

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RESPUESTA A FÓSFORO, POTASIO Y AZUFRE EN CULTIVOS DE SOJA**

**por**

**María Lorena BUSCHIAZZO TAURIZANO  
Ana Laura CASTELLANOS ROMERO**

**TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2014**

Tesis aprobada por:

Director:

---

Ing. Agr. Mónica Barbazán

---

Ing. Agr. José Martín Bordoli

---

Ing. Agr. Amabelia del Pino

Fecha: 14 de julio de 2014

Autor:

---

María Lorena Buschiazzi Taurizano

---

Ana Laura Castellanos Romero

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Directora de la presente Tesis, Ing. Agr. Mónica Barbazán por su dedicación y apoyo en todas las etapas de esta tesis.

A los Ing. Agr. Martin Bordoli y Ambelia del Pino por sus sugerencias y ayuda, y por participar como integrantes del tribunal.

A los funcionarios del Laboratorio de Suelos de Facultad de Agronomía Montevideo, por la ayuda recibida.

A nuestras familias por el apoyo y la comprensión que nos brindaron en todo momento.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1 POTASIO.....	2
2.1.1 <u>Dinámica del K en el suelo</u> .....	2
2.1.2 <u>Dinámica del K en planta</u> .....	5
2.1.3 <u>Respuesta vegetal al agregado de K</u> .....	6
2.1.4 <u>Niveles críticos y equivalente fertilizante</u> .....	9
2.2 FÓSFORO.....	11
2.2.1 <u>Dinámica del P en el suelo</u> .....	11
2.2.2 <u>Dinámica del P en planta</u> .....	16
2.2.3 <u>Respuesta vegetal al agregado de P</u> .....	17
2.2.4 <u>Niveles críticos y equivalente fertilizante</u> .....	19
2.3 AZUFRE.....	20
2.3.1 <u>Dinámica del S en el suelo</u> .....	21
2.3.2 <u>Dinámica del S en planta</u> .....	23
2.3.3 <u>Respuesta vegetal al agregado de S</u> .....	24
2.3.4 <u>Niveles críticos y equivalente fertilizante</u> .....	26
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	28
3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS.....	28
3.2 DETERMINACIONES.....	28
3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	30
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	32
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	32
4.2 EFECTOS DE LA FERTILIZACIÓN CON P, K Y S.....	33
4.2.1 <u>Fertilización y rendimiento en grano</u> .....	33
4.2.2 <u>Fertilización y contenido de K en planta</u> .....	39
4.2.3 <u>Fertilización y contenido de K en suelo a inicio de floración</u> .....	42
4.2.4 <u>Fertilización y contenido de P en planta</u> .....	43
4.2.5 <u>Fertilización y contenido de P en suelo a inicio de floración</u> .....	45
4.2.6 <u>Fertilización y contenido de S en planta</u> .....	46

5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	49
6. <u>RESUMEN</u> .....	51
7. <u>SUMMARY</u> .....	53
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	55

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características químicas de los suelos donde se realizaron los estudios (muestras de 0 a 15 cm).....	29
2. Características químicas de los suelos donde se realizaron los estudios (muestras de 15 a 30 cm)...	29
3. Precipitaciones durante la zafra de 2010/2011 en Young y Mercedes, incluyendo la media histórica del periodo 1980-2009.....	32
4. Rendimiento en grano del cultivo de soja en cada sitio, según tratamiento.....	33
5. Porcentaje de K en planta a floración en cada sitio, según tratamiento.....	39
6. Incremento de K en el suelo entre la aplicación de fertilizantes a siembra e inicio de floración del cultivo de soja.....	42
7. Porcentaje de P en planta a floración en cada sitio, según tratamiento.....	43
8. Incremento de P en el suelo entre la aplicación de fertilizantes a siembra e inicio de floración del cultivo de soja.....	46
9. Porcentaje de S en planta a floración en cada sitio, según tratamiento.....	46

## Figura No.

1. Relación entre rendimiento en grano y P disponible (a), K intercambiable (b) y pH en agua (c). Los círculos vacíos corresponden al tratamiento T y los llenos a los fertilizados con P, PK y PKS en a, b y c respectivamente..... 35
2. Relación entre rendimiento relativo y P disponible (a), K intercambiable (b) y pH en agua (c). El rendimiento relativo es el rendimiento del testigo respecto al tratamiento P en a), respecto al tratamiento PK en b) y respecto al tratamiento PKS en c). Las líneas enteras representan los valores de referencia y las cortadas los valores encontrados en este estudio..... 38
3. Relación entre el porcentaje de K foliar a floración y rendimiento en grano. Los círculos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS. 40
4. Relación entre el porcentaje de K foliar a floración y K intercambiable. Los círculos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS..... 41
5. Relación entre el porcentaje de P foliar a floración y rendimiento en grano. Los círculos vacíos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS..... 44
6. Relación entre el porcentaje de P foliar a floración y P Bray 1. Los círculos vacíos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS... 44
7. Relación entre el porcentaje de S foliar a floración y MO en el suelo al momento de la instalación de los ensayos. Los círculos corresponden al tratamiento T y los rombos

a los fertilizados con PKS.....	47
8. Relación entre el porcentaje de S foliar a floración y rendimiento en grano. Los círculos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS.....	48



## 1. INTRODUCCIÓN

En esta última década Uruguay ha vivido un proceso histórico de expansión e intensificación de la agricultura de granos. Entre el año 2003 y 2012 el área sembrada de cultivos de invierno y verano se incrementó en unas 220 y 680 mil hectáreas, respectivamente (URUGUAY. MGAP. DIEA 2004, 2011). Mientras en el ejercicio 2002-2003 se sembraron 240 y 300 mil has de cultivos de invierno y verano, respectivamente, en el ejercicio 2010-2011 estos cultivos ocuparon 460 y 980 mil has, respectivamente (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011). El cultivo dominante ha sido el cultivo de soja con un crecimiento acelerado, ocupando en 2011 un área de 860 mil hectáreas (Bordoli et al., 2013).

Este proceso ha sido consecuencia tanto del aumento de la demanda mundial de granos como de los precios (hasta US\$ 600/t en el caso de la soja). Por otro lado, ese proceso ha sido acompañado por otros importantes hechos relacionados a la utilización generalizada de la siembra directa y de los cultivos transgénicos como variables tecnológicas. La siembra directa ha permitido incorporar suelos agrícolas marginales del litoral oeste, centro y noreste, que antes estaban bajo ganadería o sistemas agrícola-ganaderos de baja intensidad. Esto ha generado una especialización agrícola, con la cual los sistemas tradicionales de rotación cultivo-pastura han sido sustituidos por sistemas de agricultura continua, favoreciendo también una intensificación del uso del suelo debido a que permite realizar cultivos de segunda (García Préchac et al., 2010).

En el litoral oeste se concentra el 96% del área de soja sembrada en el país, y los suelos que han sido incorporados recientemente son los desarrollados sobre areniscas cretácicas (Unidad Cuchilla de Corralito, Chapicuy, Cañada Nieto, etc.) que presentan una alta fragilidad natural, y que habían sido dañados históricamente bajo sistemas agrícolas con laboreo a mediados del siglo pasado (García Préchac et al., 2010).

Tanto la expansión como la intensificación de los sistemas agrícolas en Uruguay, plantean incertidumbre sobre el suministro de nutrientes, debido a la remoción continua de estos que junto a la erosión o degradación del suelo pueden ocasionar deficiencias nutricionales que limiten una producción sostenible.

El objetivo de este trabajo fue corregir situaciones con alta probabilidad de deficiencias de K, P y S en suelos agrícolas del litoral oeste identificados como problemáticos mediante un relevamiento nutricional de cultivos de soja bajo siembra directa realizado previamente.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. POTASIO

El potasio (K) es un nutriente esencial para las plantas y es requerido en grandes cantidades para el crecimiento y la reproducción de las mismas. Es generalmente considerado como el "nutriente de calidad", ya que afecta la forma, tamaño, color y sabor de frutos y otras medidas atribuidas a la calidad del producto.

#### 2.1.1 Dinámica del K en el suelo

La concentración de K de la corteza terrestre promedia en 1,9% y en el suelo normalmente varía entre 0,5% y 2,5% con un promedio de 1,2% (Hernández, 1992).

Ese K, sin embargo, no está disponible para las plantas en su totalidad, sino que dependiendo de la composición mineralógica del suelo y las condiciones ambientales la disponibilidad de K puede variar. Según el orden creciente de disponibilidad o asimilabilidad del K en el suelo por las plantas el mismo se clasifica en cuatro categorías: K mineral o de reserva, K fijado o no intercambiable, K intercambiable y K en la solución del suelo (Casanova, 1996).

Existe un equilibrio entre las diferentes formas de K en el suelo. El equilibrio entre las formas intercambiables y el de la solución del suelo es rápido, mientras que entre estas formas y el K fijado, el equilibrio es muy lento y la transferencia de K de las formas minerales (estructurales) hacia las otras formas es extremadamente lenta en la mayoría de los suelos. Debido a la absorción de K por las plantas y a las pérdidas por lixiviación la situación de equilibrio estático no se da en la realidad, sino que se da un equilibrio dinámico (Conti, 2002).

Las formas no asimilables constituyen entre el 90 y 98% del K total del suelo; las formas lentamente asimilables entre 1 y 10% y las formas rápidamente asimilables (K intercambiable y K en solución) de 0,1 a 2% (Casanova, 1996).

El K es absorbido por las plantas bajo forma de ión  $K^+$ . La concentración requerida de este ión en solución depende del cultivo y su tasa de crecimiento. El K disuelto en la solución del suelo está inmediatamente disponible para las plantas, y si no es absorbido puede perderse por lixiviación. Las cantidades presentes en la solución del suelo son muy pequeñas. La capacidad del suelo de reponer los niveles de K en solución cuando este es extraído por las plantas o se pierde por lixiviación está gobernada en parte por

el K disponible, por la tasa de liberación del K fijado, y también por la difusión y transporte de iones K en la solución del suelo (Hernández, 1992).

Al K en solución más el intercambiable se le denominada K "disponible" y es medido en la mayoría de los análisis convencionales para evaluar la fertilidad del suelo. El K intercambiable está unido electrostáticamente a la superficie de las partículas de arcilla y materia orgánica (MO) del suelo y puede ser fácilmente extraído por las plantas (Conti, 2002).

La intensidad con la cual la arcilla retiene a los cationes y el desplazamiento del equilibrio K en solución – K intercambiable está determinado por la cantidad de arcilla en los suelos y el tipo de mineral arcilloso que predomina en dicha fracción. El equilibrio K en solución – K intercambiable es importante en la nutrición potásica de las plantas durante una estación de crecimiento, en tanto que el equilibrio K intercambiable - K no intercambiable es importante para mantener niveles adecuados de absorción durante periodos largos de tiempo (Hernández et al., 1988).

En suelos livianos los escasos mecanismos de retención del K determinarían que el K presente en la fase sólida del suelo pase con mayor facilidad a la solución y sea absorbido en mayor proporción en los primeros estadios de crecimiento de un cultivo. En suelos de textura pesada la energía de retención de K es mayor, lo que determina que la velocidad de liberación a la solución sea más lenta y por consiguiente más sostenida en el tiempo (Hernández et al., 1988).

El K mineral y el K fijado son las formas que están fuertemente unidas a la fase sólida mineral. Ambas constituyen el K de reserva o de reposición de los suelos (Conti, 2002). Dichas categorías forman parte de diferentes minerales los cuales se agrupan en minerales primarios: feldespatos y micas originados de la roca madre y minerales secundarios: arcillas como illitas, vermiculitas, cloritas formados por alteración de micas. La tasa de reposición del K asimilable en los suelos está gobernada en mayor parte por la naturaleza y procesos de alteración de micas y feldespatos (Hernández, 1992).

El K fijado o no intercambiable es el que se encuentra atrapado en el espacio interior de las arcillas y no es disponible para las plantas. A través de cambios en la humedad del suelo, el K fijado se libera lentamente a la solución del suelo. En los análisis de suelos de rutina no se mide el K fijado. Aunque las reservas de K no intercambiable no son siempre inmediatamente asimilables, pueden contribuir significativamente en el mantenimiento del K asimilable en el suelo. La característica de la liberación de K a partir de formas no intercambiables depende del tipo de minerales que contienen K, así como de su contenido y distribución de partículas. El manejo anterior del suelo y la

naturaleza y cantidad de fertilizantes potásicos agregados, también influyen en la liberación de K del suelo y sus componentes (Hernández, 1992).

Minerales arcillosos tipo caolinita presentan una menor energía de retención de cationes, además de no presentar sitios específicos de retención de K, por lo cual la concentración de K en la solución será mayor. En minerales arcillosos tipo montmorillonita, la energía de retención del K es mayor, lo que determina concentraciones menores de K en la solución. La presencia de minerales tipo mica determina la existencia de sitios específicos para la retención de K; esto asociado a niveles de equilibrio más elevados entre las diferentes formas de K, determina situaciones intermedias a las anteriormente mencionadas (Casanova, 1996). La disminución de los niveles de K en los suelos es menos acentuada en suelos con mineralogía tipo mica, donde la fase sólida es capaz de mantener niveles de equilibrio más elevados. En suelos con mineralogía de tipo montmorillonítico o caolinitico, la disminución en los niveles es más marcada, sobre todo cuando los tenores de arcilla son bajos (Hernández et al., 1988).

Una pequeña proporción (6 a 10%) del K total requerido por las plantas proviene del contacto directo entre las raíces de las plantas y las partículas del suelo. La llegada de K a la raíz se da fundamentalmente por flujo de masa y difusión, pero la difusión es el mecanismo más importante y está restringido a distancias muy cortas de la raíz, del orden de 1 a 4 mm. La cantidad de K transportada por flujo de masa puede ser un mecanismo relevante en la nutrición potásica de cultivos que crecen en suelos con niveles altos de K en solución ya sea de carácter natural o por fertilización potásica (Hernández, 1992).

La capacidad de la planta para absorber el K del suelo es afectada por determinados factores como temperatura, humedad, concentración de oxígeno ( $O_2$ ) y capacidad buffer del suelo. El nivel de  $O_2$  es necesario para un buen funcionamiento de las raíces; un adecuado nivel de humedad en el suelo aumenta la difusión, pero excesos de agua o compactación del suelo disminuyen la tasa de difusión de  $O_2$  y la absorción de K. Por otra parte la temperatura afecta el crecimiento y actividad de las raíces. Suelos de textura fina en general presentan mayores valores de CIC y pueden retener mayores cantidades de K en forma intercambiable. Sin embargo, altos niveles de K en forma intercambiable no mantienen necesariamente altos niveles de K en solución. Por lo general, el K en solución en suelos de textura fina (limosos y franco limosos) es más bajo que en suelos de textura gruesa (arenosos) para un mismo nivel de K en forma intercambiable. Por otra parte a un mismo contenido de arcilla, la concentración de K en la solución depende del tipo de arcilla (Hernández, 1992).

En Uruguay, Hernández et al. (1988) en un estudio de 13 suelos desarrollados a partir de materiales madre que diferían en su composición mineralógica encontraron contenidos de K total que oscilaron entre 0,06 y 0,69% con una media de 0,27%.

En esos mismos suelos, los rangos de las formas de K fueron: K solución: 0,0038-0,031 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, K intercambiable: 0,11-1,5 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> y K no intercambiable: 0,13-3,35 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Hernández et al., 1988).

Por otra parte, Casanova y Ferrando (2003) estimaron pérdidas de K por lavado en Uruguay del orden de 65 a 135 kg/ha/año, dependiendo del tipo de suelo.

Hernández (1983) en 13 suelos que diferían en la mineralogía y niveles de K evaluó la capacidad de suministro y la respuesta al agregado de K en producción de materia seca en un cultivo de raigrás en invernáculo. El autor separó los suelos en dos grupos, uno de alta producción de materia seca que no mostró respuesta al agregado presentando niveles de K intercambiable iniciales mayores a 0,4 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. El otro grupo de menor producción de materia seca presentó respuestas importantes al agregado de K siendo el K intercambiable inicial menor a 0,4 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>.

### 2.1.2 Dinámica del K en planta

El K es un elemento móvil dentro de la planta, y bajo condiciones de deficiencia es transportado a las hojas nuevas, por lo tanto las deficiencias de K en las plantas usualmente aparecen en las hojas bajas o más viejas (Mengel y Kirby, 1982).

Las funciones del K en las plantas son varias, entre ellas la de regular la presión osmótica y activar enzimas. La deficiencia de K reduce el crecimiento, retrasa la maduración y aumenta la susceptibilidad al quebrado o vuelco; además reduce la tolerancia a enfermedades y plagas y la respuesta a nitrógeno (N), lo que impide la expresión de los potenciales de rendimiento (Mengel y Kirby, 1982).

Las plantas con síntomas de deficiencia presentan hojas cloróticas o moteadas con manchas grandes o pequeñas de tejido muerto. Usualmente estas manchas aparecen en las puntas, entre las nervaduras, más marcadas en los márgenes de la hoja. También los tallos se pueden observar delgados. Todos estos síntomas pueden ser localizados o generales.

En el cultivo de soja, el K es rápidamente absorbido entre los estadios de crecimiento V10 y R6, donde aproximadamente cerca del 75-80% del total del K se encuentra en la biomasa aérea. Al momento de la cosecha,

aproximadamente el 55-60% del total de K absorbido por la planta se encuentra en las semillas maduras (García et al., 2009).

