintos autores (adaptado de Melgar et al., 2011).

Elemento	Embrapa (1998)	Martins (1999)	Flannery (1989)	Melgar et al (2003)	Argentina- zona núcleo(2014)
			%		
N	4,5-5,5	4,64±3,7	5,33	5,55±1,4	3,1 -5,1
P	0,26-0,5	0,25±0,3	0,36	0,5±0,1	0,18- 0,76
K	1,71-2,5	1,87±2,4	2,19	2,7±0,5	> 1,8
Ca	0,36-2	0,79±1,7	1,02	0,34±0,1	0,9 - 1,65
Mg	0,26-1	0,33±0,6	0,33	0,33±0,1	0,27 - 0,5
S	0,21-0,4	0,25±0,3	0,24	0,9±0,2	0,15 - 0,55
			mg kg <sup>-1</sup>		
Mn	21-100	35±12	30	82±20	33-90
Fe	51-350	100±34	144	11±3	55 - 155
B	21-55	51±10	46	37±8	65 - 460
Cu	6,0-14	8±1,8	12	143±35	6,0 - 34
Zn	21-50	45±10	48	48±18	25 - 80

Fuente: Arévalo (2015).

Otra herramienta de diagnóstico de suficiencia de S es el análisis de suelo para estimar la disponibilidad de S (como S-SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>). Este indicador tiene generalmente baja capacidad predictiva, lo que hace difícil estimar un nivel crítico confiable. Sin embargo, según Núñez (2015), las situaciones con mayor probabilidad de respuesta a la fertilización azufrada corresponden a suelos con menos de 10 mg/kg de S-SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, donde se esperan altos rendimientos con buena disponibilidad hídrica o condiciones de suelos con baja capacidad de aporte de S

(arenosos, de pobre fertilidad natural) (Núñez et al., 2015). Por otro lado, aunque hay varios métodos de extracción del  $S-SO_4^{-2}$ , los más usados a nivel local son el fosfato de calcio y el cloruro de calcio.

En INIA la Estanzuela en experimentos de respuesta a S en soja para suelos agrícolas del litoral sur de Uruguay se encontró que en ocho experimentos, las respuestas fueron bajas y no significativas (con un máximo de respuesta de 250 kg/ha de grano) a pesar de que en el 88% de los sitios presentaron niveles de  $S-SO_4^{-2}$  en suelo fueron inferiores a 5 mg/kg (Morón, 2005).

También existiría mayor probabilidad de respuesta en situaciones con prolongada historia agrícola, en suelos que han perdido MO, luego de barbechos prolongados o en chacras compactadas. La dosis recomendada es de 10-15 kg S/ha con una eficiencia esperada de 11 a 23,5 kg de grano por kg de S (Núñez et al., 2015). Otros autores han propuesto usar indicadores indirectos de la disponibilidad de S en el suelo. Barbazán et al. (2007) sugieren que el valor de MO del suelo podría ser un buen indicador de la disponibilidad de S, sin embargo la disponibilidad del mismo está muy afectada por los procesos de mineralización y fijación de la MO.

Por otro lado, se ha estudiado la relación del S con la eficiencia de uso del N en varios cultivos, donde la mejor eficiencia se obtiene cuando el S no es limitante. Por ejemplo, en colza, Ferreira y Ernst (2014) desarrollaron un índice de nutrición de S (INS) en estudios realizados tanto en chacras comerciales del litoral oeste de Uruguay como en condiciones controladas de invernadero. Estos autores sugieren que si el INS es mayor a 0,74 o la cantidad de S absorbida hasta C1 (estado fisiológico del cultivo que determina el fin de la etapa vegetativa e inicio de la reproductiva) es mayor a 6 kg/ha, se puede considerar que el nivel de S no está siendo un factor

limitante para alcanzar el rango de rendimiento máximo. Además ajustaron curvas de dilución para N y para S, y encontraron que el rendimiento de aceite del grano de colza estaba influenciado con la relación S/N en planta. Los tratamientos con relación S/N menor a 0,13 en C1 no lograron alcanzar valores máximos en contenido relativo de aceite por grano. Sin embargo estos mismos autores sugieren que lo que más impacta en la producción de aceite por unidad de superficie es el rendimiento total en grano. Della Santa Pernas et al. (2018) concuerdan con lo propuesto por Ferreira y Ernst (2014) en que cuando el S es limitante no se logra alcanzar niveles óptimos en el uso del N. Estos autores, trabajando en chacras de alta productividad, sugieren que la cantidad de S absorbida por el cultivo de colza a C1 debe ser de 7 kg/ha para que este nutriente no sea considerado limitante. Por otro lado, Rodríguez y Seco (2019) constataron en cebada una respuesta positiva al agregado de S, siendo la eficiencia de uso del S en promedio 80 kg grano/ kg de S agregado, y una respuesta de 1229 kg/ha de grano en los tratamientos con S respecto al resto sin S.

### 2.2.2. Acidez del suelo

Los suelos ácidos se caracterizan por tener un bajo contenido de bases o por la presencia de ciertos elementos en concentraciones tóxicas para las plantas, tales como Al intercambiable y manganeso (Mn) (Rabuffetti, 2017).

La acidez se clasifica como acidez activa (que son los iones  $H^+$  presentes en la solución del suelo y es medida a través del pH (logaritmo negativo de la concentración de  $H^+$ ) y se conoce como factor intensidad) y acidez potencial (que representa la capacidad del suelo de oponerse a un cambio de pH). Químicamente es la cantidad de acidez que el suelo libera cuando se agrega

una base fuerte para subir el pH hasta un valor determinado (ej. hasta pH 7). Se mide a través de la titulación y se conoce como factor capacidad. En la práctica la acidez potencial es llamada acidez titulable y es la suma de la acidez intercambiable más la no intercambiable. La intercambiable es la suma de  $H^+$  y  $Al^3$  ocupando posiciones de intercambio al pH del suelo, y este generalmente existe en suelos con  $pH < 5,2$ . La acidez no intercambiable corresponde a las cargas que se disocian al aumentar el pH (MO, bordes de arcillas, polímeros de Al) (Rabuffetti, 2017).

La acidez de un suelo se atribuye a varios procesos, como la lixiviación de bases, la formación de ácidos solubles (como ácido carbónico,  $H_2CO_3$ ) y otros ácidos, la acción de microorganismos, la liberación de protones ( $H^+$ ), la absorción de cationes por las raíces de las plantas, la disociación de  $H^+$  por los coloides del suelo e hidrólisis del Al durante la meteorización de aluminosilicatos (Rabuffetti, 2017).

El pasaje de amonio a nitrato por los microorganismos del suelo libera  $H^+$  al medio, y su impacto en la acidez del suelo depende de la capacidad que tenga el suelo de *bufferear* el pH y de la frecuencia y cantidad de fertilizante utilizado (Perdomo et al., 2013). Recientemente, se han informado casos de acidificación de suelos generados por el uso de agricultura continua, con altas y frecuentes dosis de fertilizantes nitrogenados amoniacales (García Lamothe et al., 2010, Bordoli et al., 2013, Beretta et al., 2019).

Por lo general, los efectos directos o daños por la acidez en sí misma no cobran mayor importancia, ya que las plantas poseen resistencia a pH bajos. Entre los efectos indirectos de la acidez se destaca la toxicidad por Al o Mn. El Al afecta la división celular en el ápice de la raíz,

aumenta la rigidez de las membranas celulares, reduce la replicación del ADN, interfiere con los procesos donde interviene adenosín trifosfato (ATP) y con la absorción y transporte de otros nutrientes (Ca, Mg, K, P, Fe, entre otros). La toxicidad por Al se manifiesta en un desarrollo radicular reducido, con presencia de raíces cortas y deformes, que absorben menos nutrientes y agua. Por otro lado, un exceso de Mn afecta la actividad enzimática y la síntesis de hormonas. También interfiere en la translocación del Ca y del Mg. A diferencia del Al, los síntomas de toxicidad por Mn son más claros en la parte aérea que en las raíces. Se produce clorosis y necrosis en las hojas, especialmente en las hojas nuevas. Los síntomas de toxicidad por Mn son más claros que los de Al, pero muchas veces son simultáneos (Casanova, 1999).

Otro efecto indirecto es la retención de nutrientes, como por ejemplo del P, que se asocia a compuestos de Fe y Al en condiciones de pH ácido, y no queda disponible para las plantas. Además se afecta la absorción de nutrientes como, por ejemplo, de Ca y de Mg. Se produce inhibición de actividad de biomasa microbiana y, como consecuencia, un enlentecimiento en la mineralización de MO, así como una menor disponibilidad de nutrientes.

Asimismo, influye en el proceso de nitrificación, ya que afecta a los microorganismos que realizan este proceso.

La acidez afecta la FBN, debido a que las bacterias del género *Rhizobium* son susceptibles a pH bajo, por lo que la acidez tiene más incidencia en la nodulación que en la fijación de N en sí misma.

El pH tiene un efecto importante en el rendimiento de las leguminosas, ya que condiciona la nodulación. Según Kamprath y Foy (1971), el desarrollo de las bacterias fijadoras de N, *Rhizobium*, está estrechamente relacionado al grado de acidez del suelo. De acuerdo a Munns

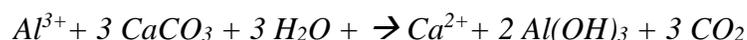
(1968), por debajo de pH 4,5 no se encontró formación de nódulos en plantas de alfalfa. Kamprat y Foy (1971) concluyeron que las máximas cantidades de nódulos se producen cuando el pH en la solución del suelo tiende a ser mayor de 5,5. Estos autores demostraron que una alta concentración del ion  $H^+$  tiene un efecto perjudicial en el crecimiento y supervivencia de *Rhizobium* y también en el inicio de la nodulación. Como consecuencia, la capacidad de fijación de N se ve afectada.