En el cultivo de soja el K es el nutriente que se absorbe y extrae en mayor cantidad luego del N. Expresado en kg de K por tonelada de grano producido en base seca el cultivo de soja absorbe 75 kg de N y 39 kg de K y extrae 55 kg de N y 19 kg de K. El índice de cosecha (proporción del nutriente absorbido que se extrae en el grano) del K en soja es bastante menor a del N (49 y 73%, respectivamente) (Ciampitti y García, 2007).

Comparando con otros cultivos, la extracción de K de las oleaginosas como la colza o la soja es relativamente alta respecto a los granos de cereales. Mientras la soja y la colza presentan una extracción de 19 y 28 kg de K por tonelada de grano, respectivamente, el trigo, el maíz y el sorgo extraen aproximadamente 4 kg de K por tonelada de grano cosechado (Ciampitti y García, 2007).

### 2.1.3 Respuesta vegetal al agregado de K

En Uruguay existen muy pocos estudios de respuesta a la aplicación de K en cultivos. Los primeros trabajos de respuesta a K se realizaron en cultivos muy extractivos, como remolacha azucarera (Yacobazzo de Díaz 1971, Caulín y Cabrera 1978), en Festuca y Phalaris (Milian, 1974) y papa (Espínola, 1980).

Si bien Moir y Reynaert (1962) encontraron respuesta a K en trigo en algunos suelos desarrollados sobre cretácico no se recomendó la fertilización con K en la mayoría de los cultivos, debido a que los suelos en la zona tradicionalmente agrícola presentaban un suministro de K considerado suficiente para los rendimientos obtenidos en los cultivos realizados (principalmente cereales de invierno) (Oudri et al., 1976). En la década del 70 se sugerían tres valores de K para guiar la fertilización de cultivos: bajo (menor a 0,15), medio (entre 0,15 y 0,30) y alto (más de 0,30  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), y se mencionaba que los ensayos de aplicación de K no habían presentado respuesta (Oudri et al., 1976). Esos valores se habían tomado de recomendaciones de otras regiones con investigación en K, como por ejemplo, lo realizado en el cinturón maicero de EEUU (Voss, 1982).

Particularmente en soja, los primeros trabajos son de la década de los 80, cuando el sistema de laboreo predominante era el convencional y las variedades usadas eran diferentes a las actuales. La mayoría de los estudios se situaron en suelos livianos del noreste, donde podría esperarse respuesta a K. Marella et al. (1981) en el noreste uruguayo evaluaron la respuesta del cultivo de soja (variedad Bragg) en rendimientos y otras características de importancia agronómica a la fertilización potásica. Estos autores estudiaron la respuesta a

soja en cinco sitios ubicados en Tacuarembó y Cerro Largo, con niveles de K intercambiable de 0,11 a 0,30 meq/100. Las dosis evaluadas fueron 0, 30, 60, 90 y 120 kg/ha de K<sub>2</sub>O. En ningún sitio estos autores encontraron respuestas significativas a las diferentes dosis aplicadas.

Docampo et al. (1981), evaluaron la respuesta al K en soja en suelos donde el nivel de K intercambiable inicial fue de 0,3 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. No se observaron respuestas en el rendimiento en grano, siendo los rendimientos promedios obtenidos de 2129 kg/ha para la dosis 0 de K y 2093 kg/ha para la dosis de 60 kg/ha de K<sub>2</sub>O.

En otro estudio, Colombo y Collares (1982), trabajando en el cultivo de soja (variedad Bragg) sobre suelos franco-arenosos de Tacuarembó, con niveles de 0,24 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de K intercambiable, tampoco encontraron respuesta en rendimiento de grano, pero sí obtuvieron aumentos del K foliar con agregados de K y disminución P foliar. Los rendimientos en esos ensayos variaron entre 3000 y 3100 kg/ha.

Pereira et al. (1983) evaluaron en 2 ensayos la producción de soja en suelos arenosos ácidos de Tacuarembó. El nivel de K intercambiable inicial fue de 0,26 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> en el ensayo 1 y 0,24 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> en el ensayo 2. Las dosis evaluadas fueron 0 y 60 kg/ha de K<sub>2</sub>O. No se observaron respuestas al agregado de K en el rendimiento en grano ni en el contenido de K foliar. Los rendimientos promedios en el ensayo 1 fueron 2809 kg/ha para la dosis 0 de K y 2955 kg/ha para la dosis de 60 kg/ha de K<sub>2</sub>O, y los contenidos de K foliar fueron 1,95 y 2,08%, respectivamente. En el ensayo 2 los rendimientos promedios fueron de 3427 kg/ha y 3319 kg/ha y los niveles de K foliar fueron de 1,66 y 1,85% respectivamente. Los valores de K foliar fueron mayores a los considerados críticos por los autores.

Los estudios mencionados previamente habían sido todos en sistemas bajo laboreo convencional. Sin embargo, a partir de los años 80 comienza en Uruguay la adopción de los sistemas sin laboreo o sistemas bajo siembra directa, los cuales presentan características diferentes en relación a la dinámica del agua, de la MO y de los nutrientes en el suelo (Bordoli, 2001). Estos cambios afectan la disponibilidad de nutrientes a diferentes profundidades, produciéndose estratificación en los primeros centímetros del perfil del suelo (Bordoli, 2001). Por otro lado, la temperatura y el contenido de agua de los suelos afectan el crecimiento y distribución de los sistemas radicales y, en consecuencia, afectan también la absorción de nutrientes y la eficiencia de uso de los fertilizantes aplicados. En varios cultivos realizados en sistemas de siembra directa se han encontrado más frecuentemente deficiencias y respuestas a N, S y K que bajo laboreo.

Bordoli y Mallarino (1998) en 26 sitios estudiados en Iowa (750-1000 mm de precipitación anual) encontraron que la fertilización fosfatada incrementó los rendimientos de grano en maíz sembrado bajo siembra directa y no encontraron diferencias en rendimiento comparando tres diferentes formas de aplicación del fertilizante (al voleo superficial, bandeado profundo a 15-18 cm o bandeado 5 cm debajo y 5 cm al costado de la semilla). Sin embargo la fertilización potásica aumentó ligeramente los rendimientos de grano en maíz en varios sitios siendo estas respuestas superiores para la aplicación en bandeado profundo en los sitios donde ocurrió un período de al menos 15 días sin precipitaciones durante la etapa de mayor absorción de K (entre 8 y 18 hojas del maíz). A pesar de esto, estos autores cuestionan la adopción de esta práctica, ya que los escasos aumentos en rendimiento de maíz que podrían lograrse con la misma, difícilmente paguen el mayor costo de estas aplicaciones profundas.

Posiblemente en Uruguay las consecuencias de estos sistemas comienzan a expresarse en los cultivos en los años siguientes. Por ejemplo, Morón y Baethgen (1996) en un relevamiento nutricional en cultivos de maíz en suelos de uso agrícola intensivo, encontraron que el 50% de los cultivos muestreados presentaban niveles sub-óptimos de contenido de K en planta, usando como referencia valores de óptimo de 1,70 % de K en hojas opuestas a la mazorca en floración. Estos autores concluyeron que la mayoría de los sitios necesitaban ajustar la fertilización potásica. En otro relevamiento nutricional Barbazán et al. (2007) encontraron que en cultivos de *Lotus corniculatus* un 14% de las muestras presentaba valores de K en planta menores a las concentraciones críticas sugeridas, y un 32% de los suelos por debajo de 0,30 meq/100 de K, por lo cual se concluyó que en algunos casos este nutriente podría estar limitando la producción. Morón y Quincke (2010) encontraron que en suelos con historia agrícola el nivel de K en la capa arable (de 0-15 cm) era aproximadamente un 40% menor respecto a los mismos suelos sin historia agrícola.

Sin embargo, los estudios de respuesta a K en Uruguay comenzaron a realizarse hace relativamente pocos años, cuando la mayoría de los cultivos ya se encontraban en siembra directa. Pero no siempre se ha observado respuesta al agregado de K. Por ejemplo, Almada (2006), en un estudio de respuesta a la fertilización potásica en maíz en tres suelos contrastantes en textura y fertilidad natural del departamento de Durazno, no encontró respuesta significativa en el rendimiento del grano. Los suelos de esos sitios presentaron entre 0,26 meq/100 g y 0,56 meq/100 g de K intercambiable al momento de instalación de los ensayos, y los rendimientos obtenidos fueron menores a 5000 kg/ha.



Cano et al. (2007) en un predio lechero ubicado en Salto sobre suelos de bajos valores naturales de K (0,16 meq/100 g de K intercambiable en los primeros 20 cm del perfil al momento de la siembra) y en el cual se habían manifestado deficiencias de K, encontraron respuesta significativa al agregado de fertilizante potásico en maíz.

En la zona agrícola tradicional, Bautés et al. (2009) observaron respuesta a la aplicación de K en cultivos de invierno (cebada y trigo) y verano (maíz, soja, sorgo y girasol), en suelos desarrollados sobre Areniscas Cretácicas de Soriano y Flores. Estas situaciones de respuesta se encontraron en suelos con valores entre 0,18 a 0,37 meq/100 g de K intercambiable.

En cultivos de invierno, García et al. (2011b) encontraron respuesta en rendimiento de trigo al agregado de KCl en dos de nueve experimentos. En esos experimentos la concentración de K en planta del tratamiento control sin KCl fue de 1,39 y 1,8 % de K. No encontraron diferencias significativas entre las diferentes dosis, y con niveles de 100 kg/ha de KCl se encontraron valores de K en planta dentro de los rangos considerados como suficientes (mayores a 3%).

Coitiño y Mazzoni (2011) evaluaron la respuesta a la fertilización con K, P y S en trigo diferenciando un ambiente de alto potencial y otro de potencial variable según año y cultivo. Considerando el conjunto de tratamientos fertilizados la respuesta en rendimiento en grano al agregado de nutrientes defirió entre ambientes, siendo la respuesta del ambiente de potencial variable de 30% (1062 kg/ha) y la respuesta del ambiente de alto potencial de un 2% (115 kg/ha) situando a ambos en niveles similares de productividad. La respuesta más importante y significativa fue al agregado de K, habiéndose incrementado los rendimientos 1090 kg/ha (26%) en el tratamiento PK y 806 kg/ha (19%) en PKS, frente al testigo. Las dosis utilizadas fueron las siguientes: testigo 106 kg/ha de N, tratamiento P 117 kg/ha de N y 54 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, tratamiento PK 117 kg/ha de N, 54 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 78 kg/ha de K<sub>2</sub>O, tratamiento PKS 117 kg/ha de N, 54 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 78 kg/ha de K<sub>2</sub>O y 11+30 kg de S/ha.

#### 2.1.4 Niveles críticos y equivalente fertilizante

Para realizar recomendaciones de fertilización con nutrientes inmóviles o relativamente inmóviles en el suelo como P y K, es necesario disponer de información sobre los valores en el suelo necesarios para lograr al menos un 90% del rendimiento máximo (niveles críticos, o sea, por debajo de los cuales hay mayor probabilidad de respuesta a la aplicación del nutriente), y de algún conocimiento de la cantidad de nutriente necesario a agregar para incrementar el dato del análisis de suelo.

En el caso de los valores críticos de K en cultivos extensivos, en la Guía para la fertilización de cultivos se sugirieron los valores considerados como bajo < 0.15, medio 0.15-0.30 y alto > 0.30  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  (Oudri et al., 1976). Durante mucho tiempo, a nivel comercial se manejaron como niveles de suficiencia de K los valores superiores a 0,25  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  en suelos medios, mientras que para suelos de textura arenosa se consideraron niveles superiores a 0,15  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  de suelo como adecuados.

Estos valores hacían referencia a la calibración de K utilizada en Iowa (EEUU.) hasta antes del 2002 para soja y maíz, que fue el rango de 0.23-0.33 meq/100g de K (Voss, 1982), el cual era referido como rango óptimo, es decir, por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la aplicación de K era alta. Sin embargo, con la información generada luego de numerosos experimentos las recomendaciones para K cambiaron, y sugieren como nivel muy bajo niveles mayores a 0.23, bajo de 0.23-0.33, óptimo de 0.33-0.43, alto 0.43-0.50 y muy alto valores mayores a 0.51  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  (Sawyer et al., 2002).

En Uruguay, Barbazán et al. (2011) resumieron la información de 50 experimentos de respuesta a K realizados recientemente a nivel nacional en diferentes cultivos de secano bajo siembra directa, donde compararon el rendimiento relativo de cada sitio con el nivel inicial de K intercambiable, determinando un nivel crítico de 0,34  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ . Ese nivel fue sugerido como tentativo para guiar provisoriamente la fertilización de K en diferentes suelos y cultivos. Estos autores enfatizaron la necesidad de discriminar por cultivo y suelos según textura para profundizar en el conocimiento de la dinámica de este nutriente y poder realizar recomendaciones más ajustadas de fertilización potásica.

El otro dato necesario para poder realizar recomendaciones de fertilización es la cantidad de K como fertilizante necesario para aumentar el dato del análisis del suelo. Almada (2006) determinó que para elevar 0,1 meq/100 g de suelo de K del suelo serían necesarios entre 125 y 143 kg/ha de  $\text{K}_2\text{O}$ . Este valor es similar al valor teórico de 117 kg/ha de  $\text{K}_2\text{O}$  en un suelo muestreado a la profundidad de 20 cm, y con una densidad de 1,25g/cm<sup>3</sup>, asumiendo que no hay pérdidas por lixiviación o fijación. En un estudio de laboratorio, el valor encontrado para 36 suelos de Uruguay fue de 221 kg/ha a 15 cm de suelo (Faggionato, 2011). En varios sitios Barbazán et al. (2013) determinaron un equivalente fertilizante de 173 kg/ha a 15 cm del suelo. Estos valores son mayores a las dosis teórica (117 a 20 cm, 88 a 15 cm), y son similares a los valores encontrados en suelos de Nueva Zelanda para pasturas (Edmeades et al., 2010).

## 2.2. FÓSFORO

El Fósforo (P) es un nutriente esencial, debido a que es un componente de la estructura energética de todo ser vivo. Se clasifica como un macronutriente para las plantas debido a que se requiere en grandes cantidades por los cultivos y por la frecuencia con la cual aparece como un factor limitante en la producción vegetal (Ciampitti et al., 2009b).

Una de las funciones más importantes del P es el almacenamiento y transferencia de energía obtenida de la fotosíntesis y del metabolismo de los carbohidratos, lípidos y proteínas. Esta energía es almacenada bajo forma de trifosfato (ATP) para luego ser utilizada por la planta para crecer y reproducirse. También el P interviene en muchos procesos individuales siendo los más importantes la división y estimulación del crecimiento celular. Asimismo permite una correcta maduración de la planta, facilita el crecimiento y promueve la formación de raíces y flores (Hernández, 1999).

### 2.2.1 Dinámica del P en el suelo

El contenido total de P en los suelos en general es bajo. La mayoría de los suelos contienen entre 0,02% y 0,08% de P. Para diferentes suelos del país se encontró un rango entre 0,013 y 0,089%, con un promedio de 0,032%, variando con el material de origen de los suelos y las condiciones de meteorización de los mismos. Los contenidos más altos están asociados a los suelos más pesados y con mayor contenido de MO que se originaron a partir de la alteración de rocas básicas como Basalto. Niveles medios de P se encuentran en suelos de sedimentos limo arcillosos de la formación Fray Bentos y Libertad. Los valores más bajos se encuentran en suelos derivados de la alteración de rocas ácidas de Basamento Cristalino y sedimentos de textura gruesa. Casos típicos de niveles bajos son suelos arenosos y los planosles y solod del este (Hernández et al., 1995).

El P del suelo se puede dividir en tres “pools” o comportamientos: el P presente en la solución del suelo, el P presente bajo forma de compuestos inorgánicos, y el P presente en forma orgánica (Hernández, 1999).

Para suelos con vegetación de pradera como los de nuestro país, sin fertilización fosfatada previa, existe una relación bastante constante (50-50%) de las formas orgánicas e inorgánicas de P en el horizonte A (Hernández et al., 1995). Estos valores pueden cambiar debido a un uso agrícola más intensivo que lleva a la pérdida de MO y a la acumulación de residuos de fertilizantes en la fracción inorgánica (Zamalvide, 1992).

El P soluble proviene de la descomposición de los minerales primarios que lo contienen (fluorapatita, apatita) y de la mineralización del P orgánico. El P orgánico del suelo se encuentra bajo diferentes formas, como humus del suelo, en restos frescos de cultivos no humificados y heces de animales y en la biomasa microbiana del suelo (Hernández, 1999).

Existe un equilibrio entre el P en la fase sólida (fijado) y el P en la solución del suelo. Al absorberse el P de la solución del suelo por las raíces, parte del P adsorbido en la fase sólida del suelo, de naturaleza orgánica e inorgánica es liberado a la solución, para mantener el equilibrio químico (Ciampitti, 2009a). Las plantas absorben P de la solución del suelo principalmente como ion ortofosfato ( $\text{HPO}_4^{2-}$  o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ). El P que responde rápidamente al descenso de la concentración en solución se denomina P lábil siendo por lo tanto la concentración de esta fracción la que determina el ritmo de absorción de P por las plantas. Los fosfatos de la fracción lábil se encuentran formando compuestos insolubles de P, pero de alta reactividad química, que pueden solubilizarse una vez que las concentraciones de P en la solución del suelo bajan por la absorción de las plantas (Hernández, 2004). La baja solubilidad de los compuestos de P en los suelos trae como consecuencia niveles muy reducidos de fosfatos en la solución del suelo, por lo general menores a 0,05 mg/kg en suelos sin agregados reciente de fertilizantes fosfatados, pudiendo alcanzar 0,1 a 0,2 mg/kg en suelos con fertilizaciones medias (Hernández, 1999). A su vez la alta estabilidad de los compuestos fosforados en el suelo permite que el P del suelo no se pierda por procesos como lixiviación ni volatilización, pero sin embargo constituye la causa inmediata de deficiencias de P para las plantas (Hernández et al., 1995). La fracción de P inorgánico no disponible en el suelo se denomina P no lábil y su importancia desde el punto de vista de la nutrición de las plantas es prácticamente nula.

Los compuestos que forman la fracción lábil están determinados principalmente por el pH del suelo y por el tipo y la cantidad de los minerales en el suelo. El P se encuentra combinado con metales de aluminio, hierro, manganeso y calcio así como con minerales arcillosos de tipo 1:1 o 2:1. En suelos ácidos con predominio de caolinita y óxidos de hierro y aluminio el P tiende a reaccionar con aluminio, hierro y manganeso. En suelos alcalinos, la fijación dominante es con el calcio formando compuestos de baja solubilidad. El rango de pH óptimo para la disponibilidad máxima del P es de 6.0-7.0 (Morón, 1992). La fracción predominante dentro de la fracción inorgánica en un estudio realizado en 37 suelos del Uruguay fue el P asociado al hierro, en promedio 18.6 mg P kg<sup>-1</sup> (Escudero y Morón, 1978).

El P que se libera en forma soluble en los suelos, se combina principalmente con constituyentes de la fracción arcilla de los suelos. Como resultado de esto, el contenido de P de la fracción arcilla es normalmente mayor al de las fracciones de tamaño de partícula gruesa. Si las demás condiciones de formación del suelo permanecen constantes, el contenido de P del suelo en su conjunto normalmente aumenta a medida que la textura se afina (Hernández, 1999).

La movilidad del P en el suelo es muy limitada por lo que las raíces pueden absorber el P solamente de su entorno inmediato (Hernández, 1999). Por lo tanto la difusión es el mecanismo principal por el cual el P de la solución llega a las raíces. Debido a que las mismas no se encuentran en contacto directo con los sitios que liberan P sino en puntos cercanos el P deberá difundir por gradiente de concentración entre el punto del cual es solubilizado en la fase sólida y es tomado por la raíz donde la concentración es más baja (Zamalvide, 1992). Como la cantidad de P en la solución del suelo es baja, la mayor parte de la absorción del P es activa, contra el gradiente de concentración (la concentración del P es mayor en las raíces que en la solución del suelo) (Hernández, 1999).

Determinadas condiciones del suelo hacen más eficiente el mecanismo de difusión, por ejemplo, que las raíces se encuentren cerca del punto de liberación del P debido a que este mecanismo se realiza a cortas distancia de las raíces y que exista una continuidad del film de agua entre el punto de liberación y absorción (Zamalvide, 1992). Un mismo suelo presenta más facilidad para la difusión con mayor contenido de agua por tener mayor continuidad en el camino a recorrer. En un suelo con bajo contenido de humedad la tortuosidad es mayor por una discontinuidad de los films de agua (Hernández, 1999). Con respecto a la textura, en un suelo pesado el camino se presenta más tortuoso que en un suelo liviano. Sin embargo los suelos pesados presentan mejores condiciones para la difusión del P debido a que un suelo arcilloso tiene más capacidad para reponer el P retirado por la planta de la solución, es decir, mayor poder buffer y el P puede difundir hacia la raíz a través del agua con más facilidad (Hernández, 1999). Con bajas temperaturas el coeficiente de difusión en agua disminuye por un aumento en la viscosidad del agua, disminuye la eficiencia de utilización del P por las raíces debido al menor crecimiento de las mismas además de reducir la mineralización del P orgánico (la siembra directa disminuye la temperatura del suelo). De esta manera, la respuesta al agregado de P es superior en épocas frías que en épocas cálidas (Zamalvide, 1992).

En siembras tempranas de cultivos de verano, en las cuales las temperaturas del suelo aún son bajas, se recomienda aumentar la dosis de P a

la siembra, para compensar los efectos de las bajas temperaturas en la disponibilidad de P del suelo.

Una de las herramientas utilizadas para estimar la disponibilidad de P para las plantas es el análisis de suelo. Estos análisis de suelos miden la capacidad del suelo para suministrar P a la solución al estimar el P presente en la fracción inorgánica lábil responsable de mantener los niveles de P en la solución. El análisis de suelo no indica la cantidad total del P en el suelo ya que la cantidad de P disponible es mucho menor que la cantidad total. Zamalvide (1992) menciona un ejemplo de una serie de suelos analizados de los cuales el de mayor contenido de P total fue un litosol rojo sobre basalto con  $887 \text{ mg kg}^{-1}$  de P y  $3 \text{ mg kg}^{-1}$  de P asimilable Bray No.1 el cual presentó una clara repuesta de las plantas al agregado de fertilizantes fosfatados. Esto es así debido a su alto contenido de P orgánico ( $458 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y al hecho de que el P inorgánico se encuentra fuertemente inactivado en el suelo por los óxidos libres de hierro. Además el nivel de P en los análisis de suelos tampoco es el nivel de P en la solución del suelo, porque la concentración de P en la solución del suelo es generalmente muy baja debido a la baja solubilidad de los compuestos fosfatados y no representa apropiadamente la cantidad de P que las plantas potencialmente pueden absorber durante la temporada de crecimiento (Hernández, 2004).

Debido a que no se puede establecer un límite claro entre el P bajo forma de compuestos de alta reactividad (P lábil) y aquella constituida por compuestos menos reactivos y más estables (P fijado) no se puede conocer exactamente cuánto P lábil hay en un suelo. Los diferentes métodos que procuran estimar el P del suelo, en realidad realizan una "estimación proporcional" del P presente en la fracción lábil, y no la totalidad de la misma, ya que difícilmente pueda evaluarse el contenido de una fracción de la cual no se conocen sus límites. De esta manera, no es tan importante que un método extraiga más o menos del P lábil del suelo, sino que las cantidades extraídas sean proporcionales a lo que se encuentra presente en dicha fracción, y que guarden relación con lo que las plantas van a tomar (Hernández, 2004).

En nuestro país el método más utilizado para evaluar el P disponible es el método Bray No.1. Dicho método se adapta a la mayoría de los suelos de uso agrícola del país, como son los suelos de texturas medias y pesadas del sur y del litoral oeste (Bordoli, 1998). También se adecua a suelos ácidos y neutros y permite evaluar el P en solución, el adsorbido y parte del P precipitado con el Al siendo estas formas de P la más importantes en la reposición de P en la solución (Ciampitti et al., 2009b).

En su trabajo de tesis Abella y Nin (2003) analizaron los cambios en el contenido de P orgánico del suelo en cuatro situaciones de intensidad de uso

del suelo para un periodo de 7 años (1994-2000): cultivo continuo con laboreo convencional (LCC), cultivo continuo bajo siembra directa (SDC), rotación cultivo-pastura con laboreo convencional (LCP) y rotación cultivo-pastura bajo siembra directa (SDP). No encontraron diferencias significativas entre los tratamientos pero los sistemas bajo siembra directa presentaron en promedio mayores contenidos de P orgánico (217 mg de P kg<sup>-1</sup>) que los sistemas bajo LC (200 mg de P kg<sup>-1</sup>) particularmente en los primeros 6 cm de profundidad. También estudiaron el P presente en la biomasa microbiana en los meses de julio a diciembre del 2001 y el P disponible en el suelo en función de la temperatura y humedad del suelo. Los contenidos de P en la biomasa microbiana en los primeros 7.5 cm de suelo oscilaron entre 16 y 59 mg de P kg<sup>-1</sup> de suelo. Si bien no hubo diferencias significativas, los tratamientos con siembra directa tendieron a tener un mayor contenido de P en biomasa que los tratamientos con LC. No se observó efecto de la pastura en el contenido de P microbiano. Todos los tratamientos presentaron un pico máximo de P en biomasa en octubre y luego una disminución a medida que aumentaba la temperatura y disminuía el contenido de humedad del suelo. La disponibilidad de P también mostró variaciones en los meses evaluados, aunque menos pronunciadas. Hasta octubre acompañó las fluctuaciones del P en biomasa, a partir de ese mes aumentó al disminuir el P en biomasa.

Por otro lado Ackermann y Gasparri (2011) también evaluaron el efecto de la intensidad de uso agrícola del suelo sobre el balance de nutrientes con N, P y K en un experimento instalado en el año 1993 en la EEMAC. Los tratamientos fueron: cultivo continuo bajo siembra directa (AC), rotación pastura-cultivo bajo siembra directa con 33% del tiempo en pastura (RC), rotación pastura-cultivo bajo siembra directa con el 50% del tiempo en pastura (RL) y rotación con el 50% del tiempo en pastura bajo laboreo convencional (R-LC). Como consecuencia del uso de implementos de laboreo se encontró significativamente más P en el estrato de 5 a 10 cm, donde el R-LC obtuvo la mayor disponibilidad de P Bray No.1. A su vez se constató que en las rotaciones con pastura la retrogradación del P durante las mismas producía una disminución del nivel de P disponible al inicio de la siguiente fase agrícola. Con respecto al K, al no registrarse fertilizaciones, cuando la duración de la etapa agrícola fue mayor se registró una mayor extracción de K en el suelo. Existió una relación entre la extracción de K y la variación del K intercambiable del suelo entre el inicio y fin del experimento. La tasa de pérdida fue mayor en el estrato 0-10 cm, mientras que de 10-20 cm tanto la correlación como la tasa de pérdida fueron menores. A nivel general, contrastando los valores de 2001 con los de 2010, todos los nutrientes mostraron un descenso en sus valores, el cual se vio mayormente relacionado al nivel inicial de nutriente. Los mayores descensos se registraron en las parcelas cuyos valores originales eran más elevados.

### 2.2.2 Dinámica del P en planta

Cuando ingresa a la raíz el P se puede almacenar en ésta o puede ser transportado a las partes superiores de la planta. A través de varias reacciones químicas el P se incorpora a compuestos orgánicos como ácidos nucleicos (ADN y ARN), fosfoproteínas, fosfolípidos, enzimas y compuestos fosfatados ricos en energía como ATP. El P se mueve dentro de la planta donde estará disponible para más reacciones en forma de ión ortofosfato y como P incorporado en los compuestos orgánicos formados. El P juega un rol fundamental en todos los procesos que requieren transferencia de energía en la planta. Los fosfatos de alta energía, que son parte de la estructura química del adenosin difosfato (ADP) y del ATP, son la fuente de energía que empuja una multitud de reacciones químicas dentro de la planta. La transferencia de los fosfatos de alta energía del ADP y ATP a otras moléculas (proceso denominado fosforilación), desencadena una gran cantidad de procesos esenciales para la planta. En el proceso de la fotosíntesis, la energía solar es capturada en el ATP e inmediatamente este compuesto está disponible como fuente de energía para otras reacciones dentro de la planta. Por otro lado, los azúcares formados son utilizados en la parte estructural de la célula y compuestos para almacenamiento. Un adecuado suministro de P es fundamental para el desarrollo de nuevas células y para la transferencia de características genéticas de una célula a otra, a medida que se desarrollan nuevas células. Un bajo aporte de P puede reducir el tamaño, número y viabilidad de las semillas debido a que el P es parte constituyente de la fitina, principal forma de almacenamiento del mismo en la semilla. Dentro de las células se pueden acumular nutrientes en concentraciones muchos mayores a las que están presentes en la solución del suelo, de la cual las raíces extraen nutrientes que se encuentran en concentraciones más bajas. El ATP y otros compuestos fosfatados proveen la energía necesaria para el transporte de nutrientes a través de las membranas de las células, proceso que requiere de energía para contrarrestar las fuerzas de osmosis y que permite la translocación de los nutrientes dentro de la planta (Armstrong, 1999).

Debido a que el P es un elemento móvil en las plantas y a que las partes jóvenes en crecimiento tienen prioridad en situaciones deficitarias, los síntomas de deficiencia se presentan en las hojas viejas. Una deficiencia de P tiene como resultado escaso crecimiento vegetal, determinando plantas pequeñas con reducido sistema radicular, tallos delgados, reducción del área foliar y expansión de las hojas así como del número de hojas. La planta se observa de color verde oscura pudiendo mostrar colores rojos o púrpuras; hojas basales a veces amarillas, escasa ramificación, secándose a color marrón verdoso o negro y flores pequeñas con pobre llenado (Mengel y Kirby, 1982). Los colores verdes oscuros en las hojas se deben al mayor efecto sobre el



crecimiento foliar que sobre el contenido de clorofila debido a que la fotosíntesis es afectada en menor medida que la expansión, área y número de hojas cuando ocurre deficiencia de P. En las leguminosas deficiencias de P también afectan la nodulación debido a la alta demanda de P por los nódulos (Ciampitti et al., 2009b).

En el cultivo de soja la acumulación de P sigue un patrón similar al de la MS siendo menor en los estadios tempranos de crecimiento e incrementándose hacia estadios vegetativos tardíos y la mitad del período reproductivo. Aproximadamente el 75-80% del total del P acumulado en las plantas de soja se absorbe tempranamente entre los estadios V10 y R6. Posteriormente a R5 el P es más rápidamente traslocado a partir de las hojas, peciolo y tallos hacia las vainas en desarrollo. Aproximadamente la mitad de las semillas maduras proviene de otras fracciones de la planta. Al momento de cosecha un 75% del total del P absorbido por la planta se encuentra en las semillas maduras. Expresado en kg de P por tonelada de grano producido en base seca el cultivo de soja absorbe 75 kg de N, 39 kg de K, 6,9 kg de P y 4,5 kg de S y extrae 55 kg de N, 19 kg de K, 6,1 kg de P y 3,2 kg de S. El índice de cosecha (proporción del nutriente absorbido que se extrae en el grano) del P en soja es superior con respecto a los demás nutrientes mencionados. Siendo el valor de los mismos 73, 49, 89 y 72 % respectivamente (Ciampitti y García, 2007).

Los requerimientos anuales dependen del tipo de cultivo y el nivel de MS producida. Si bien el cultivo de soja es capaz de mantener rendimientos relativamente elevados en condiciones de baja fertilidad, presenta requerimientos de nutrientes por tonelada de grano cosechado similares o superiores a los otros cultivos extensivos como maíz y trigo. La extracción de P en base húmeda (humedad comercial 13,5%) para altos potenciales de producción equivalentes para soja (5000 kg/ha), maíz (12000 kg/ha) y trigo (6000 kg/ha) son de 5,4; 2,6 y 3,5 kg/tonelada grano respectivamente (Baigorri y Salado Navarro, 2012).

### 2.2.3 Respuesta vegetal al agregado de P

A nivel nacional son escasos los estudios en cuanto a la fertilización fosfatada en soja. A continuación se citan trabajos de tesis realizados en su mayoría al principio de la década del 80 en sistemas bajo laboreo convencional. También se cita algún estudio realizado recientemente bajo siembra directa.

En su trabajo de tesis Giménez y Urrestarazú (1979), evaluaron respuestas del cultivo de soja a la fertilización fosfatada en ensayos ubicados en suelos arenosos de Rivera. Las dosis evaluadas fueron 0, 50, 100 y 150 unidades de  $P_2O_5$ /ha. En rendimiento de grano hallaron respuesta sólo hasta 50

unidades de  $P_2O_5$  en un suelo con  $4 \text{ mg kg}^{-1}$  de P Bray No.1 y no encontraron respuesta en un suelo con  $11 \text{ mg kg}^{-1}$  de P Bray No.1.

Docampo et al. (1981), evaluaron la respuesta al P en soja en 2 suelos donde los niveles de P Bray No.1 inicial fueron de 3 y  $4 \text{ mg kg}^{-1}$ . Encontraron respuesta en rendimiento de grano sólo para el tratamiento de 40 unidades de  $P_2O_5$ /ha.

Marella et al. (1981) en el noreste uruguayo evaluaron la respuesta del cultivo de soja (variedad Bragg) en rendimientos y otras características de importancia agronómica a la fertilización fosfatada. Estos autores estudiaron la respuesta a soja en cinco sitios ubicados en Tacuarembó y Cerro Largo. Las dosis evaluadas fueron 0, 40, 80, 120 y 160 unidades/ha de  $P_2O_5$ . Sólo existió respuesta importante en dos suelos con 3-4  $\text{mg kg}^{-1}$  de P Bray No.1 hasta 40 unidades de  $P_2O_5$ . Las dosis mayores (120 y 160 unidades de  $P_2O_5$ ) sólo aumentaron los rendimientos en menos de 200 kg/ha.

En otro trabajo de tesis, Colombo y Collares (1982), evaluaron en dos ensayos la respuesta del cultivo de soja (variedad Bragg) a la fertilización fosforada sobre suelos franco-arenosos de Tacuarembó, con niveles iniciales de 4 y  $14 \text{ mg kg}^{-1}$  de P Bray No.1 en los ensayos 1 y 2 respectivamente. Las dosis evaluadas fueron 0, 40, 80 y 120 unidades de  $P_2O_5$ . En el ensayo 1 la respuesta en rendimiento al agregado de P fue altamente significativa con 40 unidades de  $P_2O_5$ /ha, a mayores dosis no se obtuvieron incrementos. En el ensayo 2 no hubo respuesta en rendimiento al agregado de P. En el ensayo 1 el P foliar también fue afectado positivamente con el agregado de P. En el ensayo 2 se observó la misma tendencia pero el incremento se dio con la dosis de 120 unidades de  $P_2O_5$ /ha. El K foliar en el ensayo 1 disminuyó con el aumento de los dosis de P. En cuanto al contenido de P en grano en ambos ensayos el mismo aumento con el agregado de P siendo este efecto más marcado en el ensayo 1.