Dentro de las leguminosas la soja es considerada de mediana a baja sensibilidad a la acidez (Evans y Kamprath, 1970). Sin embargo, el nivel óptimo de pH señalado por diferentes autores es muy variable (5,0 y 6,5) y posiblemente esté relacionado con otras propiedades edáficas como los niveles de Al y Mn (Rhoads y Manning, 1989), el contenido de MO y, particularmente, el material genético utilizado (Rosolem, 1984, Bordoli y Casanova, 2004).

Weisz et al. (2003) verificaron aumentos de rendimiento hasta valores de pH 6,0 en suelos de Carolina del Norte en EE. UU.; Pierce y Warncke (2000) señalaron un valor crítico de 5,9 en suelos de Michigan, por debajo del cual habría respuesta al encalado; Bell (citado por Vázquez et al., 2012) sugirió que dicho valor es 5,1 en suelos de Louisiana de alta meteorización, mientras que Caires et al. (1998) no obtuvieron respuesta aun con niveles de pH de 4,5 y 32 % de saturación de bases en Brasil. Estos datos sugieren que el pH puede tener resultados distintos en diferentes tipos de suelos y sistemas productivos, mostrando lo inconveniente de la extrapolación de niveles críticos para la especie. Si bien la soja es de las leguminosas la más tolerante a la acidez, en el país se encontró que en pH mayores los rendimientos eran mayores (Bordoli et al., 2012).

Una de las técnicas agronómicas para aumentar el pH de los suelos y neutralizar el Al intercambiable o el Mn soluble es la práctica del encalado, que además puede proveer Ca y Mg para las plantas.

Cuando se agrega un material calcáreo a un suelo ácido, se produce una reacción de neutralización, cuya fórmula clásica es:



El  $CaCO_3$  (insoluble) se va disolviendo lentamente en agua, produciendo  $HCO_3^-$  (bicarbonato), luego  $H_2CO_3$  (ácido carbónico) y finalmente  $CO_2$ , que se libera a la atmósfera. Los  $OH^-$  reaccionan con los  $H^+$  (provenientes de la hidrólisis del Al intercambiable, MO, etc.) formando agua. El Ca sustituye al  $H^+$  presente en el complejo de intercambio catiónico. Si hay Al en forma intercambiable, se forma hidróxido de Aluminio, que precipita.

Coleman y Thomas (1967) señalan que el grado con que un material calcáreo reacciona con el suelo depende del tamaño de sus partículas, del grado de contacto entre la caliza y el suelo y de las características del suelo.

Jackson (1967) sostiene que el grado de humedad del suelo tiene importancia en la velocidad de reacción del material calcáreo aplicado.

En Uruguay, en un trabajo realizado sobre un Luvisol arenoso franco de Tacuarembó, Bordoli y Casanova (2004) midieron la evolución del pH en agua y  $Al^{3+}$  intercambiable durante 44 meses luego de la aplicación de diferentes dosis de caliza (0, 1500 y 4500 kg/ha). El pH del suelo mostró aumentos varios meses después de aplicado el material. El pH aumentó de 4,8 a

5,5 a los 27 meses y se mantuvo constante hasta los 44 meses en el tratamiento con 1500 kg/ha de caliza, mientras que en el tratamiento con 4500 kg/ha pasó de 5,5 a 5,8 a los dos meses y se mantuvo constante hasta los 44 meses después de aplicada la caliza.

Los materiales más usados en Uruguay para el encalado son:  $\text{CaCO}_3$  (calcita),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (cal hidratada),  $\text{CaO}$  (cal viva) y  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  (dolomita). La dolomita se utiliza cuando además de neutralizar la acidez se desea aumentar el nivel de Mg.

Dado que la caliza se obtiene de molienda de rocas calcáreas, generalmente no es una sustancia pura. La pureza es el porcentaje en peso de material neutralizante respecto al total. Por convención, el  $\text{CaCO}_3$  puro tiene el 100 % de poder neutralizante. Debido a que el Mg tiene la misma carga que el Ca, pero menor masa atómica, el poder neutralizante de una determinada masa de  $\text{MgCO}_3$  es 19 % mayor que el de la misma masa de  $\text{CaCO}_3$ . Por lo tanto, se dice que el  $\text{MgCO}_3$  tiene un poder neutralizante de 119 %. La dolomita es generalmente menos reactiva que el  $\text{CaCO}_3$ . En general, en los materiales de encalado que se utilizan, las proporciones de ambos carbonatos varían y el  $\text{MgCO}_3$  es generalmente minoritario respecto al  $\text{CaCO}_3$ .

Materiales poco molidos tardan en reaccionar e incluso pueden reaccionar solo parcialmente por no disolverse. El material bien molido asegura que la mayor parte del suelo será neutralizada (disuelto se mueve unos pocos milímetros en el suelo). Por otro lado, cuanto más fino es el material más se dificulta su aplicación. Generalmente cuanto más finamente molido más caro es el material. Se considera adecuado un material cuando más su 80 % pase la malla no. 60 (Casanova, 1999).

La reacción química se produce en presencia de agua. Por lo tanto, si el suelo no tiene niveles de humedad mínimos no se produce la reacción (Casanova, 1999).

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. SUELO**

El suelo donde se realizó el experimento corresponde a un Brunosol Subéutrico, de la Formación Libertad. Las principales características químicas y físicas del suelo correspondientes al muestreo previo a la instalación del experimento se presentan en el cuadro 2. Los análisis se realizaron en un laboratorio privado. El pH se midió por potenciometría (relación suelo/agua: 1/2,5). Los cationes intercambiables se extrajeron con acetato de amonio 1N. En el caso de sulfato, el extractante fue fosfato de calcio:  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ .

Cuadro 2. Características químicas y físicas del suelo de 0 a 20 cm

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>RESULTADOS</b>
pH (agua)		5,08
Materia Orgánica	(%)	3,8
P Bray 1	(mg/kg)	26
S-SO <sub>4</sub>	(mg/kg)	9
Arcilla	(% )	25
Arena	(%)	4
Limo	(%)	71
Cationes intercambiables		
Ca	(meq /100g)	12,0
K	(meq /100g)	1,08
Mg	(meq /100g)	4,5
Na	(meq /100g)	0,5

### **3.2. PRECIPITACIONES**

Para caracterizar las precipitaciones se utilizaron los datos de lluvia de INIA, Estación Experimental “Las Brujas” a partir de 44 años de registros.

### **3.3. MANEJO DEL EXPERIMENTO**

El ensayo se instaló en el departamento de San José, en el kilómetro 45 de la ruta 1 (34°40' 22,64"S, 56°33'51,33" O, 25 m sobre el nivel del mar), durante la zafra estival 2016-2017, posterior a un sorgo granífero.

La variedad sembrada de soja fue IPB 600, caracterizada por ser de ciclo VI corto, hábito de crecimiento indeterminado y buen comportamiento frente al vuelco. El cultivo se sembró el día 18 de noviembre de 2016 con una densidad de 85 kg/ha y una distancia entre hileras de 38 cm. Previo al cultivo, se realizó un control de malezas; el 15 de setiembre se aplicó 24D+ glifosato Dicamba. A la siembra se aplicó glifosato más Fluroxipir. En la primera etapa del cultivo dentro del ensayo se realizó control manual de malezas.

Excepto la aplicación de los tratamientos y la cosecha del experimento, el resto de las prácticas de manejo del cultivo fue realizado por el productor.

La cosecha del cultivo se realizó el 17 de abril de 2017, de forma manual.

### **3.4. TRATAMIENTOS APLICADOS**

Los tratamientos fueron tres niveles de caliza (0, 2000 y 4000 kg/ha) y tres niveles de S (0,12 y 24 kg/ha de S) con N, más un control. Las parcelas (unidades experimentales) fueron de 2 m × 4 m cada una. Como fuente de caliza se utilizó carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), que fue

aplicada el 18/10/2016, (o sea, 30 días previo a la siembra), en forma manual, al voleo en superficie, e incorporada con una rastra de disco excéntrica.

La aplicación del fertilizante azufrado se realizó el día de la siembra, al voleo y a mano. Las dosis de S fueron ajustadas usando sulfato de amonio,  $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ , que contiene 24% de S y es además una fuente soluble de S. Debido a que esta fuente contiene 21% de N, para evaluar la respuesta a S se niveló el contenido de N mediante el agregado de urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ), aplicada en forma manual, por lo cual todos los tratamientos recibieron 21 kg/ha de N). Además, se dejó un tratamiento control (sin S ni N). Por lo tanto, el experimento consistió de 12 tratamientos en 36 parcelas (cuadro 3).

Cuadro 3. Tratamientos por unidad experimental.

<b>Tratamientos</b>	<b>Caliza</b> (kg/ha)	<b>S</b> (kg/ha)	<b>N</b> (kg/ha)	<b>Fuente*</b>
1	-	0	0	-
2	-	0	21	Urea
3	-	12	21	SA y Urea
4	-	24	21	SA
5	2.000	0	0	-
6	2.000	0	21	Urea
7	2.000	12	21	SA y Urea
8	2.000	24	21	SA
9	4.000	0	0	-
10	4.000	0	21	Urea
11	4.000	12	21	SA y Urea
12	4.000	24	21	SA

\*SA: sulfato de amonio

### **3.5. MUESTREOS Y DETERMINACIONES ANALÍTICAS**

#### 3.5.1. Muestreo de suelo

Se tomaron muestras compuestas de suelo (10-12 tomas) de la profundidad de 0 a 15 cm, utilizando calador. El primer muestreo se realizó el 7 de octubre de 2016, antes de la aplicación de caliza. El siguiente el día antes a la siembra (16/11/16) y dos durante la estación de crecimiento del cultivo (19/12/2016 y el 21/02/2017).

En el muestreo previo a la siembra se tomaron muestras combinadas de los tres niveles de caliza. Durante el crecimiento del cultivo se tomaron muestras de suelos de cada dosis de caliza de los tres bloques, y el 21/02/17 se tomaron muestras por dosis de caliza de dos bloques (B1 y B3).

En todas las muestras se analizó pH en H<sub>2</sub>O y en KCl por potenciometría.

#### 3.5.2. Muestreo de planta

Durante el ciclo del cultivo se realizaron tres muestreos de plantas. Se seleccionaron 36 plantas, tomando hoja con peciolo para determinar la concentración de N y de S. Los muestreos fueron en V4-V5 (20/12/2016), V22-V30 (25/1/2017) y R4-R5 (22/2/2017).

Las muestras se secaron a 60 °C y se molieron. En el laboratorio se determinó N por el método de Kjeldahl y S por el método de EMBRAPA (EMBRAPA, 2018).

### 3.5.3. Muestreo de grano

Al momento de la cosecha se tomaron 2 metros lineales de plantas de cada una de las parcelas, cortando toda la parte entera de la planta y luego se trillaron. Se determinó el peso y humedad de los granos para estimar el rendimiento. La cosecha se realizó el 17/04/2017. Se cosechó de manera manual un área representativa de la parcela y se estimó su rendimiento llevándolo a kg/ha. Se corrigió el peso de grano por humedad tomando como porcentaje promedio de humedad un 13%

Se determinó S en grano por el método Combustión OEA (Organical Elemental Analysis).

Todos los análisis químicos fueron realizados en el laboratorio de la Facultad de Agronomía de Udelar, excepto los de S en planta y grano que fueron realizados en un laboratorio privado.

### 3.5.4. Análisis estadístico

El diseño utilizado fue el de bloques completos al azar (DBCA), con tres repeticiones. Los efectos de caliza y aplicación de S sobre el rendimiento de grano, concentración de N y S en planta y el pH del suelo fueron analizados mediante el Análisis de la Variancia (ANOVA) y modelos de regresión lineal con el software Infostat. Los valores de  $p < 0,05$  fueron considerados estadísticamente significativos.

El modelo estadístico es:

$$Y_{ijkl} = \mu + \text{Cali} + N_j + S_k + \beta_l + (\text{CalS}) + (\text{CalN}) + (\text{NS}) + (\text{CalNS}) + \epsilon_{ijkl}$$

donde:

- $y_{ijkl}$  : Es la observación
- $\mu$ : Es la media general.
- $\alpha_i$ : Es el efecto del  $i$ -ésimo tratamiento de caliza.
- $\beta_j$ : Es el efecto del  $j$ -ésimo tratamiento del N
- $\gamma_k$ : Es el efecto del  $k$ -ésimo tratamiento del S
- $\delta_l$  : Es el efecto del  $l$ -ésimo bloque.
- $\epsilon_{ijkl}$  : Es la componente del error aleatorio NID  $(0, \sigma^2)$  y  $\sum_{i=1}^t \tau_i = 0$

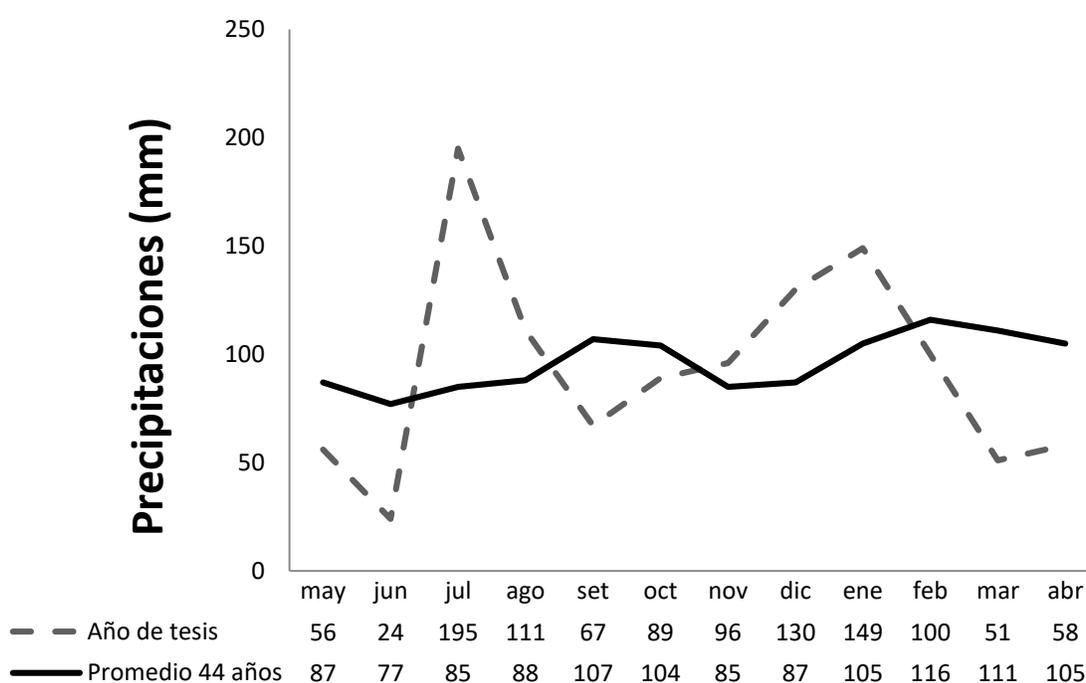
Se realizaron comparaciones de medias por Tukey y contrastes utilizando el programa Infostat.

Por último, los resultados obtenidos en el presente estudio se compararon con experimentos de respuesta a caliza y a S realizados previamente en el cultivo de soja, abarcando otras zonas del país y condiciones climáticas. La integración de este trabajo a un número mayor de experimentos similares ayudaría a profundizar en el conocimiento del efecto de otros factores de clima y suelos en los resultados obtenidos. La descripción de esos trabajos se encuentra en Bordoli y Casanova (2004) para los estudios con caliza y en Buschiazzo y Castellanos (2014) y en García Lamothe et al. (2017) para los estudios con S.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta el promedio mensual de lluvias realizado a partir de 44 años de registros de la base de datos de INIA Las Brujas y las del año en que se realizó este estudio, a partir de mayo del 2016 a mayo del 2017 (Figura 1).

Figura 1. Precipitaciones durante el período en estudio y datos promedios de 44 años



Elaborado en base a datos de INIA “Las Brujas”.

Durante el crecimiento del cultivo (16/11/2016- 17/04/2017), las lluvias fueron mayores al promedio para la zona donde se realizó el experimento (Figura 1). Si bien en la implantación del experimento hubo algún problema de déficit hídrico, durante el ciclo del cultivo no se presentaron restricciones. En general, fue un año de rendimientos altos para el cultivo de soja

en chacras comerciales. Según MGAP. DIEA (2020) el rendimiento del cultivo para la zafra 2016-2017 fue 2951 kg/ha, superior en 631 kg/ha al promedio del país desde la zafra 2012-2013 hasta la del 2019-2020.

#### **4.1. EFECTO DEL ENCALADO Y S EN EL CULTIVO**

En el cuadro 4 se presentan los resultados del rendimiento en grano del cultivo de soja según los tratamientos estudiados. El rendimiento logrado en el experimento varió entre un mínimo de 2067 y un máximo de 4789 kg/ha. El rendimiento promedio de todo el experimento fue 3661 kg/ha y estuvo por encima del promedio nacional para ese año (2951kg/ha, según MGAP.DIEA, 2020).

En los tratamientos con caliza, el rendimiento en grano fue en promedio un 19,5% mayor que el tratamiento control (3916 y 3152 kg/ha para los tratamientos con caliza y control, respectivamente). Esto concuerda con lo presentado por Bordoli y Casanova (2004), quienes encontraron que la aplicación de caliza en las dosis de 1500 y 3000 para la variedad cv Bragg en suelos del noreste del país incrementó los rendimientos entre 15 y 25 % respecto al tratamiento control.

En nuestro estudio, entre dosis de caliza no se observaron diferencias estadísticas significativas. Los tratamientos con 2000 kg/ha de caliza incrementaron el rendimiento en 952 kg/ha de grano respecto al control, con 11% de coeficiente de variación (CV), mientras que con 4000 kg/ha de caliza la diferencia con el control fue de 577 kg/ha más de grano, con un CV de 15%. Por un lado, las condiciones hídricas durante la estación del cultivo presentaron valores

por debajo del promedio en la etapa inicial (barbecho-implantación), pero superaron los valores promedio para el resto del periodo de crecimiento. Las mayores respuestas al agregado de caliza se han observado en veranos secos debido a que la misma promueve la exploración radicular. En estos casos el mayor desarrollo radicular de los tratamientos con caliza resultó en ventajas para extraer agua en mayor volumen del suelo (Docampo et al., 1981). Sin embargo, las precipitaciones en los momentos iniciales post aplicación de la caliza estuvieron por debajo del promedio histórico (Figura 1). Este período con déficit hídrico pudo haber permitido reaccionar más fácilmente a la dosis baja de caliza respecto a la dosis más alta. En el cuadro 9 se presentan los datos de evolución del pH por dosis a lo largo del tiempo, donde se observa que el tratamiento con la dosis más baja logró aumentos en el pH en períodos tempranos. A los 40 días post aplicación, si bien la diferencia no fue significativa, se logró un pH de 5,24 con una dosis de 2000 kg de caliza mientras que con la dosis de 4000 kg se logró un pH de 5,19.