Pereira et al. (1983) evaluaron en 2 ensayos la producción de soja en suelos arenosos ácidos de Tacuarembó. El nivel de P Bray No.1 inicial fue de  $12 \text{ mg kg}^{-1}$  en el ensayo 1 y entre 4 y  $11 \text{ mg kg}^{-1}$  en el ensayo 2 (ensayo residual). Las dosis evaluadas fueron 0, 40, 80 y 120 unidades/ha de  $P_2O_5$ . En el ensayo 1 la respuesta en rendimiento en grano para P fue de escasa magnitud. Los valores de P foliar estuvieron dentro del rango de 0,26 a 0,29% y no experimentaron cambios significativos con las diferentes dosis de P aplicadas. En el ensayo 2 la respuesta en rendimiento en grano a las dosis residuales de P fue positiva obteniendo un incremento del 28% respecto al testigo con el agregado de 120 unidades/ha de  $P_2O_5$ . Los valores de P foliar se situaron en el rango de 0,21 a 0,22% sin experimentar cambios significativos con los diferentes tratamientos.

Dambrauskas y Fabbiani (1984) en otro trabajo de tesis evaluaron el cultivo de soja (variedad Lee 74) en un ensayo sobre un Brunosol Subéutrico Típico (suelos medios y pesados) con niveles de P Bray No.1 en el suelo de  $14 \text{ mg kg}^{-1}$  (0-15 cm de profundidad). Evaluaron tres dosis de P aplicadas al voleo (0, 40 y 80 unidades de  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ ) y tres dosis aplicada en bandas debajo y al costado de la semilla (0, 20 y 40 unidades de  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ ). Concluyeron que el agregado y la localización del P no causaron respuestas significativas en el rendimiento de grano.

En otro trabajo de tesis en soja de segunda bajo siembra directa durante la campaña 2010/2011 se realizaron 14 ensayos en sitios ubicados en el litoral agrícola, los cuales presentaban bajos niveles de P al momento de la siembra. Las dosis de P evaluadas fueron 0, 30 y 60 kg de  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ . Los rendimientos promedios variaron entre 3322 y 786 kg/ha promediando entre 1880 kg/ha. Sólo en 4 de 14 sitios en estudio se encontraron respuesta al agregado de P. De los sitios que no tuvieron respuesta, hubo tres que presentaban valores de P disponible por debajo de los niveles críticos de soja de primera ( $10\text{-}12 \text{ mg kg}^{-1}$ ). En éstos suelos existieron otras limitantes no atribuidas a la fertilización, dado que los rendimientos obtenidos en todos los tratamientos fueron muy bajos en comparación con los otros sitios (Erro et al., 2012).

#### 2.2.4 Niveles críticos y equivalente fertilizante

El análisis de suelo es la herramienta diagnóstico más importante para evaluar la disponibilidad de P para los cultivos, siendo Bray No.1 el método de análisis más utilizado en nuestro país.

Existen diferentes criterios para decidir la dosis de fertilización fosfatada. Uno es el criterio de suficiencia que consiste en aplicar el P estrictamente necesario para satisfacer las necesidades inmediatas, solamente si los niveles de P extractables están por debajo del umbral crítico. Otro criterio, el de reposición, consiste en aplicar el P extraído por el cultivo, reponiendo el P al suelo. Y por último el criterio de reposición y reconstrucción consiste en aplicar el P extraído por el cultivo más el P destinado a elevar el nivel del nutriente en el suelo.

Los niveles críticos para el cultivo de soja de P en suelo ( $10\text{-}12 \text{ mg kg}^{-1}$ ), son menores a los de otros cultivos como alfalfa ( $20\text{-}25 \text{ mg kg}^{-1}$ ), trigo ( $12\text{-}14 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y maíz ( $12\text{-}13 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Esto se atribuye entre otras cosas a cambios generados en el ambiente rizosférico del cultivo y al alto costo energético de los granos de soja (aceite + proteína) (García, 2005).

En Uruguay, Castro et al. (1981) en sistemas bajo laboreo convencional establecieron como nivel crítico el rango de 12-16 mg kg<sup>-1</sup> de P Bray No.1 a 20 cm de profundidad para suelos de textura pesada y más de 16 mg kg<sup>-1</sup> para suelos más francos. También definieron el equivalente fertilizante para diferentes suelos del país, oscilando los valores del mismo entre 5 y 10 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Pereira et al. (1983) concluyeron que la respuesta a la aplicación de fertilizantes fosfatados no se daría por encima de valores del suelo de 11-12 mg kg<sup>-1</sup> de P Bray No.1, mientras que para el efecto residual se obtiene respuestas a niveles mayores de P en suelo.

En ensayos realizados en Iowa en el cultivo de soja en cero laboreo (sobre rastrojos de maíz) sólo se encontró respuesta a la fertilización fosfatada si los suelos poseían niveles de P Bray No.1 menores a 16 mg kg<sup>-1</sup>, en muestras sacadas de 0-15 cm de profundidad (Mallarino et al, 1999).

En 1981 el CIABB estableció recomendaciones tentativas de fertilización fosfatada para sistemas bajo laboreo según el valor de análisis del suelo a la siembra (0-20 cm de profundidad) las cuales tienen como nivel crítico por encima del cual no se encuentra respuesta el valor de 12 - 16 mg kg<sup>-1</sup> P Bray No.1. Sin embargo, en 2005, Morón presentó un nivel crítico de 10 -12 mg kg<sup>-1</sup> para soja bajo siembra directa

Echeverría et al. (2002) señala una eficiencia de uso de 11 kg de soja por kg de P agregado y un nivel crítico estimado de 12-13 mg kg<sup>-1</sup> de P Bray No.1 en suelo para soja de primera.

Por otro lado, y para cultivos de soja de segunda, Erro et al. (2012) establecieron un nivel crítico de P a la siembra, siendo esperable encontrar un 10 y 15% de respuesta a la fertilización, cuando los niveles iniciales en suelo se ubican entre 17 y 12 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente.

### 2.3. AZUFRE

El azufre (S) es un nutriente esencial, requerido por las plantas para realizar diversas funciones, es constituyente y estabilizador de proteínas y por lo tanto tiene funciones estructurales. Además interviene en el metabolismo vegetal formando parte de aminoácidos, coenzimas, hormonas, y constituye compuestos antioxidantes que permite a la planta recuperarse de estreses bióticos y abióticos (Mengel y Kirby, 1982).

Se clasifica como un macronutriente secundario debido a que a pesar de que las plantas lo usan en cantidades importantes en general sus

deficiencias son menos frecuentes que las de N, P y K, pero más que la de los micronutrientes (Mengel y Kirby, 1982).

### 2.3.1 Dinámica del S en el suelo

La proporción de S -en promedio- de la corteza terrestre está estimada entre 0,06 y 0,1 %. El S en el suelo se encuentra en forma elemental, así como sulfuros, sulfatos y en combinaciones orgánicas con C y N. La cantidad de S en el suelo puede variar desde 0,02% en regiones húmedas donde predominan las formas orgánicas hasta 0,2% en regiones áridas donde predominan los sulfatos de Ca, Mg, K y Na precipitados. El dióxido de azufre proveniente de la actividad industrial es absorbido por las plantas y es además devuelto a la tierra por la lluvia (Evangelou, 1998).

El S orgánico proviene de los residuos vegetales y animales. En general, por encima del 90% del S total de suelos no calcáreos se encuentra en forma orgánica. La proporción del S total existente en formas orgánicas, varía considerablemente en relación al tipo de suelo y de la profundidad del perfil, siendo generalmente un poco menor en los subsuelos, que en los horizontes superficiales. Existe una relación entre el C, N y S total en los suelos. La relación N/S de la MO en muchos suelos es del rango de 6 a 8:1. Dicha relación es más estrecha que la relación C/S independientemente del tipo de suelo (Cerveñansky, 2000).

El S es absorbido por las plantas en forma inorgánica como ión sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) por lo que para estar disponible para las plantas el S orgánico debe sufrir una transformación a inorgánico. Esta conversión microbiana, denominada mineralización, es un mecanismo imprescindible para la reposición del S disponible. La mayor parte del S sin embargo queda en forma orgánica, volviéndose parte del humus del suelo. La descomposición de los residuos orgánicos frescos en el suelo es relativamente rápida comparada a la degradación y liberación del S desde la fracción humus. Por lo general, 1 a 5 % del S orgánico en el suelo se mineraliza a  $\text{SO}_4^{-2}$  en más de una estación de crecimiento. Suelos cálidos y húmedos, con grandes cantidades de MO y con pH cercanos a la neutralidad que contienen azufre orgánico fácilmente mineralizable presentan las más altas tasas de mineralización. La presencia de plantas en crecimiento genera un “efecto rizósfera”, dado por la excreción de exudados de las raíces de aminoácidos y azúcares, estimulando así la actividad microbiana. La conversión de los fertilizantes de S elemental a  $\text{SO}_4^{-2}$  disponible para las plantas aumenta cuando el tamaño de partícula es pequeño y las partículas se dispersan en el suelo (Schoenau y Malhi, 2008).

La concentración del ión  $\text{SO}_4^{-2}$  en el suelo varía de 3 a 5  $\text{mg kg}^{-1}$ , la cual es adecuada para el crecimiento de muchas especies vegetales. Los iones  $\text{SO}_4^{-}$

<sup>2</sup> alcanzan las raíces por difusión y flujo de masa. El horizonte superficial de los suelos generalmente contienen entre 1 a 10% del S total como  $\text{SO}_4^{-2}$  inorgánico, en promedio 20 mg/kg.

El S inorgánico en los suelos es móvil y puede perderse por lixiviación. La movilidad del  $\text{SO}_4^{-2}$  en el suelo es muy variable con las condiciones climáticas, la concentración de  $\text{SO}_4^{-2}$ , la textura del suelo, el pH y el tipo de arcilla (Calvo y Echeverría, 2009).

Debido a que las plantas obtienen S primariamente desde el suelo como  $\text{SO}_4^{-2}$  disuelto, el  $\text{SO}_4^{-2}$  soluble más el  $\text{SO}_4^{-2}$  adsorbido representa la fracción fácilmente disponible del S en el suelo. Una porción del  $\text{SO}_4^{-2}$  adsorbido es disponible para las plantas y la adsorción puede ser beneficiosa al reducir las pérdidas por lixiviación en ambientes húmedos. Debido a que ocurren procesos de acumulación de  $\text{SO}_4^{-2}$  adsorbido en horizontes subsuperficiales, es importante que las plantas puedan desarrollar plenamente el crecimiento de raíces en profundidad. Una condición sub-óptima del suelo para el crecimiento radicular, como puede ser la compactación, la acidez o la acumulación de sustancias tóxicas, puede impedir el aprovechamiento del  $\text{SO}_4^{-2}$  de distintos estratos del suelo. Esto sugiere la importancia del aporte de S de estratos u horizontes subsuperficiales del perfil (Schoenau y Malhi, 2008).

Las mayores pérdidas de S por lavado se producen en suelos de texturas gruesas, con valores de pH superiores a 6, recientemente fertilizados con formas solubles de S, en ausencia de crecimiento vegetal y frente a abundante precipitaciones (Calvo y Echeverría, 2009).

El  $\text{SO}_4^{-2}$  adsorbido puede considerarse por encima de un tercio del S total en el subsuelo. En suelos superficiales, generalmente representa menos del 10% del S total. La adsorción del  $\text{SO}_4^{-2}$  es rápidamente reversible y está influenciada por propiedades del suelo. Esta absorción aumenta con el contenido de arcilla y con altos niveles de caolinita. En suelos con altos contenidos de óxidos de Fe e hidróxido de Al ésta fracción contribuye en forma importante a cubrir los requerimientos para las plantas. La capacidad para la adsorción del  $\text{SO}_4^{-2}$  es mayor en subsuelos debido a la presencia de más arcilla y óxidos de Fe y Al, decrece con el pH y aumenta con la concentración de  $\text{SO}_4^{-2}$ .

### 2.3.2 Dinámica del S en planta

El S cumple diversas funciones como ser parte constituyente de aminoácidos (cistina, cisteína, metionina), de vitaminas (biotina) y de enzimas, actúa en el ciclo de los hidratos de carbono y de los lípidos, interviene en los mecanismos de óxido-reducción de las células, actúa en la formación de clorofila, ayuda a un desarrollo más acelerado del sistema radicular y de las bacterias nodulares que viven en simbiosis con las leguminosas (Mengel y Kirby, 1982).

El  $\text{SO}_4^{2-}$  absorbido por las plantas es reducido en las hojas, sintetizándose primero a cisteína que puede ser transferida hasta formar metionina. Son estos dos aminoácidos la principal fuente de S para la mayoría de los compuestos orgánicos. El  $\text{SO}_4^{2-}$  absorbido pero no reducido se almacena en las vacuolas, pero su removilización hacia otras partes de la planta es lenta. Precisamente, debido a la escasa movilidad del  $\text{SO}_4^{2-}$  dentro de la planta, las deficiencias de S se manifiestan primeramente en las hojas más jóvenes (Mengel y Kirby, 1982). Los síntomas se manifiestan como nervaduras y tejido internerval de color verde claro y en estado de crecimiento avanzado toda la planta puede ser verde pálido.

La dinámica de absorción de S por el cultivo de soja está asociada a la expansión foliar y crecimiento vegetativo de la planta por lo tanto la acumulación de S por el cultivo de soja sigue un patrón similar al de la MS y al del N. Comienza con una menor acumulación en los estadios vegetativos tempranos, y alrededor de inicio de formación de vainas (R3) se acumula a elevadas tasas. En etapas posteriores decae el ritmo de absorción y al estadio R5 la acumulación cesa, por lo que se mantiene constante hasta la cosecha del cultivo. En este estadio R5 se produce una pérdida desde las hojas y los tallos, las vainas presentan un temprano cambio en el balance asimilación-exportación y se produce un incremento en la concentración de S en grano, que es constante (Baigorri y Salado Navarro, 2012).

El grano de soja es rico en aminoácidos azufrados, por esta razón, presenta un índice de cosecha elevado, comparado con otros cultivos. Expresado en kg de K por tonelada de grano producido en base seca el cultivo de soja absorbe 4,5 kg de S y extrae 3,2 kg de S. El índice de cosecha (proporción del nutriente absorbido que se extrae en el grano) del S en soja es similar al del N (72 y 73 % respectivamente) y mayor al del K (49%) (Baigorri y Salado Navarro, 2012).

Los requerimientos anuales dependen del tipo de cultivo y el nivel de MS producida. Si bien el cultivo de soja es capaz de mantener rendimientos relativamente elevados, en condiciones de baja fertilidad, presenta

requerimientos de nutrientes por tonelada de grano cosechado similares o superiores a los otros cultivos extensivos como maíz y trigo. La extracción de S en base húmeda (humedad comercial 13,5%) para altos potenciales de producción equivalentes para soja (5000 kg/ha), maíz (12000 kg/ha) y trigo (6000 kg/ha) son de 2,8; 1,3 y 1,5 kg/tonelada grano respectivamente (Baigorri y Salado Navarro, 2012).

Las condiciones que promueven las deficiencias de S son: suelos pobres en su fertilidad natural; no aplicación de S con los fertilizantes; técnicas de cero laboreo en cultivos que disminuyen la mineralización de la MO; pasturas de varios años donde es escasa la mineralización de MO; especies exigentes o más sensibles a las deficiencias; y altos niveles de rendimiento y absorción de nutrientes por los cultivos con altas extracciones de S fuera del sistema suelo planta (Zamalvide, 1995).

### 2.3.3 Respuesta vegetal al agregado de S

En Uruguay es cada vez más frecuente encontrar deficiencia de S en sistemas agrícolas. Esto se debe a que han ocurrido cambios en los flujos de entradas y salidas de S en nuestros sistemas de producción. En los sistemas agrícola-ganaderos típicos de la década del 80 el fertilizante más usado para aplicar P era el superfosfato simple, el cual contiene 13-14 kg de S por cada 100 kg de fertilizante. Paulatinamente esta fuente de P fue sustituida por otras más concentradas o fertilizantes binarios (N-P) con poco o nada de S, eliminándose prácticamente la entrada de S vía fertilizante. También el uso generalizado de SD disminuye la mineralización de la MO del suelo. Por otra parte ha ocurrido en los últimos años un aumento progresivo del potencial de rendimiento de los cultivos, y un aumento en el número promedio de cultivos que se producen por hectárea y por año. Además el cultivo de soja que predomina en la actualidad presenta una alta concentración de S en el grano cosechado en comparación a los cultivos tradicionalmente sembrados en nuestro país (García y Quincke, 2011a).

Existe poca información acerca del contenido de S en suelos del país, niveles críticos y respuestas al agregado de S por los diferentes cultivos.

En una red de ensayos desde 1989, comparando rendimientos de pasturas de *Lotus corniculatus* en parcelas fertilizadas con fertilizantes fosforados con S y sin S se encontraron en algunos sitios respuestas al agregado de S (Zamalvide, 1995).

En la misma red de ensayos de *Lotus corniculatus* antes citada se comparó el nivel de S en planta en parcelas provenientes de diferentes suelos y fertilizadas con diferentes fuentes de P. Se concluyó que la utilización de



fertilizantes sin S baja el contenido en la planta de este nutriente, siendo más acentuada esta deficiencia en suelos de baja fertilidad natural. También en la cuenca lechera sur se muestrearon plantas de alfalfa para identificar posibles deficiencias de S. Utilizando un nivel crítico de 0,2% encontraron varios cultivos con insuficiencia y ninguno con contenidos altos de S en planta (Zamalvide, 1995).