El agregado de S no afectó el rendimiento del cultivo (cuadro 4). La falta de respuesta en rendimiento al agregado de S puede deberse a que el suministro de S por parte del suelo fue adecuado para el crecimiento del cultivo. Según (García Lamothe et al., 2017) la probabilidad de ocurrencia de déficit de S será mayor en suelos con bajo contenido de  $S-SO_4^{2-}$  al momento de la siembra (menor de 5 mg/ kg). El análisis de suelo previo a la instalación del cultivo (cuadro 2) dio un valor de 9 mg/ kg de  $S-SO_4$ , además de un valor de 3,8% de MO, lo cual puede haber tenido un papel importante en la mineralización del nutriente durante el periodo de cultivo. Esto puede corroborarse también en las concentraciones de S en planta, que estuvieron dentro del rango de suficiencia, que de acuerdo a Correndo y García (2012), para este cultivo en floración

(R1-R2) es de entre 0,20 y 0,60%. Puede observarse que en el tratamiento control las concentraciones fueron iguales o más bajas que en los tratamientos con aplicaciones de caliza y/o S (cuadros 5, 6 y 7).

Cuadro 4. Rendimiento del cultivo de soja según aplicación de caliza, azufre y nitrógeno

Caliza (kg/ha)	S (kg/ha)	N (kg/ha)	Rendimiento		Rendimiento Promedio	
			(kg/ha) prom	DE	(kg/ha) prom	DE
0	0	0	3363	176	3152 b	618
	0	21	3705	306		
	12	21	2269	202		
	24	21	3270	1011		
2000	0	0	4288	178	4104 a	123
	0	21	4030	378		
	12	21	4053	505		
	24	21	4043	746		
4000	0	0	3976	357	3729 ab	176
	0	21	3690	553		
	12	21	3690	890		
	24	21	3559	677		

Letras diferentes marcan diferencia estadística significativa para la variable dosis de caliza  $p < 0,05$ .

Con el agregado de S tampoco se observaron diferencias significativas entre las concentraciones de S ni entre las de N en las fechas muestreadas (cuadros 5, 6 y 7). Las mismas variaron entre 2,06 y 4,25 % de N y entre 0,16 y 0,94 % de S para todo el período del cultivo. La relación N/S se mantuvo en valores promedio de 8 para todo el periodo del cultivo.

Cuadro 5. Concentración de S, N y relación N/S en planta al estadio V2-V3. Muestreo realizado el 19/12/2016 (31 días pos siembra)

Caliza	Dosis de S (kg/ha)	Dosis de N (kg/ha)	S		N		N/S	
			prom	DE	prom	DE	prom	DE
0	0	0	0,33	0,04	2,51	0,26	7	2
	24	21	0,36	0,06	2,9	0,11	8	1
<b>promedio</b>			<b>0,35</b>	<b>0,05</b>	<b>2,71</b>	<b>0,18</b>	<b>8</b>	<b>1</b>
4000	0	0	0,24	0,03	2,57	0,32	11	0
	24	21	0,38	0,07	2,79	0,07	7	1
<b>promedio</b>			<b>0,31</b>	<b>0,05</b>	<b>2,68</b>	<b>0,19</b>	<b>9</b>	<b>1</b>

Cuadro 6. Concentración de S, N y relación N/S en planta al estadio R1-R2. Muestreo realizado el 21/1/2017 (64 días pos siembra).

Caliza	Dosis de S (kg/ha)	Dosis de N (kg/ha)	S		N		N/S	
			prom	DE	prom	DE	prom	DE
0	Control	0	0,43	0,13	3,57	0,24	8	3
	0	21	0,44	0,27	3,5	0,39	8	4
	12	21	0,4	0,05	3,43	0,23	9	1
	24	21	0,68	0,21	3,34	0,26	5	2
	<b>promedio</b>			<b>0,49</b>	<b>0,17</b>	<b>3,46</b>	<b>0,28</b>	<b>8</b>
2000	Control	0	0,35	0,14	3,92	0,29	11	4
	0	21	0,7	0,11	3,33	0,26	5	0,4
	12	21	0,41	0,18	3,73	0,09	9	3
	24	21	0,49	0,25	3,49	0,09	7	4
	<b>promedio</b>			<b>0,49</b>	<b>0,17</b>	<b>3,62</b>	<b>0,18</b>	<b>8</b>
4000	Control	0	0,94	0,04	3,64	0,55	4	2
	0	21	0,37	0,19	3,75	0,18	10	10
	12	21	0,32	0,09	3,62	0,24	11	2
	24	21	0,68	0,29	3,63	0,25	5	3
	<b>promedio</b>			<b>0,58</b>	<b>0,15</b>	<b>3,66</b>	<b>0,31</b>	<b>8</b>

Cuadro 7. Concentración de S, N y relación N/S al estadio R6- R7. Muestreo realizado el 22/2/2017 (96 días pos siembra)

Caliza	Dosis de S	Dosis de N	S		N		N/S	
			prom	DE	prom	DE	prom	DE
(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha)	(%)		(%)			
0	Control	0	0,36	0,08	3,71	0,08	10	3
	0	21	0,37	0,04	3,94	0,07	10	1
	12	21	0,52	0,24	3,69	0,06	7	4
	24	21	0,45	0,09	3,88	0,33	9	1
	<b>promedio</b>		<b>0,43</b>	<b>0,11</b>	<b>3,81</b>	<b>0,13</b>	<b>9</b>	<b>2</b>
2000	Control	0	0,43	0,02	3,83	0,24	9	1
	0	21	0,56	0,05	3,51	0,37	6	1
	12	21	0,52	0,04	3,71	0,04	7	0,4
	24	21	0,43	0,05	3,75	0,06	9	1
	<b>promedio</b>		<b>0,49</b>	<b>0,04</b>	<b>3,7</b>	<b>0,18</b>	<b>8</b>	<b>1</b>
4000	Control	0	0,39	0,08	2,86	1,13	7	2
	0	21	0,37	0	3,23	0,88	9	2
	12	21	0,42	0,12	3,74	0,19	9	3
	24	21	0,39	0,05	3,83	0,14	10	2
	<b>promedio</b>		<b>0,39</b>	<b>0,06</b>	<b>3,42</b>	<b>0,59</b>	<b>9</b>	<b>2</b>

El efecto del encalado y de la aplicación de fertilizante azufrado en la concentración de S en grano se presenta en el cuadro 8. La concentración de S en grano fue más alta en los tratamientos que recibieron S, aunque la diferencia no fue estadísticamente significativa, y a su vez, la concentración fue mayor en el tratamiento con 4000 kg/ha de caliza. Sin embargo, en los tratamientos comparando solo el efecto de la caliza (sin agregado de S) las concentraciones de S en grano fueron iguales.

Si bien el número de muestras por tratamiento no permite realizar un análisis estadístico, los resultados obtenidos concuerdan parcialmente con lo informado por Gutiérrez Boem et al. (2006), quienes en un trabajo realizado en Argentina en 20 sitios experimentales, no encontraron relación entre el contenido de S del suelo y la concentración final en grano.

Cuadro 8. Concentración de S en grano de soja, según caliza y dosis de S.

Caliza (kg/ha)	Dosis de S (kg/ha)	S en grano (%)
0	Control	0,20
	24	0,30
4000	Control	0,20
	24	0,40

#### 4.2. EFECTO DEL ENCALADO EN EL pH DEL SUELO

Para evaluar el efecto de la caliza en el pH del suelo se tomaron muestras de 0 a 20 cm en cuatro momentos diferentes (cuadro 9). Si bien se midió el pH tanto en agua como en KCl, las diferencias entre ambas medidas fueron siempre de aproximadamente una unidad, con un comportamiento similar frente al encalado, por lo que se presentan solo los datos de pH en agua.

Cuadro 9. Evolución del pH del suelo medido en agua, previo a la aplicación de caliza y a los 29, 62 y 126 días posteriores a la aplicación, según dosis de caliza

Caliza (kg/ha)	Fecha de muestreo	Momento respecto a la pH aplicación (días)	
0	7/10/2016	Previo*	5,08
	16/11/2016	29	5,19
	19/12/2016	62	5,03
	21/2/2017	126	5,25
2000	7/10/2016	Previo	5,08
	16/11/2016	29	5,24
	19/12/2016	62	5,44
	21/2/2017	126	5,54
4000	7/10/2016	Previo	5,08
	16/11/2016	29	5,19
	19/12/2016	62	5,70
	21/2/2017	126	5,68

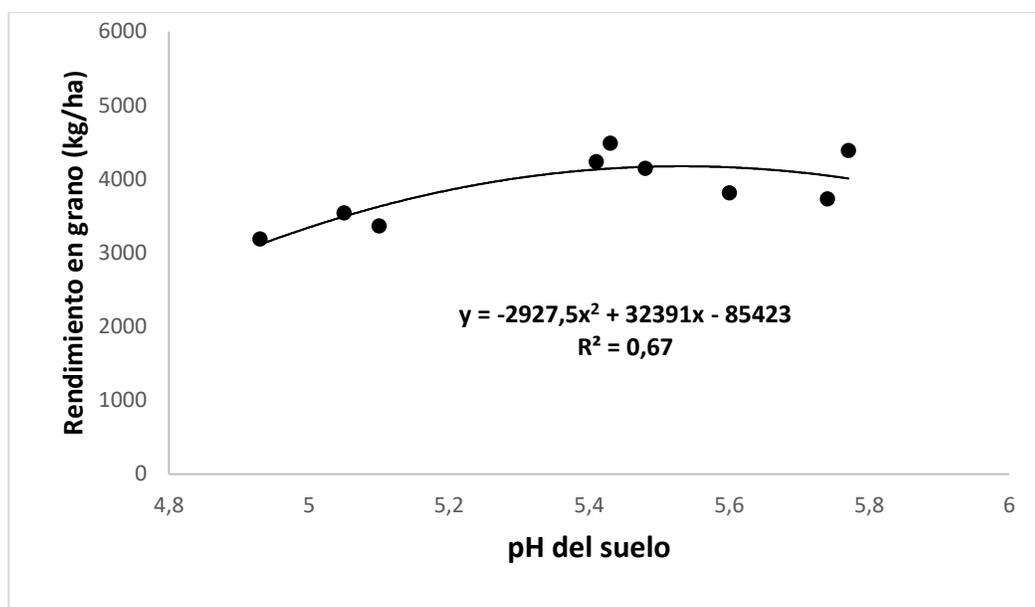
\* Previo: 10 días antes

La caliza tuvo el efecto esperado en aumentar el pH. Antes de su aplicación el pH medido en agua en el tratamiento control se situó en valores ácidos (5,08) y se mantuvo en valores menores a 5,25. Con el agregado de 2000 kg/ha de caliza y luego de 120 días de su aplicación el pH pasó de 5,08 a un valor máximo de 5,54, mientras que con la dosis de 4000 kg/ha aumentó a un máximo de 5,70 pero en la mitad del tiempo (a los 62 días). Aunque la variación en el pH no fue significativa estadísticamente (Anava en anexos) el aumento estimado de pH en los tratamientos con 2 toneladas de caliza correspondió en promedio a 0,2 unidades de pH por cada tonelada de caliza agregada, y de 0,15 unidades de pH para los tratamientos de 4 toneladas. Esto está de acuerdo con lo sugerido por Bordoli y Perdomo (2005), en donde estableció que en suelos con niveles de MO mayores a 2 % el cambio de pH es más difícil que en suelos con menor poder buffer.