Un relevamiento del contenido de S en cultivos de maíz en suelos de uso agrícola intensivo, demostró que en un 30 % de los casos el S estaba por debajo del límite inferior del rango óptimo (1.3 g S/kg de materia seca en la hoja opuesta a la mazorca en floración) y otro 30 % adicional se situaron por encima pero muy cerca a dicho límite inferior. En el mismo relevamiento pero en suelos de Young de menor intensidad de uso que los anteriores la amplia mayoría de los niveles de S en planta estuvieron dentro del rango óptimo según los límites inferiores citados (1.3 o 1.5 g S/kg) (Morón y Baethgen, 1996).

Collares (1996) evaluó diferentes fertilizantes fosfatados con S y sin S sobre dos suelos con pasturas convencionales. En el ensayo ubicado sobre un Argisol con pH 5,7 y 14 ppm de P Bray No.1 no se detectaron diferencias significativas en rendimiento de MS entre fuentes ni en las otras variables estudiadas y considerando los buenos niveles de S foliar, se concluyó que no existieron deficiencias de S en el suelo. En cambio en el ensayo ubicado sobre un Brunosol con pH 6 y 9 ppm de P Bray No.1 si bien tampoco se detectaron diferencias significativas en rendimiento de MS se dieron algunas tendencias en las variables estudiadas que hacen pensar en la existencia de deficiencias de S en el suelo. Estas tendencias quedaron bastante confirmadas por los bajos valores de S foliar que se dieron en este ensayo, por lo tanto se concluyó que el uso de una fuente de P que a su vez aporte S como es el caso del superfosfato parece una alternativa razonable para asegurar el correcto aporte de dicho nutriente a la pastura.

García y Quincke (2009) realizaron seis experimentos de trigo y uno de cebada fuera y dentro de la estación experimental La Estanzuela. Compararon tres dosis de S (15, 30 y 45 kg/ha) y un control sin S. El efecto del S sobre el rendimiento en grano fue significativo en dos casos, en un ensayo de trigo ubicado en Young con valores iniciales de 2.33% de C orgánico, 2.4 mg kg<sup>-1</sup> de S a 0-15 cm y 7.8 mg kg<sup>-1</sup> de 15-30 cm y en el ensayo de cebada ubicado en La Estanzuela con valores iniciales de 1.85% de C orgánico, 3.0 mg kg<sup>-1</sup> de S a 0-15 cm y 1.7 mg kg<sup>-1</sup> de 15-30 cm. También se observó una tendencia a aumentar el rendimiento en otro ensayo de trigo ubicado en La Estanzuela con valores iniciales de 1.94% de C orgánico, 8.6 mg kg<sup>-1</sup> de S a 0-15 cm y 4.2 mg kg<sup>-1</sup> de 15-30 cm. El máximo rendimiento promedio se obtuvo con 37 Kg de S/ha. El incremento en grano logrado por la fertilización con S fue 15 %, y la

eficiencia de 13 kg de grano/Kg de S aplicado. La respuesta al S expresada como rendimiento relativo no se correlacionó con el  $\text{SO}_4^{2-}$  presente en los primeros 15 cm de suelo a la siembra, pero hubo respuesta significativa sólo cuando el valor de  $\text{SO}_4^{2-}$  fue bajo ( $\cong 3 \text{ mg kg}^{-1}$  de suelo). Cuando al  $\text{SO}_4^{2-}$  determinado en superficie se le sumó el de la capa más profunda (15 - 30 cm) el coeficiente de correlación fue 0.55 mejorando el valor del análisis como indicador de disponibilidad de S para el cultivo. En los sitios que hubo respuesta a S se observó que el porcentaje de S en hojas nuevas a Z 3.0 fue notoriamente menor en las parcelas sin S comparado con los tratamientos con S.

García y Quincke (2011a) resumieron los resultados de una serie de ensayos de fertilización con S realizados en INIA La Estanzuela en trigo y cebada. Entre los años 1998 y 2001 se realizaron ensayos en cultivos de trigo que se ubicaron en suelos representativos del litoral oeste (textura franca y niveles medios de C orgánico, 1,9-2,2%). Se encontraron respuesta al agregado de S en la producción de biomasa en estado vegetativo en el 65% de los casos y respuesta en rendimiento en el 20% de los casos. Por otro lado en los años 2008 y 2009 en otros suelos del litoral agrícola con niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  a 0-15 cm del suelo entre 1 y 9 mg/kg encontraron respuesta positiva en 4 sitios de un total de 13 en rendimiento en grano en cultivos de trigo y cebada. En estos ensayos cuando el nivel de  $\text{SO}_4^{2-}$  fue inferior a 6 mg/kg fue mayor la frecuencia con la se encontró respuesta positiva a S y cuando el nivel fue superior a 10 mg/kg no encontraron respuesta a S. Por otro lado destacan que en toda la serie de experimentos mencionados ha habido casos de respuesta negativa con dosis de S mayores a 40 kg de S/ha. La dosis de S requerida para obtener el máximo físico fluctuó entre 13 y 40 kg/ha pero con los valores más frecuentes en el rango de 20 a 30 kg de S/ha para cultivos con rendimiento por encima de la media nacional.

#### 2.3.4 Niveles críticos y equivalente fertilizante

Según Cerveñansky (s.f.), suelos con menos de 10 mg/kg de  $\text{SO}_4^{2-}$  en forma asimilable, es decir de  $\text{SO}_4^{2-}$  en solución más algo de lo adsorbido pueden presentar problemas de suministro de S en cultivos exigentes en dicho nutriente.

Según Baigorri y Salado Navarro (2012) las referencias internacionales en soja indican un valor umbral para el diagnóstico de fertilización azufrada de 10 mg/kg a 0-20 cm de profundidad, por arriba del cual no se esperan respuestas a la aplicación de fertilizante azufrado.

García y Quincke (2011a) proponen un nivel crítico de S en planta para maíz de 0,12% y como nivel crítico de S en suelo 6 mg/kg. Sin embargo, no se

han establecido valores de equivalente fertilizante para poder cambiar el dato del análisis de S en el suelo.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ENSAYOS

Durante la zafra de verano 2010/11 se instalaron en chacras comerciales siete experimentos de respuesta a P, K y S. Cuatro se ubicaron en Soriano, dos en Río Negro y uno en Paysandú. Los suelos donde se instalaron los experimentos corresponden a las Unidades Cuchilla de Corralito, Tres Bocas, Paso Palmar y Young, que fueron identificadas como problemáticas en el relevamiento de suelos y cultivo realizado previamente.

En todos los sitios se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los tratamientos fueron: a) un testigo, sin aplicación de fertilizantes, manejado como el resto de la chacra; b) agregado de P (46 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> aplicado como supertriple); c) agregado de P y K (46 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> y 120 kg de  $K_2O$  ha<sup>-1</sup>, aplicado como supertriple y KCl) y d) agregado de P, K y S (46 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup>, 120 kg de  $K_2O$  ha<sup>-1</sup>, 24 kg de S ha<sup>-1</sup>, aplicados como superfosfato común y KCl).

La fertilización se realizó en forma manual, aplicando los fertilizantes al voleo en superficie.

El tratamiento testigo fue fertilizado como el resto de la chacra por el productor, por lo que en cada experimento los testigos fueron diferentes, por lo cual se deberían llamar “testigos tecnológicos”.

#### 3.2 DETERMINACIONES

Previo a la instalación de los tratamientos se tomaron muestras compuestas de suelos (20-25 tomas) de 0 a 15 y de 15 a 30 cm del perfil, una por bloque. Las muestras fueron secadas a estufa por 48 horas a 40°C y molidas hasta un tamaño menor a 2 mm. En cada muestra se midió pH en agua y en KCl 1M por potenciometría. La MO se determinó por el método de Walkley y Black (1982) con determinación por colorimetría (Sims y Haby, 1971). El P asimilable se determinó por el método Bray No.1 (Bray y Kurzt, 1945) y las bases intercambiables se analizaron por extracción con acetato de amonio 1 M y determinación por absorción atómica (Ca y Mg) y emisión (K y Na) (Isaac y Kerber, 1971). El Cuadro 1 muestra las principales características químicas de los suelos donde se realizaron los experimentos.

Cuadro 1. Características químicas de los suelos donde se realizaron los estudios (muestras de 0 a 15 cm).

No. sitio	Sitio	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	MO %	P Bray No.1 mg kg <sup>-1</sup>	K	Na cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg
1	Gord	5,84	5,24	2,9	8	0,31	0,33	15,41	1,74
2	Isl	5,20	4,53	3,9	10	0,37	0,33	23,58	2,53
3	Mimb	4,94	4,33	3,1	8	0,19	0,33	7,86	1,45
4	Palm	5,29	4,74	3,1	9	0,27	0,32	13,39	2,64
5	ERF	4,87	4,38	2,4	9	0,16	0,29	4,99	1,09
6	ERR	4,85	4,17	2,0	13	0,22	0,30	3,94	0,66
7	Sau	4,98	4,37	2,0	5	0,13	0,38	4,94	1,08

Cuadro 2. Características químicas de los suelos donde se realizaron los estudios (muestras 15 a 30 cm).

No. sitio	Sitio	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	P Bray-1 No.1 mg kg <sup>-1</sup>	K	Na cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg
1	Gord	6,19	5,4	3	0,12	0,38	3,07	0,76
2	Isl	5,47	4,72	7	0,39	0,32	26,46	2,22
3	Mimb	5,34	4,52	2	0,22	0,42	11,77	1,92
4	Palm	5,62	4,93	3	0,31	0,35	16,92	3,19
5	ERF	5,07	4,5	2	0,21	0,3	11,86	1,16
6	ERR	4,85	4,08	5	0,2	0,31	5,13	0,64
7	Sau	5,37	4,5	2	0,17	0,47	7,36	1,75

En cinco sitios los valores de K intercambiable de 0 a 15 cm fueron menores a 0,30 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> sugerido como nivel crítico para la mayoría de los cultivos, y en seis sitios ese valor estuvo por debajo del reportado por Barbazán et al. (2011). En seis sitios los valores de P fueron menores a 12 mg kg<sup>-1</sup> de P Bray No.1, sugerido por Morón (2005) como valor de referencia en soja. Por otro lado, en cinco de los siete sitios los suelos presentaron un pH en agua por debajo de 5,3. Por debajo de ese valor es esperable que los cultivos presenten problemas de absorción de nutrientes y por lo tanto un menor rendimiento. Esto podría estar indicando, a priori, que en la mayoría de los sitios existiría al menos una limitante para el normal crecimiento del cultivo, ya sea por deficiencia de alguno de los nutrientes en estudio, o limitantes indirectas por bajo pH.

Si observamos los valores de nutrientes de 15 a 30 cm de suelo (Cuadro 2) salvo en el Sitio 1 todos son parejos en K intercambiable en el perfil (de 0 a 30 cm), tal vez este Sitio tenga historia de fertilización con este nutriente. En todos los Sitios hay mayor cantidad de P de 0 a 15 de que 15 a 30 seguramente debido a la historia de fertilización con P. En cuanto al pH en casi todos los Sitios hay acidificación en el horizonte superficial.

Al estado de floración del cultivo (R1/R2), se tomaron muestras compuestas de las últimas hojas completamente desarrolladas con sus pecíolos correspondientes, a razón de 30 hojas por parcela. Las parcelas muestreadas fueron las correspondientes a los tratamientos T y PKS de los tres bloques. Las muestras de hojas fueron secadas a 60 °C por 48 horas y molidas hasta un tamaño menor a 1mm. En cada muestra se determinó P total por el método colorimétrico con ácido ascórbico (Murphy y Riley, 1962) de 0,50 g de muestra digerida con ácido sulfúrico y perhidrol a 350 °C. Las concentraciones de K se determinaron por emisión, de 1,00 g de una muestra calcinada durante 5 horas a 550 °C (Isaac y Kerber, 1971). También se determinó S total en hoja, por el método de combustión en el laboratorio de INIA La Estanzuela.

Simultáneamente al muestreo foliar se realizó un muestreo de suelos en las parcelas testigo y en los tratamientos completos (PKS).

La cosecha de los ensayos se llevó a cabo entre fines de marzo y los primeros días de abril del 2011. Se realizó en forma manual, cortando con tijeras 2,28 m<sup>2</sup> por parcela. El rendimiento de grano fue corregido al 13% de humedad.

### 3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El modelo estadístico corresponde al diseño experimental en bloques completos al azar, el cual se presenta a continuación.

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + L_j + (\alpha L)_{ij} + \beta_k(L_j) + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

i=1,2,3,4 (tratamientos)

j=1,2,3,4,5,6,7 (lugares)

k=1,2,3 (repeticiones)

Y<sub>ij</sub> = rendimiento (kg/ha)

μ = media poblacional

$\alpha$  = efecto del i-ésimo tratamiento

L = efecto del j-ésimo lugar

$\beta$  = efecto del k-ésimo bloque

$(\alpha L)_{ij}$  = efecto de la interacción entre el i-ésimo tratamiento y el j-ésimo lugar

$\beta_k(L_j)$  = efecto de la interacción entre el k-ésimo bloque y el j-ésimo lugar

$\varepsilon_{ij}$  = error experimental.

Los datos obtenidos fueron analizados mediante análisis de varianza, se realizaron contrastes ortogonales para el rendimiento en grano.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

En general, el período de desarrollo de los cultivos de nuestro estudio estuvo caracterizado por el fenómeno Niña, que para nuestra región causa ocurrencia de precipitaciones por debajo de lo normal, en particular en primavera tardía e inicio de verano con temperaturas más bajas y ocurrencia de heladas tardías.

En el Cuadro 3 se observan los datos pluviométricos del período estudiado y en las zonas donde se ubicaron los experimentos.

Cuadro 3. Precipitaciones durante la zafra de 2010/2011 en Young y Mercedes, incluyendo la media histórica del periodo 1980-2009.

Meses	Precipitaciones (mm)			
	Localidades			
	Young		Mercedes	
	2010-11	1980-09	2010-11	1980-19
Setiembre	70	76	100	75
Octubre	60	121	50	121
Noviembre	40	123	40	113
Diciembre	40	118	40	117
Enero	80	128	70	107
Febrero	110	125	100	128
Marzo	20	132	40	141
Abril	120	144	120	115

Las precipitaciones acumuladas durante todo el mes de setiembre 2010 oscilaron entre 70-150 mm en todo el territorio nacional. Para la zona de Young las precipitaciones registradas fueron cercanas a la media histórica 1980-2009 del INIA, mientras que en Mercedes se registraron 30 mm por encima de dicha media. En los últimos 10 días del mes de setiembre las precipitaciones fueron más escasas y en los meses de octubre, noviembre y diciembre se registraron valores menores al 50% de la serie histórica en las dos localidades. Las lluvias acumuladas durante todo el mes de enero variaron en promedio entre 50 y 150 mm en el territorio nacional. En el litoral del país la variación registrada no fue tan amplia, y las precipitaciones registradas fueron 30% inferior a la media



histórica. Para el mes de febrero las lluvias si bien fueron aceptables, lo que permitió recuperar en relación a los meses anteriores el porcentaje de agua disponible promedio de los suelos, se registraron precipitaciones que fueron un 20% inferior a la media histórica. Por último para el mes de marzo las precipitaciones fueron escasas, por debajo de los 100 mm de la serie histórica 1980-2009.

## 4.2 EFECTOS DE LA FERTILIZACIÓN CON P, K Y S

### 4.2.1 Fertilización y rendimiento en grano

En el siguiente cuadro se muestra el rendimiento en grano (corregido al 13% de humedad) y el análisis estadístico para los diferentes sitios estudiados.

Cuadro 4. Rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) del cultivo de soja en cada sitio, según tratamiento.

Tratamientos	1	2	3	4	5	6	7	
	Gord	Isl	Mimb	Palm	ERF	ERR	Sau	
	Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )							
T	2549	2964	1510	2042	797	1250	1438	
P	2479	3649	1606	2094	731	1418	1488	
PK	2354	3235	1688	1815	946	1274	1628	
PKS	2432	3391	1757	2192	806	1243	1391	
	g							
	l				Pr>F			
Tratamientos	3	0.28	0.05	0.40	0.28	0.92	0.13	0.05
Repetición	2	0.75	0.02	0.47	0.08	0.68	0.61	0.42
Contrastes								
Control vs Resto	1	0.42	0.01	0.22	0.93	0.84	0.62	0.59
P vs PK y PKS	1	0.60	0.05	0.41	0.40	0.38	0.25	0.86
PK vs PKS	1	0.68	0.35	0.67	0.02	0.46	0.84	0.14

gl: grado de libertad

El rendimiento promedio entre todos los sitios fue de  $1863 \text{ kg ha}^{-1}$ , oscilando los rendimientos promedios a través de los sitios entre  $820 \text{ kg}$  y  $3310 \text{ kg/ha}$ . En general los rendimientos fueron bajos; solo tres de los siete sitios presentaron rendimientos promedios por encima de la media del rendimiento nacional para la zafra 2010-2011, que fue de  $1788 \text{ kg ha}^{-1}$  (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011).