### 4.3. RELACIÓN ENTRE EL pH y EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE SOJA

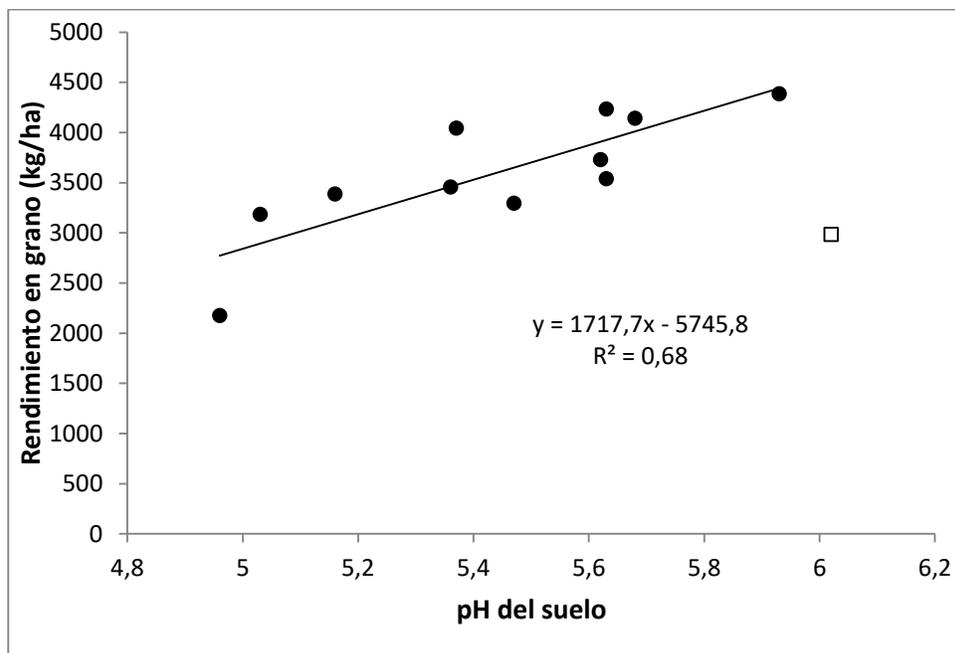
En las siguientes figuras (Figura 2 y 3) se presentan los datos de rendimiento en grano del cultivo de soja en función del pH del suelo medido en dos momentos del ciclo del cultivo: al estado de seis hojas (V5-V6) y en R1-R2, que corresponden a los 62 y 126 días posteriores a la aplicación de la caliza. Se observa un mayor rendimiento en grano cuando el pH en el suelo a los 62 días de aplicada la caliza fue mayor.

Figura 2. Rendimiento en grano del cultivo en función del pH del suelo luego de 62 días de aplicada la caliza



Aunque hay un punto que se aparta de la tendencia general, en la figura 3 se observa una mayor relación entre el rendimiento obtenido y el pH medido en febrero (126 días después de la aplicación de la caliza).

Figura 3. Rendimiento en grano del cultivo en función del pH del suelo luego de 126 días de aplicada la caliza



#### 4.4. RELACIÓN ENTRE ESTRATOS DE RENDIMIENTO, CONCENTRACIÓN DE N Y S Y pH EN EL SUELO DURANTE EL CICLO DEL CULTIVO

Para el siguiente análisis se dividieron los datos de rendimiento en tres rangos: menor a 3500 kg/ha, entre 3500 y 4000 kg/ha y más de 4000 kg/ha, independientemente de los tratamientos. Para cada estrato se calculó el rendimiento promedio y el CV. A su vez se calculó la concentración promedio de N y S y su relación, y el pH en dos momentos.

Cuadro 10. Concentración de N y S, relación N/S en R1-R2 y pH en el suelo según estrato de rendimiento

Estrato de rendimiento (kg/ha)	Rendimiento promedio kg/ha	CV (%)	N (%)	S (%)	N/S	pH Dic	pH Feb
< 3500	2874	17,3	3,51	0,57	6	5,02	5,33
3500 - 4000	3748	5,4	3,54	0,46	8	5,46	5,50
>4000	4362	4,9	3,68	0,41	9	5,52	5,74

Como se observa en el cuadro 10, en donde se logró un mayor rendimiento, el cultivo habría tenido durante R1-R2 un nivel de N en planta levemente superior (5%) que en donde los rendimientos fueron más bajos, mientras que ocurrió lo contrario con el nivel de S en planta, que fue 28% menor (comparando los estratos extremos). En consecuencia, la relación N/S fue mayor a medida que se incrementó el rendimiento. Esto puede haberse dado por una dilución del contenido de S en función de la materia seca. Probablemente, aunque no se tuvo en cuenta la producción vegetativa de los diferentes tratamientos, los que obtuvieron mayores rendimientos habrían logrado mayor producción de materia seca en etapas tempranas. Esto generó menor concentración de S y por ende menor relación N/S. Esto concuerda con lo sugerido por Reussi et al. (2012), quienes plantearon ensayos con S y N no limitantes. Sugiere que la dinámica del S es diferente a la del N para trigo, dependiendo mucho del lugar de la planta que se tome como referencia. A su vez el nivel de S (como el de otros elementos) en planta, disminuye a medida que avanza el estado fenológico y hay más acumulación de biomasa por parte del cultivo. Si se tiene en cuenta que el cultivo de soja además realiza FBN se complejiza aún más la predicción de la dinámica de estos nutrientes.

Si se comparan los valores de S y N en planta encontrados en este trabajo con los de suficiencia propuestos por autores de distintos países, se encuentra que el S estuvo dentro de los niveles de suficiencia propuestos por todos menos por Melgar et al. (2003), lo que podría justificar la falta de respuesta a la fertilización con este nutriente.

El N por otro lado, presentó valores inferiores o muy cerca de los mínimos propuestos como suficientes. Esto podría indicar que la FBN podría estar siendo limitada. Esta posible limitación de la FBN podría estar relacionada con el bajo pH, ya que la acidez del suelo afecta la disponibilidad de macro y micronutrientes (Malavolta et al., 1989), entre los cuales se encuentran el Ca y el P necesarios para el proceso de infección y formación de nuevos nódulos. A su vez, estos niveles de pH aumentan la solubilidad de metales como Al, Cu y Mn, lo que también puede afectar la sobrevivencia de *Rhizobium* en suelo (Cooper et al., 1983). Adicionalmente, los bajos pH afectan la morfología de las raíces, inhibiendo la formación de pelos radiculares por niveles bajos de Ca y altos de Al e H, lo que dificulta el proceso de infección de la planta por parte de la bacteria (Cooper y Scherer, 2012). Sin embargo estos aspectos no fueron medidos en este estudio.

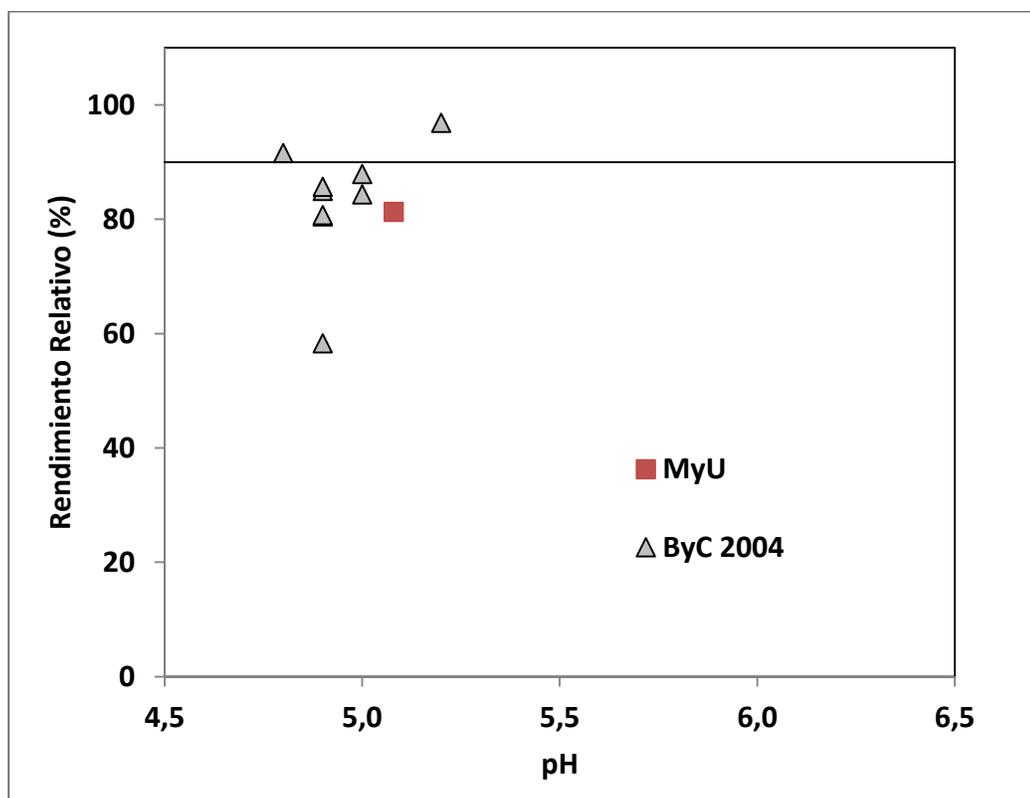
El pH del suelo en ambas fechas de muestreo (diciembre y febrero) fue mayor donde a la cosecha se observó un mayor rendimiento (0,5 y 0,4 unidades de pH). Esto pudo deberse a que si bien la soja posee mayor versatilidad en cuanto al pH del suelo que otras leguminosas, el mismo tiene un importante impacto en el rendimiento final del cultivo. Buschiazzo y Castellanos (2014) encontraron correlación positiva entre rendimiento en grano de soja y pH inicial del suelo. Bordoli et al. (2013) encontraron que el rendimiento final en grano tuvo una correlación

positiva con el pH del suelo, tendiendo a obtenerse los mayores rendimientos en valores más neutros. Por otra parte, el agregado de  $\text{CaCO}_3$  puede haber tenido influencia en la liberación de P retenido en el suelo, aunque éste no fue medido en este estudio. Este comportamiento del cultivo en relación al pH podría indicar que hubiera sido necesario aplicar la caliza más temprano para que la reacción con el suelo fuera antes del desarrollo del cultivo.

#### **4.5. INTEGRACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS**

En la Figura 4 se observa el rendimiento relativo estimado a partir del tratamiento control respecto al agregado de caliza, incluyendo los estudios realizados por Bordoli y Casanova (2004) y el presente estudio. A pH mayores a 5,1 el rendimiento del cultivo no cambia mucho cuando se aplica caliza, mientras que por debajo de ese valor se observa un menor rendimiento del tratamiento control. Esto coincide con Morón (2004) que sugirió que el cultivo de soja se comporta mejor a valores de pH superiores, y con Bordoli et al. (2013), que encontró que el cultivo presentaba menores rendimientos cuando el pH en el suelo era bajo.

Figura 4. Rendimiento relativo en función del pH del suelo, medido en agua, de estudios realizados por Bordoli y Casanova (2004).

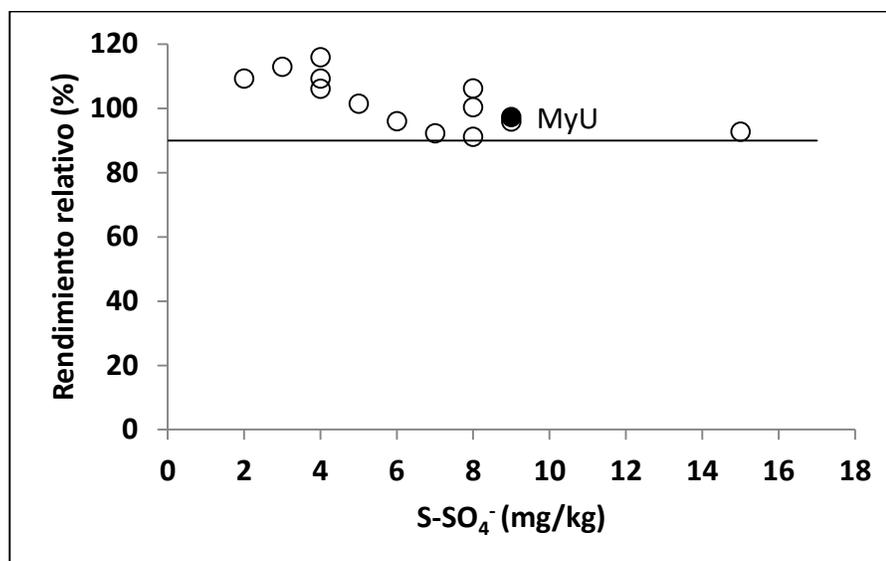


El sitio indicado como MyU corresponde al resultado obtenido en el presente estudio.

La línea horizontal indica el 90% del rendimiento relativo.

En la figura 5 se presenta el rendimiento relativo del tratamiento control expresado como porcentaje del rendimiento obtenido con una dosis promedio de 24 kg/ha de S (rendimiento relativo) en función del análisis de sulfato en el suelo, considerando los experimentos de García Lamothe et al. (2017) y el del presente trabajo, ya que en los mismos se cuenta con este análisis de suelo. Según estos resultados, el nivel de sulfato en el suelo parece tener escasa utilidad como predictor de suficiencia de S.

Figura 5. Rendimiento relativo según el nivel de sulfato en el suelo en estudios realizados por García Lamothe et al. (2017).



Se indica como MyU el valor obtenido en el presente estudio. La línea horizontal indica el 90% del rendimiento relativo.

Para profundizar en el efecto del agregado de S sobre el rendimiento del cultivo, se estudió la relación entre los incrementos en rendimientos logrados con el agregado de S por sobre el tratamiento control y algunas propiedades del suelo, como pH y MO. En este análisis de datos se incluyeron los resultados obtenidos por Buschiazzo y Castellanos (2014) y por García Lamothe et al. (2017). La fuente de S aplicada en los experimentos de Buschiazzo y Castellanos (2004) fue superfosfato común, que contiene yeso (CaSO<sub>4</sub>) y en el de García Lamothe et al. (2017) se usó yeso agrícola. En general, en sitios donde el contenido de MO y el pH fueron más altos, el agregado de S incrementó rendimiento respecto al control, pero en sitios con valores bajos de MO y de pH, el rendimiento con aplicación de S fue igual o incluso menor

que el tratamiento control (cuadro 11). Esto indicaría que otros factores, además del S (como el pH y la MO, entre otros), estarían limitando el crecimiento del cultivo. Buschiazzi y Castellanos (2014) estudió la respuesta a la aplicación de P, K y S en el cultivo de soja en siete sitios con suelos ubicados en los departamentos de Soriano, Río Negro y Paysandú. Sin embargo, no se observó respuesta al agregado de estos nutrientes. La falta de respuesta se atribuyó a otras limitantes, como el bajo pH de los suelos y el marcado déficit hídrico ocurrido durante el ciclo de crecimiento del cultivo, en los cuales probablemente se resintieron la difusión y la exploración radicular.

Cuadro 11. Incrementos de rendimiento en grano por al agregado de S respecto al tratamiento control, y valores promedio de pH y de MO en esos estratos

Incremento de rendimiento (kg/ha)	pH	MO %
< (-200)	5,19	2,85
(-100) – (-200)	5,13	2,75
(-100) – (+100)	5,26	3,09
(+100) – (+200)	5,37	3,71
> (+200)	5,44	3,34

Se incluyeron experimentos realizados por Buschiazzi y Castellanos (2014), García et al. (2017) y el presente estudio.

La extracción de S varió entre 7 y 17 kg/ha de S. Sin el agregado de S las cantidades de S extraídas por el cultivo (trat. 0N 0S) varió entre 7 y 8 kg/ha de S.

Con el agregado de 24 kg/ha de S habría un balance positivo del nutriente, donde cerca del 30% del S agregado entraría al sistema.

## **5. CONCLUSIONES**

Con respecto a la fertilización con S, no se encontraron diferencias en rendimiento a la fertilización diferencial con el nutriente. Esto pudo deberse al nivel de sulfato en el suelo (superior al sugerido como crítico), al alto valor de materia orgánica y las buenas condiciones de mineralización durante el crecimiento del cultivo.

En cuanto a la caliza, se encontraron efectos positivos de su agregado sobre el rendimiento de soja, aunque entre dosis de caliza no se encontraron diferencias estadísticas.

El pH del suelo tuvo un aumento estimado de 0,17 unidades por cada tonelada de caliza agregada. Los mayores rendimientos se lograron con pH de suelo más altos. En resumen, hubo un mejor comportamiento del cultivo de soja a mayor pH del suelo.

El agregado de caliza podría ser una alternativa viable, y además dura varios años, por lo cual esta inversión habría que amortizarla con varios cultivos dependiendo de los precios de mercado.

## **6. RESUMEN**

El cultivo de soja [*Glycine max. (L.)*] es actualmente uno de los principales cultivos de verano en Uruguay. Pese a este notorio aumento en el área de siembra, el rendimiento promedio general se ha mantenido en el entorno de los 2000 kg/ha de grano, con variaciones temporales y espaciales, asociadas a factores de manejo y/o a ambientales, entre otros. Dentro estos, se destacan el manejo de nutrientes y la acidez del suelo. Los objetivos de este trabajo fueron: a) estudiar la respuesta del cultivo de soja al encalado y al agregado de S; y b) determinar el efecto del agregado de caliza agrícola en el pH del suelo. El estudio se realizó sobre un Brunosol Subéutrico, de la Formación Libertad, en una chacra comercial. Los tratamientos fueron tres niveles de caliza (0, 2000 y 4000 kg/ha) y tres niveles de S (0,12 y 24 kg/ha de S), con y sin N. Como fuente de caliza se utilizó carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), aplicado un mes previo a la siembra, en forma manual, al voleo en superficie, e incorporada con laboreo. Las dosis de S y de N se ajustaron con sulfato de amonio y urea. Se evaluó rendimiento final en grano, evolución de pH del suelo durante el ciclo del cultivo, contenido de N y S en planta en tres estados fenológicos del cultivo y contenido de S en grano. Hubo respuesta en rendimiento en grano al agregado de caliza aunque solo hasta la dosis menor de caliza (2000 kg/ha). El incremento en rendimiento por el agregado de caliza fue de 310 kg/ha en promedio (entre 18 y 30% respecto al testigo). No se encontró respuesta al agregado de S ni en la concentración de este nutriente en planta ni en el rendimiento final. Posiblemente debido al nivel de sulfato en el suelo, al alto valor de materia orgánica y a las buenas condiciones de mineralización durante el crecimiento del cultivo. No hubo interacción caliza por S. El aumento estimado del pH del suelo fue de 0,17

unidades por cada tonelada de caliza agregada y el máximo incremento ocurrió luego de 62 días de agregada la caliza.