Como se observa en la Figura 1 hay una relación positiva entre los rendimientos promedios de los testigos de cada sitio y los niveles iniciales de K intercambiable y el valor de pH, no siendo así con el nivel inicial de P disponible en el suelo. Los tres sitios que presentaron mayor rendimiento promedio fueron los que presentaron niveles de K intercambiable y pH inicial por encima o cercanos de los críticos (Cuadro 1). Estos fueron los Sitios 1, 2 y 4, con un rendimiento promedio de 2454, 3310 y 2036 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

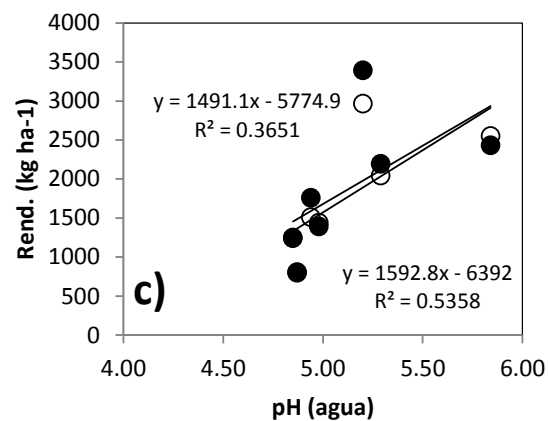
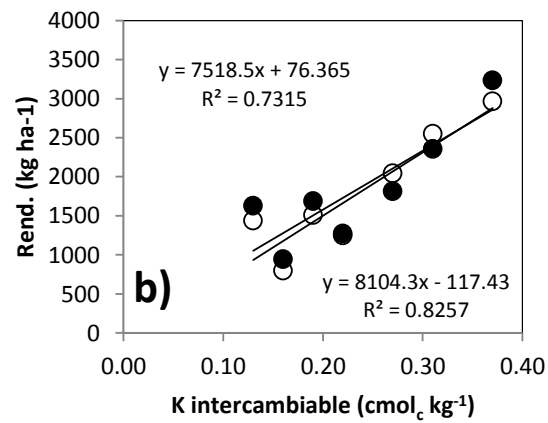
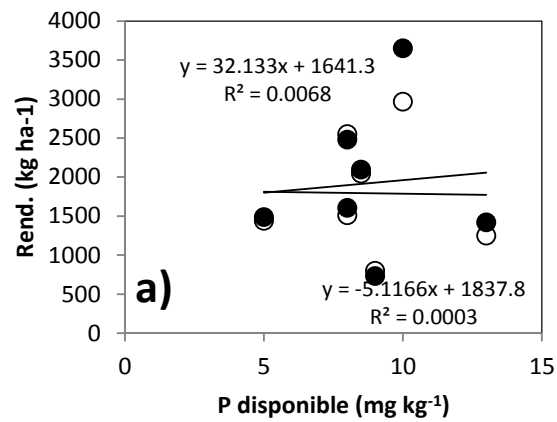


Figura 1. Relación entre rendimiento en grano y P disponible (a), K intercambiable (b) y pH en agua (c). Los círculos vacíos corresponden al tratamiento T y los llenos a los fertilizados con P, PK y PKS en a, b y c respectivamente.

Los valores graficados son los obtenidos de las muestras de suelo tomadas de 0 a 15 cm. Cuando se tiene en cuenta los valores obtenidos de las muestras de suelo de 15 a 30 cm para el caso de pH se mantiene la misma la relación que la obtenida para los valores de 0 a 15 cm. Para el caso del P la relación entre rendimiento y nivel inicial del nutriente de 15 a 30 cm mejora aunque sigue siendo baja. La relación entre rendimiento y K intercambiable baja al aumentar la profundidad de muestreo.

Como se observa en el Cuadro 4 solo dos Sitios respondieron en forma significativa a los diferentes tratamientos. Uno de ellos fue el Sitio 2 en el cual la media de los rendimientos de los tratamientos fertilizados se diferenció del testigo. Este Sitio fue el que presentó el mayor rendimiento promedio ( $3310 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y presentó como única limitante el valor inicial en suelo de P Bray No.1 ( $10 \text{ mg kg}^{-1}$ ), que estuvo por debajo de los niveles críticos sugeridos para este cultivo de  $12 \text{ mg kg}^{-1}$ . También el Sitio 4 aumentó de manera significativa el rendimiento del tratamiento PKS comparado con el tratamiento PK. El Sitio 4 presentó niveles iniciales de P Bray No.1 y K intercambiable por debajo de los críticos.

Debido a que en la mayoría de los sitios los niveles iniciales de K intercambiable y P Bray No.1 en el suelo estuvieron por debajo de los niveles de referencia, y al no encontrarse repuestas significativas al agregado de estos nutrientes en la mayoría de los Sitios, probablemente otras limitantes hayan afectado los rendimientos, dado que en general estos fueron bajos. Una de estas limitantes podría ser el bajo pH de los suelos o el factor clima, debido a las escasas precipitaciones ocurridas durante el período del cultivo que podrían haber limitado la absorción del fertilizante fosfatado y potásico agregado al voleo en la superficie del suelo.

Desde el punto de vista agronómico se observaron tendencias de aumentos de rendimientos en los tratamientos PK y PKS en relación a los testigos. El Sitio 2 que presentó respuesta significativa al agregado de P también aumentó los rendimientos para los tratamientos PK y PKS en 9 y 14% respectivamente. Los Sitios 3, 5 y 7 presentaron los menores niveles iniciales de K intercambiable también tendieron a aumentar los rendimientos con el tratamiento PK en un 12, 19 y 13% respectivamente. El Sitio 3 a su vez aumentó el rendimiento en un 16% comparando el testigo con el tratamiento PKS (Figura 1b). Los Sitios 3, 5 y 7 presentaron niveles de P Bray

No.1 y K intercambiable por debajo de los críticos, por lo tanto era esperable encontrar respuestas a las fertilizaciones. Estos aumentos no fueron suficientes para acercar los rendimientos a los de la media nacional obtenidos en la misma zafra.

Aun levantando las restricciones de los tres nutrientes en estudio los rendimientos siguen teniendo una alta relación con el pH del suelo, lo que podría estar indicando que este factor estaría limitando los rendimientos y las respuestas a las fertilizaciones (Figura 1 c).

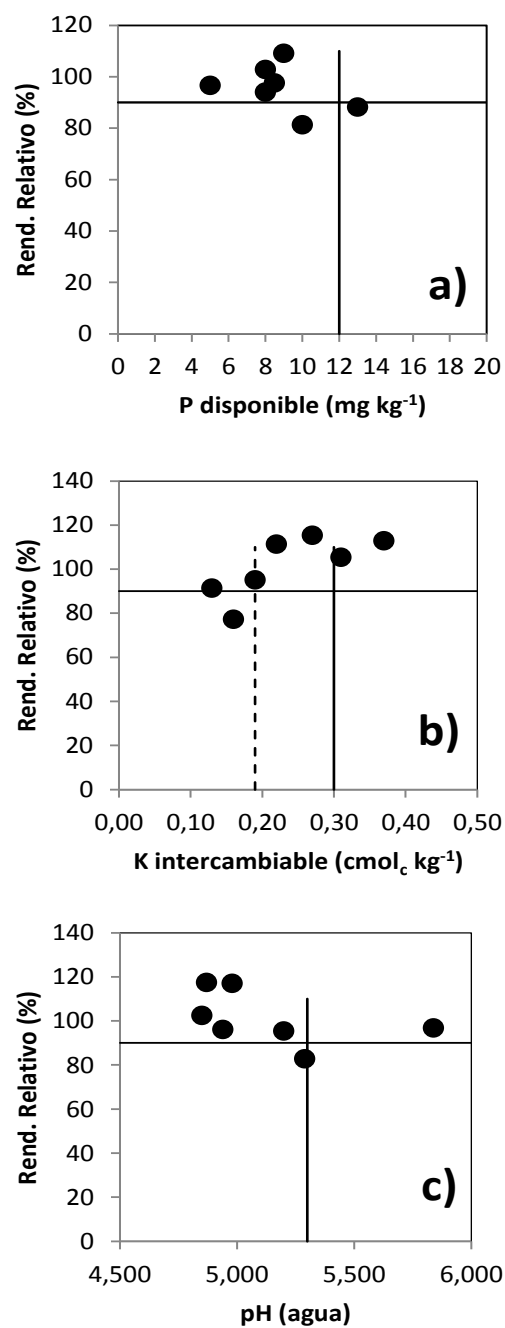


Figura 2. Relación entre rendimiento relativo y P disponible (a), K intercambiable (b) y pH en agua (c) de 0 a 15 cm. El rendimiento relativo es el rendimiento del testigo respecto al tratamiento P en a), del tratamiento P respecto al tratamiento PK en b) y del tratamiento PK respecto al tratamiento PKS en c). Las líneas enteras representan los valores de referencia y las cortadas los valores encontrados en este estudio.

En la Figura 2 se observan los rendimientos relativos en relación al P disponible, K intercambiable y pH agua inicial en el suelo para cada Sitio. El nivel crítico obtenido con los datos recabados en este estudio para K intercambiable es  $0,19 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Dicho valor considerablemente menor al valor utilizados como referencia en este trabajo. La separación en dos grupos de los datos de K intercambiable en el suelo se realizó utilizando el modelo gráfico propuesto por Cate y Nelson (1971), con un macro programado y usando la herramienta Solver del software de Microsoft Excel 1997 (Microsoft Inc.). El método de Cate y Nelson (1971) es el que mejor se adaptó a este set de datos, y divide la población de puntos en un grupo de alta respuesta (puntos debajo del nivel crítico) y un grupo de baja respuesta (puntos por encima del nivel crítico) maximizando el coeficiente de determinación mediante aproximaciones sucesivas de niveles críticos. El término rendimiento relativo usado en este caso se expresa como el rendimiento promedio de las parcelas fertilizadas con P en relación al promedio del rendimiento de las parcelas fertilizadas con PK, multiplicado por 100. Hay que tener en cuenta que los datos recabados en este trabajo son muy pocos y que las condiciones tanto de fertilidad del suelo como ambientales entre otras bajo las cuales se instalaron los ensayos y crecieron los cultivos no fueron las óptimas pudiendo limitar las respuestas de los mismos a los diferentes tratamientos.

#### 4.2.2 Fertilización y contenido de K en planta

En el Cuadro 5 se muestra el contenido de K foliar expresado como porcentaje de tejido seco para los tratamiento T y PKS en cada sitio evaluado.

Cuadro 5. Contenido de K (%) en planta a floración en cada sitio, según tratamiento.

No. Sitio	Sitio	Tratamientos	
		T	PKS
1	Gord	1,59 a	1,54 a
2	Isl	1,53 b	1,82 a
3	Mimb	1,65 a	1,91 a
4	Palm	1,63 b	2,02 a
5	ERF	0,64 b	1,42 a
6	ERR	2,11 a	2,10 a
7	Sau	0,96 b	1,52 a

Valores con una letra común en cada fila no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ )

La concentración promedio de K en hoja de todos los sitios fue de 1,6% y los promedios por sitio variaron desde 1,03 a 2,1%. Se registraron valores de

los testigos por debajo del valor de referencia (1,76%) sugerido para soja por Reuter y Robinson (1997) en seis de los siete sitios. Y solo en un sitio, el tratamiento testigo presentó niveles de K en planta por encima del crítico sugerido, por lo que sería esperable encontrar respuesta al agregado de nutrientes. También podría pensarse que las variedades actualmente usadas a nivel nacional presentan diferencias con las estudiadas en la obtención de los niveles de referencia, y por lo tanto, la eficiencia de utilización de nutrientes es diferente.

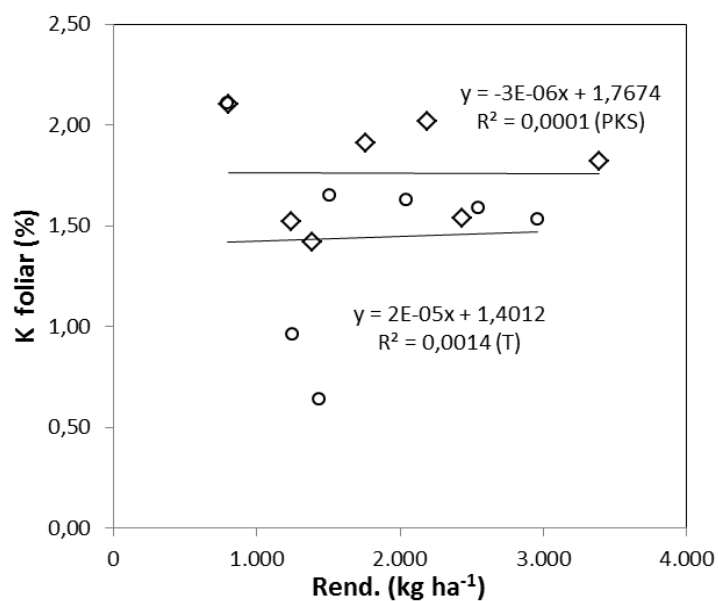


Figura 3. Relación entre el porcentaje de K foliar a floración y rendimiento en grano. Los círculos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS.



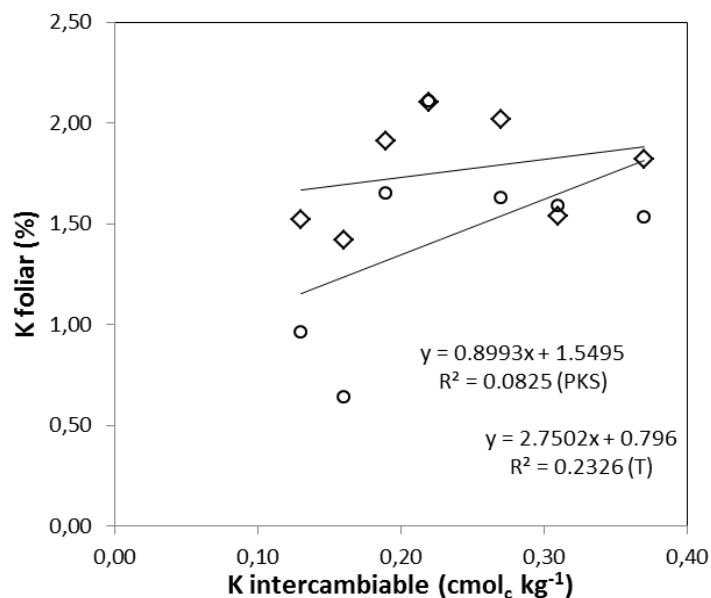


Figura 4. Relación entre el porcentaje de K foliar a floración y K intercambiable. Los círculos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS.

Como se observa en las Figuras 3 y 4 no se encontró una alta relación entre los niveles de K foliar y los niveles de K intercambiable inicial en suelo y tampoco con el rendimiento a pesar de la alta relación encontrada entre K intercambiable inicial en suelo y rendimiento.

El agregado de nutrientes aumentó la concentración de K foliar en cuatro sitios. En general, se observó respuesta en la concentración de K en hoja en los sitios que presentaron menor K intercambiable inicial (Figura 4).

Los Sitios 5 y 7 fueron los que más respondieron a la fertilización. Estos dos sitios fueron los que registraron menores valores de K intercambiable inicial en suelo (0,16 y 0,13 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> respectivamente) y menores niveles promedios de K en planta. En ambos sitios la concentración de K en planta fue inferior al valor crítico tanto para el tratamiento testigo como para PKS, indicando que aun con el agregado de los diferentes nutrientes no se llegó al nivel deseado y a pesar de las respuestas los rendimientos igual fueron bajos.

Los Sitios 2 y 4 con niveles iniciales de K intercambiable de 0,37 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> y 0,27 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, respectivamente también respondieron en forma

significativa a la fertilización permitiendo aumentar los niveles de K hoja por encima del nivel crítico considerado.

Los Sitios 1 y 3 presentaron niveles de K en planta por debajo del crítico en el testigo pero no tuvieron respuesta estadísticamente significativa a la fertilización. A pesar de esto el Sitio 3 presentó aumentos de la concentración foliar de K con la fertilización permitiendo alcanzar el nivel crítico de referencia.

El Sitio 6, con un inicial de  $0,22 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de K intercambiable, fue el único sitio en el cual el tratamiento Testigo presentó niveles de K en planta por encima del crítico y no respondió a la fertilización manteniendo altos los niveles de K en planta.

Las mayores respuestas ocurrieron en los Sitios con los niveles de K intercambiable iniciales más bajos, pero las respuestas no alcanzaron para elevar los niveles de concentración foliar de K hasta el crítico y no se tradujeron en aumentos de los rendimientos. Los Sitios 2, 3 y 4 fueron los Sitios que aumentaron los rendimientos con el tratamiento PKS y también aumentaron las concentraciones de K en planta con este tratamiento alcanzado el nivel crítico en los tres casos.

#### 4.2.3 Fertilización y contenido de K intercambiable en suelo a inicio de floración

En el Cuadro 6 se presentan los datos de K intercambiable en suelo de muestras tomadas a floración del cultivo de soja, de 0 a 15 cm de profundidad.

Cuadro 6. Incremento de K intercambiable en el suelo entre la aplicación de fertilizantes a siembra e inicio de floración del cultivo de soja.

No. Sitio	Sitio	Tratamientos		Ecuación	Eq. Fertilizante
		T (0 K <sub>2</sub> O)	PKS (120 K <sub>2</sub> O)		
2	Isl	0,35	0,48	$y = 0,001x + 0,3533$	100
5	ERF	0,14	0,25	$y = 0,0009x + 0,1433$	111
6	ERR	0,24	0,33	$y = 0,0007x + 0,24$	143
7	Sau	0,15	0,28	$y = 0,0011x + 0,1467$	91

En todos los sitios el agregado de K incrementó el dato del análisis de suelos, como era de esperar. El agregado de 120 kg/ha de  $K_2O$  (100 Kg de K) incrementó el valor de K intercambiable entre 0.09 y 0.13 meq/100 g, con un promedio de 0.12 meq/100 g. Con estos datos, usando las ecuaciones que figuran en el Cuadro 6 se calculó el equivalente fertilizante, definido como la cantidad necesaria de  $K_2O$  para elevar en una unidad el análisis de suelo. En el promedio de los cuatro sitios, el equivalente fertilizante encontrado para K fue de 111 kg/ha de  $K_2O$ , con un rango de entre 91 y 143 kg/ha. Este valor promedio es algo superior al teórico a 15 cm ( $88 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

#### 4.2.4 Fertilización y contenido de P en planta

En el Cuadro 7 se muestra el contenido de P foliar expresado como porcentaje de tejido seco para los tratamiento T y PKS en cada sitio evaluado.

Cuadro 7. Contenido de P (%) en planta a floración en cada sitio, según tratamiento.

No. Sitio	Sitio	Tratamientos	
		T	PKS
1	Gord	0,13 a	0,14 a
2	Isl	0,21 a	0,24 a
3	Mimb	0,19 a	0,22 a
4	Palm	0,19 b	0,27 a
5	ERF	0,23 a	0,22 a
6	ERR	0,28 a	0,29 a
7	Sau	0,23 a	0,21 b

Valores con una letra común en cada fila no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ )

La concentración promedio de P en hoja de todos los sitios fue de 0,22% con un rango promedio por sitio de 0,14 a 0,29%. Excepto en el Sitio 6 las concentraciones foliares de P de los testigos estuvieron por debajo de las críticas de 0,24% (Reuter y Robinson, 1997) por lo que, basado en este análisis, podría haberse esperado encontrar respuesta al agregado de P.

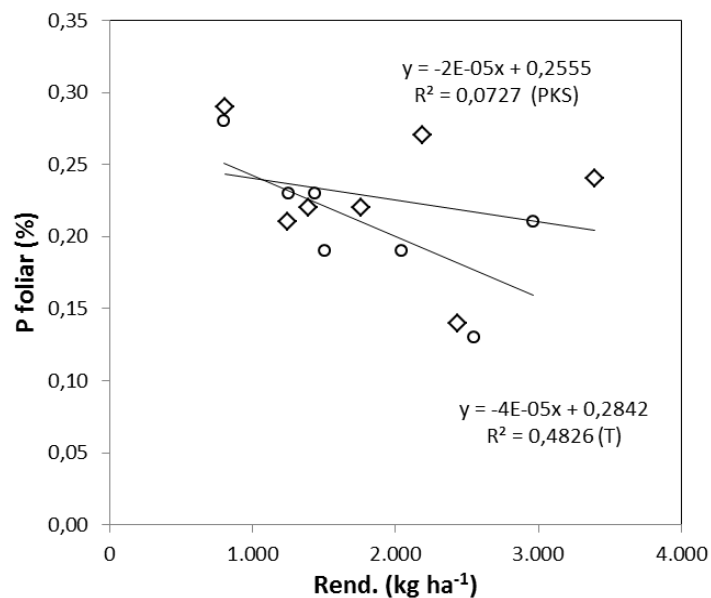


Figura 5. Relación entre el porcentaje de P foliar a floración y rendimiento en grano. Los círculos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS.

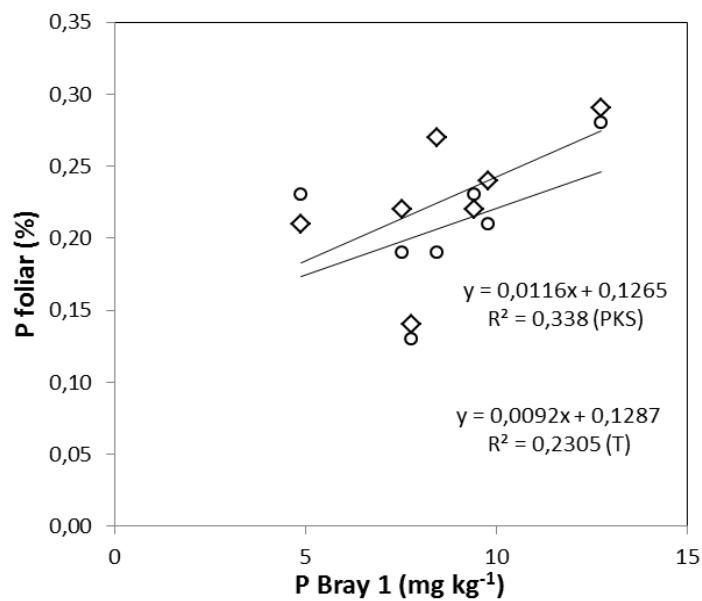


Figura 6. Relación entre el porcentaje de P foliar a floración y P Bray 1. Los círculos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS.

En la Figura 6 se puede observar que existió una relación positiva entre la concentración de P foliar y P disponible. Pero la relación entre P foliar y rendimiento fue con tendencia negativa, pudiendo explicarse esto por una dilución del P en planta a medida que aumentan los rendimientos debido a un mayor crecimiento de las plantas (Figura 5).

En lo que refiere a la respuesta a los diferentes tratamientos solo en uno de los siete sitios se encontró aumentos significativos en el nivel de P en planta con el agregado de nutrientes. En el Sitio 4 el tratamiento PKS se diferenció estadísticamente del testigo. Este sitio presentó un nivel inicial de P en suelo de  $9 \text{ mg kg}^{-1}$  y el porcentaje de P en planta para el testigo estuvo por debajo del nivel crítico considerado, permitiendo el aumento de los niveles de P en planta sobrepasar dicho nivel crítico.

En otros sitios aunque no hubo respuestas significativas ocurrieron tendencias en aumentar los niveles de P en planta, estos fueron los Sitios 2 y 3. La fertilización permitió alcanzar en el Sitio 2 el nivel crítico de P en hoja así como también ocurrió para el K. En el Sitio 3 la concentración de estos nutrientes en planta tendieron a aumentar, aunque no se logró alcanzar los niveles críticos sugeridos.

En el Sitio 1 no hubo respuesta significativa a la fertilización como se hubiera esperado debido al bajo % de P foliar.

Los Sitios 5 y 7, ambos con los niveles más altos de P en planta en los tratamientos testigos (0,23%), y apenas por debajo del crítico, no presentaron respuesta a la fertilización.

Los Sitios 2, 3 y 4 fueron los Sitios que aumentaron los rendimientos con el tratamiento PKS y también aumentaron las concentraciones de P en planta con este tratamiento alcanzado el nivel crítico en los Sitios 2 y 4.

#### 4.2.5 Fertilización y contenido de P en suelo a inicio de floración

En el Cuadro 8 se presentan los datos de P en suelo, según el análisis de las muestras obtenidas al momento del muestreo foliar en floración de cuatro sitios muestreados en las parcelas testigos y las fertilizadas con P, K y S.

---

Cuadro 8. Incremento de P en el suelo entre la aplicación de fertilizantes a siembra e inicio de floración del cultivo de soja.

No. sitio	Sitio	Tratamientos		Ecuación	Eq. Fertilizante
		T (0 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	PKS (46 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )		
2	Isl	10,5	20,7	$y = 0,2218x + 10,462$	4,5
5	ERF	14	20	$y = 0,1294x + 14,008$	7,7
6	ERR	14,4	18,6	$y = 0,0922x + 14,385$	11
7	Sau	9,3	12,5	$y = 0,0699x + 9,2538$	14,3

En todos los sitios el agregado de P incrementó el dato del análisis de suelos. El agregado de 46 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> incrementó de 3,2 a 10,2 mg/kg el valor de P disponible medido con el método Bray No.1, con un promedio de 6 mg/kg. Con estos datos, usando las ecuaciones que figuran en el Cuadro 8 se calculó el equivalente fertilizante, definido como la cantidad necesaria de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para elevar en una unidad el análisis de suelo.

En este caso el valor promedio fue de 9,4 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha para elevar 1 mg/kg dentro del rango de 4,5 a 14,3 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Este equivalente fertilizante promedio para P es similar a los valores promedio manejados actualmente en las recomendaciones de fertilización fosfatada.

#### 4.2.6 Fertilización y contenido de S en planta

Cuadro 9. Contenido de S (%) en planta a floración en cada sitio, según tratamiento.

No. Sitio	Sitio	Tratamientos	
		T	PKS
2	Isl	0,34	0,36
3	Mimb	0,4	0,44
4	Palm	0,36	0,41
5	ERF	0,37	0,4
6	ERR	0,33	0,42
7	Sau	0,4	0,41

En el Cuadro 9 se presentan los datos obtenidos de concentración de S en planta en R1/R2. En todos los sitios los tratamientos presentaron niveles de

S en planta por encima del considerado crítico (0,20%) y se incrementó el contenido de S en planta con el tratamiento PKS en relación al testigo, variando dicho incremento desde un 3% en el Sitio 7 a un 27% en el Sitio 6. Los Sitios 4 y 6 fueron los que presentaron los mayores aumentos de S en planta con el tratamiento PKS (14 y 27%, respectivamente). En los restantes sitios los incrementos de S en planta con el tratamiento PKS respecto del testigo fueron del 10% en el Sitio 3, 8% en el Sitio 5, 6% en el Sitio 2 y 3% en el Sitio 7. No se pudo realizar análisis estadístico para S porque sólo se analizó una parcela por tratamiento.

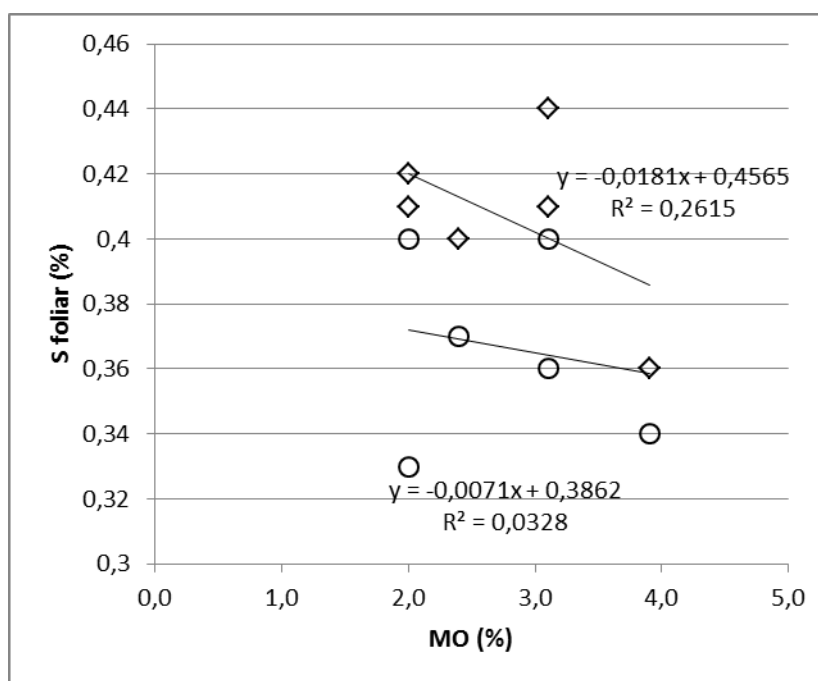


Figura 7. Relación entre el porcentaje de S foliar a floración y MO en suelo al momento de la instalación de los ensayos. Los círculos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS.

Como se observa en las Figura 7 en general no hay relación positiva entre el porcentaje de S foliar y el % de materia orgánica en suelo. Cuando se encuentra alta relación esta es negativa.

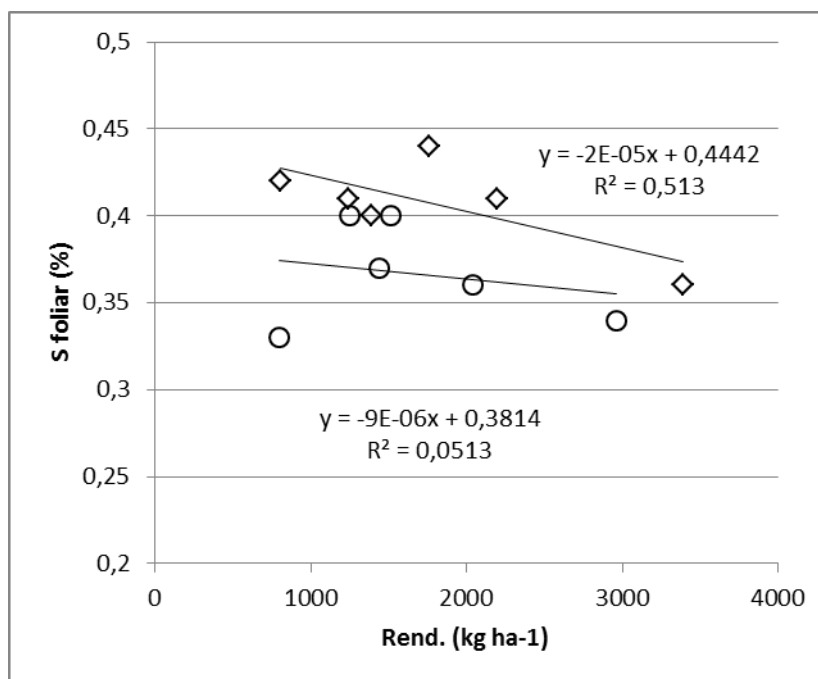


Figura 8. Relación entre el porcentaje de S foliar a floración y rendimiento en grano. Los círculos corresponden al tratamiento T y los rombos a los fertilizados con PKS.

Como se observa en la Figura 8 la relación entre la concentración de S en planta y los rendimientos para el tratamiento PKS para todos los sitios también fue alta y negativa, es decir que cuando más alto el valor de S en planta menor el rendimiento.

Tanto este resultado como el observado de la relación negativa entre el contenido de S en planta y la materia orgánica en suelo parecen indicar que hubo un efecto de dilución del S. Esto implica que a mayor crecimiento y por lo tanto mayor rendimiento la misma cantidad de S absorbido se diluyó, disminuyendo su concentración foliar.



## 5. CONCLUSIONES

Los rendimientos en general fueron bajos debido fundamentalmente al efecto año, que se caracterizó por presentar un importante período de sequía durante el crecimiento de los cultivos. Se encontró una relación positiva entre los rendimientos promedios de los testigos de cada sitio y los niveles iniciales de K intercambiable y el valor de pH, no siendo así con el nivel inicial de P disponible en el suelo. Los tres sitios que presentaron mayor rendimiento promedio fueron los que presentaron niveles de K intercambiable y pH inicial por encima o cercanos de los críticos.

Pese a que los niveles iniciales de P y K en suelo fueron menores a los valores de referencia (12-13 mg kg<sup>-1</sup> de P Bray-1 y 0,30 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de K), se encontró solo respuesta estadísticamente significativa a P en relación al testigo en el Sitio 2 y a PKS en relación a PK en el Sitio 4. El sitio 2 presentó 10 ppm de P inicial en suelo, no presentó ninguna otra limitante desde el punto de vista nutricional y obtuvo altos rendimientos en grano. El Sitio 4 presentó niveles iniciales de P Bray No.1 y K intercambiable por debajo de los críticos.

Comparando los rendimientos de los testigos con los fertilizados, se encontraron tendencias a aumentar los rendimientos con el tratamiento PK en los sitios con menores niveles de K intercambiable inicial.

Los sitios que tendieron a aumentar los rendimientos con el tratamiento PKS, presentaron un aumento en la concentración de K y P foliar con el mismo tratamiento sobrepasando los niveles de referencia para dichos nutrientes en la mayoría de los casos.

En todos los sitios se incrementó el contenido de S en planta con el tratamiento PKS en relación al testigo. La relación entre la concentración de S en planta y los rendimientos en general fue alta y negativa para el tratamiento PKS indicando un efecto de dilución.

Aun levantando las restricciones de P, K y S, los rendimientos son bajos y presentan una alta relación con el pH en suelo, por lo que esta sería una limitante a levantar antes de esperar respuestas a la fertilización.

La dosis para aumentar el nivel de nutrientes en el suelo fue de 111 kg/ha de K<sub>2</sub>O para elevar 0.1 cmol<sub>c</sub> Kg<sup>-1</sup> de K intercambiable y 9,4 Kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha para elevar 1 ppm el P Bray No.1 del suelo a inicio de floración en los

primeros 15 cm de suelo. En el primer caso fue algo mayor que la dosis teórica y en el segundo caso fue similar a lo reportado para este nutriente.

Probablemente la falta de respuesta al agregado de nutrientes se deba no sólo a la falta de agua ocurrida durante esa zafra, sino también a otras limitantes como el bajo pH del suelo, por ejemplo.

## 6. RESUMEN

Durante la zafra de verano 2010/11 se instalaron siete experimentos de respuesta a P, K y S en cultivos de soja con el objetivo de corregir situaciones con alta probabilidad de deficiencias a estos nutrientes. Estos ensayos se ubicaron en chacras comerciales de suelos agrícolas del litoral oeste cuyos suelos fueron identificados como problemáticos mediante un relevamiento nutricional de cultivos de soja bajo siembra directa realizado previamente. En todos los sitios se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los tratamientos fueron: a) un testigo, sin aplicación de fertilizantes, manejado como el resto de la chacra; b) agregado de P (46 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> aplicado como supertriple); c) agregado de P y K (46 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> y 120 kg de  $K_2O$  ha<sup>-1</sup>, aplicado como supertriple y KCl) y d) agregado de P, K y S (46 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup>, 24 kg de S y 120 kg de  $K_2O$ , ha<sup>-1</sup>, aplicados como superfosfato común y KCl). Previo a la instalación de los tratamientos se tomaron muestras compuestas de suelos, al estado R1/R2 se tomaron muestras de hojas, la cosecha de los ensayos se realizó cortando con tijeras 2,28 m<sup>2</sup> por parcela y simultáneamente al muestreo foliar se realizó un muestreo de suelos en las parcelas testigo y en los tratamientos PKS. A priori se observó que en la mayoría de los sitios existiría al menos una limitante para el normal crecimiento del cultivo, ya sea por deficiencia de alguno de los nutrientes en estudio o limitantes indirectas por bajo pH. En general los rendimientos fueron bajos y variados entre sitios. Se encontró una alta y positiva relación entre los rendimientos y el K intercambiable y pH inicial. Solo dos Sitios respondieron en forma significativa a los diferentes tratamientos. Uno de ellos fue el Sitio 2 en el cual la media de los rendimientos de los tratamientos fertilizados se diferenció del testigo. Este sitio fue el que el de mayor rendimiento promedio y la única limitante que presentó fue el nivel inicial de P Bray No.1. El Sitio 4 aumentó de manera significativa el rendimiento del tratamiento PKS comparado con el tratamiento PK, el mismo presentó niveles iniciales de P Bray No.1 y K intercambiable por debajo de los críticos. Para la concentración de K y P foliar se registraron valores de los testigos por debajo del valor de referencia en seis de los siete sitios. Las mayores respuestas en la concentración de K foliar al tratamiento PKS en relación al testigo ocurrieron en los Sitios con los niveles de K intercambiable iniciales más bajos, pero las respuestas no alcanzaron para elevar los niveles de concentración foliar de K hasta el crítico y no se tradujeron en aumentos de los rendimientos. Los Sitios

que aumentaron los rendimientos con el tratamiento PKS, también aumentaron las concentraciones de K en planta con este tratamiento alcanzado el nivel crítico en los tres casos. Los 3 Sitios que aumentaron los rendimientos con el tratamiento PKS, también aumentaron las concentraciones de P en planta con este tratamiento alcanzado el nivel crítico en 2 de los dichos Sitios. Todos los sitios presentaron niveles de S en planta por encima del considerado crítico y en todos los sitios se incrementó el contenido de S en planta con el tratamiento PKS en relación al testigo. Se observó un efecto de dilución del P y S en planta a medida que aumentaban los rendimientos. En promedio fueron necesarios 111 kg/ha de  $K_2O$  para elevar  $0.1 \text{ cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$  de K intercambiable y 9,4 Kg de  $P_2O_5$ /ha para elevar 1 ppm el P Bray No.1 del suelo a inicios de floración en los primeros 15 cm de suelo.

Palabras clave: Fósforo; Potasio; Azufre; Siembra Directa; Deficiencias de nutrientes; Respuesta a la fertilización; Dilución.

## 7. SUMMARY

During the summer harvest 2010/11 seven experiments in response to P, K and S were installed in soybean crops in order to correct situations with high probability of these nutrient deficiencies. These experiments were located on commercial farms in agricultural soils of the west coast where soils were identified as problematic by a nutritional survey made in soybean under no-tillage. Everywhere design randomized complete block with three replications was used. The treatments were: a) a control without fertilizer application, handled like the rest of the farm; b) addition of P (46 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> applied as supertriple c) addition of P and K (46 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 120 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, applied as supertriple and KCl) and d) addition of P, K and S (46 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, 24 kg S and 120 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, applied as common superphosphate and KCl). Prior to installation of the treatments soil composite samples were taken, the state R1/R2 Leaf samples were taken, the field trial was conducted snipping 2.28 m<sup>2</sup> per plot and simultaneously to foliar sampling and harvest conducted a soil sampling in the control plots and the PKS treatments. A priori it was observed that in most sites exist at least for normal growth limiting crop either deficiency of nutrients in any study or indirect by limiting low pH. Overall yields were low and varied between sites. Was found a high and positive relationship between yields and initial K and ph. Only two sites responded significantly to different treatments. One was the Site 2 in which the average of the yields of the fertilized treatments differed from the control. This site was the highest average performance and the only limitation was the initial level of P Bray No.1. Site 4 increased significantly the performance of PKS treatment compared with PK treatment; it presented initial levels to P and K below the critical. For the concentration of K and P foliar were recorded control values below the reference value in six of the seven sites. The highest responses in foliar K concentration of the PKS treatment than the control occurred in the sites with exchangeable K levels lower down, but the answers were not enough to raise levels of foliar K concentration to the critical and not they resulted in yield increases. Sites that increased yields with PKS treatment also increased concentrations of K in this treatment plant reached a critical level in all three cases. The 3 sites that boosted yields to the PKS treatment also increased the concentrations of P in plant with this treatment en2 reached the critical level of such sites. All sites had levels of S in plant above considered critical and everywhere S content increased plant with PKS than the control treatment. A dilution effect of P and S

as increased plant yields was observed. On average it took 111 kg / ha of K<sub>2</sub>O to raise 0.1 cmol kg<sup>-1</sup> K intercambiabile and 9.4 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha to raise 1 ppm P Bray No.1 in the first 15 cm of soil to early flowering.

Keywords: Phosphorus; Potassium; Sulfur; no-tillage; Nutrient deficiencies; Response to fertilization; Dilution.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. ABELLA, M.; NIN, A. 2003. Evolución en las formas y contenidos de fósforo del suelo bajo sistemas de rotaciones de pasturas y cultivos con laboreo convencional y siembra directa. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 65 p.
2. ACKERMANN, P.; GASPARRI, N. 2011. Efecto de la intensidad de uso agrícola del suelo sobre el balance de nitrógeno, fósforo y potasio. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 72 p.
3. ALMADA, P. 2006. Fertilización P y K de maíz en 3 suelos de durazno. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 67 p.
4. ARMSTRONG, D. 1999. Better crops with plant food. Phosphorus for Agriculture. 83 (1): 3-39.
5. BAIGORRI, H.; SALADO NAVARRO, L. 2012. El cultivo de soja en Argentina. Buenos Aires, Agroeditorial. 400 p.
6. BARBAZÁN, M.; FERRANDO, M.; ZAMALVIDE, J. 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay. Agrociencia (Montevideo). 11 (1): 1-13.
7. \_\_\_\_\_.; BAUTES, C.; BEUX, L.; BORDOLI, M.; CANO, J.; ERNST, O.; GARCÍA LAMOTHE, A.; GARCÍA, F.; QUINCKE, A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay; rendimiento según análisis de suelos. Agrociencia (Montevideo). 15(2): 93-99.
8. \_\_\_\_\_.; BORDOLI, M.; COITIÑO, J.; DEL PINO, A.; HOFFMAN, E.; MAZZILLI, S. 2013. Efectos de la aplicación de potasio en suelos de Uruguay; avances. In: Simposio Potasio en Sistemas Agrícolas de Uruguay (1º, 2013, Mercedes, Soriano, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 33-38.
9. BAUTES, C.; BARBAZÁN, M.; BEUX, L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre areniscas

cretácicas y transicionales. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 41: 1-8.

10. BORDOLI, J. M.; MALLARINO, A. P. 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agronomy Journal*. 90: 27-33.
11. \_\_\_\_\_. 2001. Dinámica de nutrientes y fertilización en siembra directa. *In*: Díaz Rosselló, R. coord. *Siembra directa en el cono Sur*. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 298-297 (Serie Documentos).
12. \_\_\_\_\_.; BARBAZÁN, M. M.; ROCHA, L. 2013. Relevamiento nutricional del cultivo de soja en Uruguay. *In*: Simposio Potasio en Sistemas Agrícolas de Uruguay (1°, 2013, Mercedes, Soriano, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 24-32.
13. CALVO, N.; ECHEVERRÍA, H. 2009. Azufre; marco conceptual para definir las mejores prácticas de manejo en los cultivos. *In*: Simposio Fertilidad 2009; Mejores Prácticas de Manejo para una Mayor Eficiencia en la Nutrición de Cultivos (2009, Rosario, Argentina). Trabajos presentados. Acassuso, International Plant Nutrition Institute. pp. 52-59.
14. CANO, J.; ERNST, O.; GARCÍA, F. 2007. Respuesta a la fertilización potásica en maíz para grano en suelos del noroeste de Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 36: 9-12.
15. CASANOVA, O. 1996. Potasio; consideraciones sobre su situación en el Uruguay. *In*: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. *Manejo y fertilidad de suelos*. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 57-61 (Serie Técnica no. 76).
16. \_\_\_\_\_.; FERRANDO, M. 2003. Cuantificación mediante lisímetros del lavado de bases en suelos, bajo dos regímenes hídricos. *Agrociencia (Montevideo)*. 7(2): 39 - 48.
17. CASTRO, J.; DE ZAMUZ, E.; OUDRI, N. 1981. Guía para la fertilización de pasturas. *Miscelánea CIAAB*. no. 37: 1-15.



18. CAULIN, M.; CABRERA, M. 1978. Respuesta de la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) a la fertilización NPK en el área de influencia de ARINSA. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 100 p.
19. CERVEÑANSKY, A. 2000. Azufre. Montevideo, Facultad de Agronomía. 26 p.
20. CIAMPITTI, I.; GARCÍA, F. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 33: 13-16.
21. \_\_\_\_\_. 2009a. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. Tesis MSc. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 116 p.
22. \_\_\_\_\_.; RUBIO, G.; PICONE, L.; GARCÍA, F. 2009b. El fósforo en la agricultura: Mejores Prácticas de Manejo (MPM). *In*: Simposio Fertilidad 2009; Mejores Prácticas de Manejo para una Mayor Eficiencia en la Nutrición de Cultivos (2009, Rosario, Argentina). Trabajos presentados. Acaasuso, International Plant Nutrition Institute. pp. 35-51.
23. COITIÑO, J.; MAZZONI, P. 2011. Respuesta a la fertilización con fosforo, potasio y azufre en trigo en ambientes con diferente potencial de producción dentro de una misma chacra. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 59 p.
24. COLLARES, L. 1996. Evaluación de fuentes de fósforo sobre dos suelos con pasturas convencionales. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 125 p.
25. COLOMBO, M.; COLLARES, J. R. 1982. Efecto del encalado y fertilización PK en suelos arenosos ácidos. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 194 p.
26. CONTI, M. 2002. Dinámica de liberación y fijación de Potasio en el suelo. Buenos Aires, Argentina, UBA. Facultad de Agronomía. Cátedra de Edafología. 14 p.

27. DAMBRAUSKAS, D.; FABBIANI, F. 1984. Efecto de dosis y formas de aplicación del fertilizante fosfatado sobre el crecimiento y producción de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 158 p.
28. DOCAMPO, R.; 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. Facultad de Agronomía. 106 p.
29. EDMEADES, D.; MORTON, J.; WALLER, J.; METHERELL, A.; ROBERTS, A.; CAREY, P. 2010. The diagnosis and correction of potassium deficiency in New Zealand pastoral soils; a review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 53 (2): 151-173.
30. ERRO, J.; MOLLER, R.; SAAVEDRA M. 2012. Respuesta al agregado de fósforo en soja de segunda. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 78 p.
31. ESCUDERO, J.; MORÓN, A. 1978. Caracterización de la capacidad de fijación de fósforo de distintos suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 100 p.
32. ESPÍNOLA, A. 1980. Respuesta del cultivo de papa a la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 118 p.
33. EVANGELOU, V.P. 1998. *Environmental soil and water chemistry; principles and applications*. New York, Wiley Interscience. 592 p.
34. FAGGIONATO, R. 2011. Equivalente fertilizante de potasio para algunos suelos agrícolas de Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 70 p.
35. GARCÍA, A.; QUINCKE, A. 2009. Respuesta a la fertilización con azufre en trigo y cebada. *In: Jornada de Cultivos de Invierno (2009, La Estanzuela, Mercedes, Uruguay). Memorias*. Montevideo, INIA. pp. 9-12 (Actividades de Difusión no. 566).

36. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2011a. El azufre en cereales de invierno; resumen de resultados experimentales y repaso de la teoría. In: Jornada de Divulgación Aportes a la Zafra de Cultivos de Invierno (2011, La Estanzuela, Durazno, Uruguay). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 33-36 (Actividades de Difusión no. 646).
37. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; PEREYRA, S.; ACKERMANN, M. 2011b. Respuesta a cloruro de potasio (KCl) en trigo y cebada. In: Jornada de Divulgación Aportes a la Zafra de Cultivos de Invierno (2011, La Estanzuela). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 37-42 (Actividades de Difusión no. 646).
38. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2012. El potasio (K) en la producción de cultivos de invierno. In: Jornada de Cultivos de Invierno (2012, Soriano, Uruguay). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 9-14 (Actividades de Difusión no. 677).
39. GARCÍA, F. 2005. Soja; criterios para el manejo de la fertilización del cultivo. INPOFOS Cono Sur. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 27:1-6.
40. GARCÍA PRÉCHAC, F.; CIAMPITTI, I.; BAIGORRI, E. 2009. Manual de manejo del cultivo de soja. Acassuso, Buenos Aires, IPNI Cono Sur. 190 p.
41. \_\_\_\_\_.; ERNST, O.; ARBELETICHE, P.; PEREZ, M.; PRITSCH, C.; FERENCZI, A.; RIVAS, M. 2010. Intensificación agrícola; oportunidades y amenazas para un país productivo y natural. Montevideo, Universidad de la República. CSIC. 126 p.
42. GIMENÉZ, A.; URRESTARAZÚ, R. 1979. Efecto del encalado y la fertilización fosfatada en la producción de soja en suelos arenosos. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 86 p.
43. HERNÁNDEZ, J. 1983. Capacidad de suministro de Potasio en suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 240 p.

44. \_\_\_\_\_.; CASANOVA, O.; ZAMALVIDE, J. P. 1988. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía (Montevideo). Boletín de Investigación no. 19. 20 p.
45. \_\_\_\_\_. 1992. Potasio. Montevideo, Facultad de Agronomía. 35 p.
46. \_\_\_\_\_.; OTEGUI, O.; ZAMALVIDE, J. 1995. Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía (Montevideo). Boletín de Investigación no. 43. 32 p.
47. \_\_\_\_\_. 1999. Fósforo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 89 p.
48. \_\_\_\_\_. 2004. Métodos para estimar la disponibilidad de fósforo en los suelos. In: Seminario de Actualización Técnica; Fertilización Fosfatada de Pasturas en la Región Este (2004, INIA Treinta y Tres). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 11-19 (Actividades de Difusión no. 356).
49. MALLARINO, A.; BORDOLI, J.; BORGES, R. 1999. Phosphorus and potassium placement effects on early growth and nutrient uptake of no-till corn and relationships with grain yield. *Agronomy Journal*. 91: 37-45.
50. MARELLA, G.; CROSA, A.; BORDABERRY, J. 1981. Respuesta de la soja a la fertilización fosfatada y potásica. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 191 p.
51. MENGEL, K.; KIRKBY, E. 1982. Principles of plant nutrition. Bern, International Potash Institute. 655 p.
52. MILIAN, A. 1974. Efecto del N P y K en la producción de semilla de *Festuca arundinacea* Schreb y *Phalaris tuberosa* L. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 94 p.
53. MOIR, T.; REYNAERT, E. 1962. Ensayos de fertilización de cultivos. Montevideo, Ministerio de Ganadería y Agricultura. Comisión Honoraria del Plan Agropecuario. 52 p.
54. MORÓN, A. 1992. El fósforo en el sistema suelo-planta. *Investigaciones Agronómicas*. no. 1: 45-60.

55. \_\_\_\_\_.; BAETHGEN, W. 1996. Relevamiento de la fertilización de los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Montevideo, INIA. 15 p. (Serie Técnica no. 73).
56. \_\_\_\_\_.; MORÓN, A. 2005. Informe de resultados de la red de ensayos de fertilización de soja. In: Jornada Técnica de Cultivos de Verano (2005, lugar de realización). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 53-60 (Actividades de Difusión no. 417).
57. \_\_\_\_\_.; 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). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 5-9 (Actividades de Difusión no. 605).
58. OUDRI, N.; CASTRO, J.; DOTI, R.; SECONDI DE CARBONELL, A. 1976. Guía para fertilización de cultivos. Montevideo, MAP. 46 p.
59. PEREIRA, G.; TEIXEIRA, M.; VERCELLINO, A. 1983. Efecto residual del encalado y la fertilización fosfatada en suelos arenosos ácidos (cultivo de soja). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 190 p.
60. REUTER, D.; ROBINSON, J. 1997. Plant analysis; an interpretation manual. Victoria, Australia, CSIRO. 572 p.
61. SAWYER, J. E.; MALLARINO, A. P; KILLORN, R.; BARNHART, S. K. 2002. A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa. Ames, Iowa State University. 19 p. (Extension Publication Pm-1688).
62. SCHOENAU, J.; MALHI, S. 2008. Sulfur forms and cycling processes in soil and their relationship to sulfur fertility. In: Jez, J. ed. Sulfur; a missing link between soils, crops, and nutrition. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 1-10 (Agronomy no. 50).
63. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES ESTADÍSTICAS AGROPECUARIAS. 2004. Anuario estadístico agropecuario 2003. Montevideo. 240 p.

- 64.\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2011. Anuario estadístico agropecuario 2010. Montevideo. 240 p.
- 65.VOSS, R. 1982. General guide for fertilizer recommendations in Iowa. Ames, Iowa, Iowa State University. 12 p. (Publ. AG-65).
- 66.YACOBAZZO de DÍAZ, M. 1971. Nivel óptimo económico de NPK en remolacha azucarera en le zona de Paysandú. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 34 p.
- 67.ZAMALVIDE, J. 1992. Dinámica de fósforo en los suelos con especial referencia a la disponibilidad en rotaciones de cultivos y pasturas. Investigaciones Agronómicas. no. 1: 85-93.
- 68.\_\_\_\_\_. 1995. Deficiencias de azufre en suelos del Uruguay. Revista del Plan Agropecuario. 23 (67): 48.