Palabras clave: soja, azufre, caliza, ph de suelo.

## **7. SUMMARY**

Soybean cultivation [*Glycine max.* (L.)] is currently one of the main summer crops in Uruguay. Despite this notorious increase in the sowing area, the general average yield has remained around 2000 kg/ha of grain, with temporal and spatial variations associated with management and/or environmental factors, among others. Within these, nutrient management and soil acidity stand out. The objectives of this work were: a) to study the response of the soybean crop to liming and the addition of S; and b) determine the effect of adding agricultural limestone on soil pH. The study was carried out on a Subeutric Brunosol, from the Libertad Formation, in a commercial farm. The treatments were three levels of limestone (0, 2000 and 4000 kg/ha) and three levels of S (0.12 and 24 kg/ha of S), with and without N. Calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), applied one month prior to planting, manually, broadcast on the surface, and incorporated with tillage. The doses of S and N were adjusted with ammonium sulfate and urea. Final grain yield, soil pH evolution during the crop cycle, N and S content in the plant in three phenological stages of the crop and grain S content were evaluated. There was a response in grain yield to the addition of limestone, although only up to the lowest dose of limestone (2000 kg/ha). The increase in yield due to the addition of limestone was 310 kg/ha on average (between 18 and 30% compared to the control). No response was found to the addition of S, neither in the concentration of this nutrient in the plant nor in the final yield. Possibly due to the level of sulfate in the soil, the high value of organic matter and the good mineralization conditions during crop growth. There was no limestone interaction with S. The estimated increase in soil pH was 0.17 units for each ton of limestone added and the maximum increase occurred after 62 days of limestone addition.

Keywords: soybean, sulfur, limestone, soil pH.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

1. Andrade, F. H.; Aguirrezábal, L. A. N.; Rizzalli, R. H. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Médica Panamericana. pp. 61 – 96.
2. Arévalo, E. S. 2015. Evaluación del estado nutricional del cultivo de soja en Argentina utilizando análisis foliares. Tesis Dr. La Coruña, España. Universidade da Coruña. Instituto Universitario de Xeoloxía. 123 p.
3. Barbazán, M.; Ferrando, M.; Zamalvide, J. 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay. *Agrociencia* (Uruguay). 11(1): 22 – 34.
4. Beretta, A.; Pérez, O.; Carrasco, L. 2019. Soil quality decrease over 13 years of agricultural production. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 114(1): 45 – 55.
5. Bordoli, J.; Casanova, O. 2004. Encalado de la soja en el N. E. de Uruguay. (en línea). s.n.t. s.p. Consultado mayo. 2022. Disponible en [https://dedicaciontotal.udelar.edu.uy/adjuntos/produccion/1629\\_academicas\\_academicaarchivo.pdf](https://dedicaciontotal.udelar.edu.uy/adjuntos/produccion/1629_academicas_academicaarchivo.pdf).
6. \_\_\_\_\_.; Perdomo, C. H. 2005. Balance de nutrientes y principales criterios de fertilización de cultivos en Uruguay. *In*: Simposio Binacional: Impacto de la Intensificación Agrícola en el Recurso Suelo; Reunión Uruguaya de la Ciencia del Suelo (1°. , 2005, Colonia). Trabajos presentados. Colonia, Sociedad Uruguaya de la Ciencia del Suelo y la Asociación Argentina de Ciencia del Suelo. s.p.
7. \_\_\_\_\_.; Barbazán, M.; Rocha, L. 2012. Soil nutritional survey for soybean production in Uruguay. *Agrociencia* (Uruguay). 16(3): 76 – 83.
8. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_ . 2013. Relevamiento nutricional del cultivo de soja en Uruguay. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. no. 11: 8 – 15.
9. Buschiazzo, M.; Castellanos, A. 2014. Respuesta a fósforo, potasio y azufre en cultivos de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 201 p.
10. Caires, E.; Barth, G.; Garbuio, F.; Churka, S. 2008. Soil acidity, liming and soybean performance under no-till. (en línea). *Scientia Agricola*. 65(5): 532 – 540.

Consultado may. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000500013>.

11. Carciochi, W. D.; Wyngaard, N.; Divito, G. A.; Cabrera, M.; Reussi Calvo, N. I.; Echeverría, H. E. 2016. Diagnosis of sulfur availability for corn based on soil analysis. *Biology and Fertility of Soils*. 52(7): 917 – 926.
12. Casanova, O. 1999. Acidez y encalado en suelos del Uruguay. Montevideo, Facultad de Agronomía. 17 p.
13. Coleman, N. T.; Thomas, G. W. 1967. The basic chemistry of soil acidity . *In*: Pearson, R. W.; Adams, F. eds. *Soil acidity and liming*. Madison, American Society of Agronomy. pp. 1 – 41.
14. Colombo, M.; Collares, J. R. 1982. Efecto del encalado y fertilización PK en suelos arenosos ácidos. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 194 p.
15. Cooper, J. E.; Wood, M.; Holding, A. 1983. The influence of soil acidity factors on rhizobia. *In*: Jones, D. G.; Davies, D. R. eds. *Temperate legumes: physiology, genetics and nodulation*. Boston, Pitman. pp. 319 – 335.
16. \_\_\_\_\_.; Scherer, H. W. 2012. Fijación de nitrógeno. *In*: Marschner, P. ed. *Nutrición mineral de plantas superiores de Marschner*. 3°. ed. San Diego, Académico. pp. 388 – 408.
17. Cordone, G.; Martínez, F. 2004. El monocultivo de soja y el déficit de nitrógeno. *Informaciones Agronómicas*. no. 24:1 – 4.
18. Correndo, A.; García, F. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico. *Archivo Agronómico*. no. 14: 1 – 8.
19. Della Santa Pernas, F.; Uhlig Cuk, J. A.; Vivo Vecino, I. 2018. Respuesta de *Brassica carinata* a la fertilización nitrogenada y azufrada: desarrollo de un modelo de respuesta. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 56 p.
20. Docampo, R.; Ferres, M.; Zooby, D. 1981. Efecto del encalado, fertilización fosfatada y potásica en la producción de soja en suelos arenosos de Tacuarembó. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 106 p.
21. EMBRAPA (Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria). 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos. (en línea). 5° ed. rev. amp. Brasília. 356 p. Consultado 9 may. 2022. Disponible en

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>.

22. Evans, C. E.; Kamprath, E. J. 1970. Lime response related to percent Al, saturation solution Al and organic matter content. Soil Science Society of America Proceedings. 34(6): 893 – 896.
23. Farías, J. R. B. 1995. El cultivo de la soja en los trópicos. Roma, FAO. 252 p. (Producción y Protección Vegetal no. 27).
24. Ferraris, G.; Toribio, M.; Falconi, R.; Couretot, L. 2015. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo. In: Simposio Fertilidad: Nutriendo los Suelos para las Generaciones del Futuro (2015, Rosario). Actas. s.l., IPNI. s.p.
25. Ferreira, G.; Ernst, O. 2014. Diagnóstico del estado nutricional del cultivo de colza (Brassica napus) en base a curvas de dilución de nitrógeno y azufre. Agrociencia (Uruguay). 18(1): 75 – 85.
26. Flannery, R. 1989. The use of maximum yield research technology in soybean production. In: Munson, R. ed. The physiology, biochemistry, nutrition and bioengineering of soybeans: implications for future management. St. Louis, Potash and Phosphate Institute. pp. 160 – 174.
27. Fontanive, A.V.; De la Horra, A. M.; Moretti, M. 1996. Foliar analysis of sulphur in diferents soybean cultivar stages and its relation to yield. Communication in Soil Science and Plant Analysis. 27(1-2): 179 – 186.
28. García, F. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo. Informaciones Agronómicas. no. 27: 1 – 7.
29. García Lamothe, A. 2002. Respuesta a la fertilización con azufre en trigo pan. (en línea). Montevideo, INIA. s.p. Consultado may. 2022. Disponible en [http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/pol/2002/s\\_trigo.pdf](http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/pol/2002/s_trigo.pdf).
30. \_\_\_\_\_.; Morón, A.; Quincke, A. 2010. ¿Es mayor la relevancia del análisis de suelos con la intensificación agrícola? Revista INIA. no. 21: 29 – 31.
31. \_\_\_\_\_.; Quincke, J. A. 2011. Respuesta de soja a la fertilización con macro y micronutrientes. Montevideo, INIA. s.p.
32. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Sawchik, J. 2017. Respuesta del cultivo de soja al azufre en argiudoles típicos del sudoeste de Uruguay. Agrociencia (Uruguay). 21(2): 44 – 53.

33. Giménez, A. E.; Urrestarazú, R. P. 1979. Efecto del encalado y la fertilización fosfatada en la producción de soja en suelos arenosos. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 86 p.
34. Gutiérrez Boem, F.; Salvagiotti, F.; Quiroga, A.; Barraco, M.; Vivas, H.; Prystupa, P.; Echeverría, H. 2006. Identificación de sitios deficientes en azufre mediante el análisis de grano de soja. *In*: INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, AR). Información técnica de cultivos de verano. Rafaela. pp. 114 – 120. (Publicación Miscelánea no. 106).
35. Jackson, M. L. 1967. Soil chemical analysis. New Delhi, Prentice Hall. 498 p.
36. Kamprath, E. J.; Foy, C. D. 1971. Lime fertilizer plant interactions. *In*: Olson, R. A.; Dinauer, R. eds. Fertilizer technology and use. Madison, Soil Science Society of America. pp. 105 – 151.
37. Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. 1989. Evaluación del estado nutricional de las plantas: principios y aplicaciones. Piracicaba, POTAFOS. 319 p.
38. Marschner, H.; Clarkson, D. T. 1995. Nutrición mineral de plantas superiores. 2<sup>o</sup> ed. Massachusetts, Academic Press. 889 p.
39. Mazzilli, S.; Hoffman, E. 2010. Respuesta a la fertilización con azufre en el cultivo de colza-canola en suelos del litoral norte de Uruguay. *Informaciones Agronómicas*. no. 46: 18 – 21.
40. Melgar, R. J.; Camozzi, M. E.; Torres Duggan, M.; Lavandera, J. 2003. Concentración de nutrientes en soja: valores promedios. *Fertilizar*. no. 32: 36 – 39.
41. \_\_\_\_\_; Torres Duggan, M. 2005. Comercio y abastecimiento moderno de fertilizantes. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 196 p.
42. \_\_\_\_\_; Vitti, G.; De Melo Benites, V. 2011. Fertilizando para altos rendimientos: Soja en Latinoamérica. Horgen, Instituto Internacional de la Potasa. 179 p. (IIP Boletín no. 20).
43. Merino Jiménez, D. 2006. Caracterización morfofisiológica y agronómica de cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) en siembra de invierno en suelo pardo con carbonatos. Tesis Ing. Agr. Santa Clara, Cuba. Universidad Central Marta Abreu De Las Villas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. s.p.

44. MGAP. DIEA (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2014. Anuario estadístico agropecuario. Montevideo. 215 p.
45. \_\_\_\_\_. 2020. Anuario estadístico agropecuario. Montevideo. 268 p.
46. Morón, A.; Baethgen, W. 1996. Relevamiento de la fertilidad de los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Montevideo, INIA. 16 p. (Serie Técnica no. 73).
47. \_\_\_\_\_. 2004. Efecto de las rotaciones y el laboreo en la calidad del suelo. In: Sustentabilidad de la intensificación agrícola en el Uruguay. Montevideo. pp. 7 – 10. (Actividades de Difusión no. 365).
48. \_\_\_\_\_. 2005. Informe de resultados de la red de ensayos de fertilización de soja 2002-03. In: Jornada Técnica de Cultivos de Verano (2005). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 53 – 60. (Actividades de Difusión no. 417).
49. \_\_\_\_\_. 2007. El aporte de nitrógeno vía fijación biológica en el cultivo de soja. In: Seminario Internacional de Nutrición Vegetal. (2007, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Facultad de Agronomía. Paysandú. s.p.
50. \_\_\_\_\_.; Quincke, A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el Departamento de Soriano. In: Jornada Técnica: El efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos (2010, Mercedes). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. 5 – 8 p. (Serie Actividades de Difusión no. 605).
51. Mota, F. S. 1983. Condiciones climáticas y producción de soja en el sur de Brasil. In: Verneti, F. J. ed. Soja: planta, clima, plagas, molestias e invasores. Campinas, Fundación Cargill. pp. 93 – 126.
52. Munns, D. N. 1968. Problemas de la nodulación y la fijación de nitrógeno en una revaluación. Chapingo, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. s.p.
53. Neira, R. 1986. Tecnología del cultivo de papa. In: Memorias del IV Curso sobre tecnología del cultivo y manejo de semilla de papa (5°, 1986, Quito). Quito, INIAP. pp. 38 – 72.
54. Núñez, A.; García Lamothe, A.; Sawchik, J. 2015. Manejo de la fertilización en el cultivo de soja. In: Arroz-Soja 2015: Resultados experimentales 2014-2015. Montevideo, INIA. pp. 21 – 24. (Actividades de Difusión no. 748).
55. Oyarzún, P.; Chamorro, F.; Córdova, J.; Merino, F.; Valverde, F.; Velázquez, J. 2002. Manejo agronómico. In: Pumisacho, M.; Sherwood, S. eds. El cultivo de la papa en Ecuador. Quito, INIAP. pp. 51 – 82.

56. Pereira, G.; Texeira, M.; Vercelino, A. 1983. Efecto residual del encalado y la fertilización fosfatada en suelos arenosos ácidos. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. 2 v.
57. Pierce, F. J.; Warncke, D. D. 2000. Soil and crop response to variable rate liming for two Michigan fields. *Soil Science Society of American Journal*. 64(2): 774 – 780.
58. Rabuffetti, A. 2017. La fertilidad del suelo y su manejo. Montevideo, Hemisferio Sur. 2 v.
59. Reussi, N.; Echeverría, H.; Rozas, H. 2012. Stability of foliar nitrogen: sulfur ratio in spring red wheat and sulfur dilution curve. *Journal of Plant Nutrition*. 35(7): 990 – 1003.
60. Reuter, D. J.; Robinson, J. B. eds. (1986). *Plant analysis: An interpretation manual*. Melbourne, Inkata Press. 220 p.
61. Rhoads, F. M.; Manning, A. 1989. Soybean, corn and wheat yields with variable soil pH on Plinthic Acrisols. *Fertilizer Research*. 19(3): 137 – 142.
62. Rodríguez Sánchez, M. M.; Seco Mesa, P. 2019. Respuesta a la fertilización nitrogenada y azufrada en cebada cervecera. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 53 p.
63. Rosolem, C. A. 1984. Nutrição mineral e adubação da soja. 3a. ed. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. 80 p. (Boletim Técnico no. 6).
64. Salinas, A. R.; Santos, D. S. B.; Santos Filho, B. G.; Gomes, A. S.; Melo, V. D. C.; Zonta, E. P. 1989. Comportamiento de genotipos de soja hasta el estado de plántulas, en diferentes niveles de humedad. *In*: Pascale, A. J. ed. Conferencia Mundial de Investigación en Soja (4º., 1989). Actas. Buenos Aires, ASA. s.p.
65. Scherer, W. H. 2001. Sulphur in crop production. (en línea). *European Journal of Agronomy*. 14(2): 81 – 111. Consultado 23 jul. 2020. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00082-4).
66. Sylvester, I. 2001. La soja (en línea). *Recitela*. 1(1). Consultado 10 set 2021. Disponible en <https://n9.cl/qeldb>.
67. Valverde, F.; Córdova, J. J.; Parra, R. 1998. Fertilización del cultivo de papa. Quito. INIAP. 42 p.

68. Vázquez, M. 2007. Calcio y magnesio: acidez y alcalinidad de suelos. In: Echeverría, H.; García, F. eds. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Balcarce, Argentina, INTA. pp. 161 – 188.
69. \_\_\_\_\_.; Terminiello, A.; Casciani, A.; Millán, G.; Cánova, D.; Gelati, P.; Guilino, F.; Dorronzoro, A.; Nicora, Z.; Lamarche, L.; García, M. 2012. Respuesta de la soja (*glycine max l. merr*) a enmiendas básicas en suelos de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe. *Ciencia del Suelo*. 30(1): 43 – 55.
70. Weisz, R.; White, J.; Knox, B.; Reed, L. 2003. Long-term variable rate lime and phosphorus application for Piedmont no-till field crops. *Precision Agriculture*. 4(3): 311 – 330.
71. Yamada, T. 1999. Adubação balanceada da soja. In: Jornada de Actualización Técnica para Profesionales Fertilización de Soja (2ª., 1999, Acassuso). Memorias. Buenos Aires, INPOFOS Cono Sur. p. 39.
72. Zamalvide, J. 1995. Deficiencias de azufre en suelos del Uruguay. *Revista Plan Agropecuario*. no. 67: 61 – 35.

## 9. ANEXOS

### 1. Análisis de varianza

#### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Rendimiento (kg/ha)	12	0,76	0,55	9,73

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2360678,83	5	472135,77	3,72	0,0703
Caliza (kg/ha)	1838926,17	2	919463,08	7,25	0,0251
S (kg/ha)	514952,00	2	257476,00	2,03	0,2121
N (kg/ha)	6800,67	1	6800,67	0,05	0,8246
Error	760793,83	6	126798,97		
Total	3121472,67	11			

### 2. Diferencias medias significativas de rendimiento para dosis de Caliza

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=772,56863

Error: 126798,9722 gl: 6

Caliza (kg/ha)	Medias	n	E.E.
2000,00	4103,50	4	178,04 A
4000,00	3728,75	4	178,04 A B
0,00	3151,75	4	178,04 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### 3. Diferencias medias significativas de rendimiento para dosis de Azufre

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=814,35884

Error: 126798,9722 gl: 6

S (kg/ha)	Medias	n	E.E.
0,00	3842,00	6	145,37 A
24,00	3624,00	3	205,59 A
12,00	3337,33	3	205,59 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

#### 4. Diferencias medias significativas de rendimiento para dosis de Nitrógeno

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=580,87796

Error: 126798,9722 gl: 6

N (kg/ha)	Medias	n	E.E.
0,00	3875,67	3	205,59 A
21,00	3589,89	9	118,70 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

#### 5. Anava: Dosis variación de pH según dosis de caliza y momento de muestreo

##### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
pH	12	0,73	0,51	3,16

##### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,46	5	0,09	3,29	0,0897
Caliza (kg/Ha) Fecha	0,16	2	0,08	2,82	0,1371
Momento	0,30	3	0,10	3,61	0,0850
Error	0,17	6	0,03		
Total	0,63	11			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,36321

Error: 0,0280 gl: 6

Caliza (kg/Ha) Fecha	Medias	n	E.E.
4000,00	5,41	4	0,08 A
2000,00	5,33	4	0,08 A
0,00	5,14	4	0,08 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,47317

Error: 0,0280 gl: 6

Momento	Medias	n	E.E.
120	5,49	3	0,10 A
60	5,39	3	0,10 A
40	5,21	3	0,10 A
Previo	5,08	3	0,10 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )