

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN CON POTASIO, MAGNESIO Y ZINC EN
CULTIVOS DE SOJA Y SORGO**

por

**Ruben LAPAZ FIGUEREDO
Gilton GONNET PINTALUBA
Martín SUÁREZ GONZÁLEZ**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2014**

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. (Ph.D.) Mónica Barbazán

Ing. Agr. (M.Sc) Marcelo Ferrando

Ing. Agr. (M.Sc) Jorge Hernández

Fecha: 28 de agosto de 2014

Autor: -----
Ruben Lapaz Figueredo

Gilton Gonnet Pinaluba

Martín Suárez González

AGRADECIMIENTOS

A la Ing. Agr. Mónica Barbazán por darnos la oportunidad de poder realizar el trabajo final bajo su tutoría.

A los productores que permitieron que realizáramos los ensayos en sus establecimientos.

Al personal de laboratorio y biblioteca de Facultad de Agronomía por el aporte en el desarrollo del trabajo. Sobre todo a Sully Toledo por la colaboración en la corrección del presente trabajo.

A nuestras familias por el incondicional apoyo.

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>	3
2.1 <u>POTASIO</u>	3
2.1.1 <u>Contenido en los suelos y mineralogía</u>	3
2.1.2 <u>Formas en que se encuentra en los suelos</u>	3
2.1.2.1 K en la solución.....	3
2.1.2.2 K intercambiable.....	4
2.1.2.3 K no intercambiable.....	4
2.1.2.4 K en minerales.....	4
2.1.3 <u>Factores del suelo y de las plantas que afectan</u> <u>la disponibilidad de K</u>	4
2.1.3.1 Las arcillas.....	4
2.1.3.2 Humedad y temperatura del suelo.....	5
2.1.3.3 pH del suelo e influencia del calcio y magnesio.....	5
2.1.3.4 Sistema radicular y tipo de cultivo.....	6
2.1.4 <u>Pérdidas de K por lavado</u>	6
2.1.5 <u>Funciones del K en las plantas</u>	6
2.1.6 <u>Síntomas de deficiencia</u>	6
2.1.7 <u>Requerimiento por los cultivos</u>	7
2.1.8 <u>Fertilización y respuesta al K</u>	8
2.1.9 <u>Localización del fertilizante</u>	9
2.2 <u>MAGNESIO</u>	9
2.2.1 <u>Contenido de Mg en los suelos</u>	9
2.2.2 <u>Mg en los minerales primarios y secundarios</u>	9
2.2.3 <u>Mg intercambiable y no intercambiable</u>	9
2.2.4 <u>Pérdida de Mg de los suelos</u>	9
2.2.4.1 Extracción por los cultivos.....	10
2.2.4.2 Pérdidas por lixiviación y erosión.....	10
2.2.5 <u>Contenido de Mg en las plantas y funciones</u>	10
2.2.6 <u>Síntomas de deficiencia</u>	10
2.2.7 <u>Fuentes de Mg</u>	10
2.2.7.1 Fuentes solubles.....	10
2.2.7.2 Fuentes semisolubles.....	11
2.2.8 <u>Fertilización y respuesta a Mg</u>	11
2.3 <u>ZINC</u>	11

2.3.1 <u>Zn en el suelo</u>	11
2.3.2 <u>Factores que afectan la disponibilidad para las plantas</u>	12
2.3.3 <u>Funciones del Zn en las plantas</u>	12
2.3.4 <u>Síntomas de deficiencia en las plantas</u>	13
2.3.5 <u>Requerimiento por los cultivos</u>	13
2.3.6 <u>Fertilización</u>	14
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	15
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	15
3.1.1 <u>Localización</u>	15
3.1.2 <u>Características de los sitios experimentales</u>	15
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	16
3.3 DETERMINACIONES.....	17
3.3.1 <u>De suelo</u>	17
3.3.1.1 <u>A la siembra</u>	17
3.3.1.2 <u>Muestra de suelo a floración</u>	18
3.3.2 <u>De planta</u>	18
3.3.3 <u>De rendimiento</u>	19
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	19
3.4.1 <u>Modelo estadístico</u>	19
3.4.2 <u>Análisis de varianzas y contrastes</u>	20
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	21
4.1 <u>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA</u>	22
4.2 <u>RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN POTÁSICA</u>	23
4.2.1 <u>Rendimiento</u>	23
4.2.2 <u>Efecto de la aplicación de K en el suelo</u>	27
4.2.2.1 <u>Variación de K en suelo</u>	27
4.2.2.2 <u>Cálculo del equivalente fertilizante</u>	29
4.2.3 <u>Efecto de la aplicación de K en planta</u>	31
4.3 <u>EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE ZINC</u>	34
4.3.1 <u>Rendimiento</u>	34
4.3.2 <u>Efecto del Zn en el suelo</u>	35
4.3.3 <u>Efecto del pH del suelo en la disponibilidad de Zn</u>	35
4.3.4 <u>Efecto de la aplicación de Zn en planta</u>	36
4.4 <u>EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE MAGNESIO</u>	37
4.4.1 <u>Rendimiento</u>	37
4.4.2 <u>Efecto de la aplicación de Mg en planta</u>	38
4.4.3 <u>Relación Mg/K y Ca/Mg</u>	38
5. <u>CONCLUSIONES</u>	42
6. <u>RESUMEN</u>	43
7. <u>SUMMARY</u>	44
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	45
9. <u>ANEXOS</u>	51

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características de manejo de los sitios.....	16
2. Características generales de los ensayos.....	16
3. Principales características edáficas de los sitios.....	18
4. Rendimiento (kg ha^{-1}) de grano de soja y de sorgo según el tratamiento aplicado.....	21
5. Valores de K intercambiable en suelo a siembra y a floración.....	26
6. Modelos matemáticos y equivalente de fertilizante.....	29
7. Concentración de K (%) foliar en soja según tratamiento.....	30
8. Rendimiento medio por sitio según tratamiento con Mg.....	33
9. Relación Mg/K y Ca/Mg intercambiables ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$).....	35
10. Rendimiento medio por sitio según tratamiento con Zn.....	38
 Figura No.	
1. Ubicación espacial de los sitios donde se hicieron los experimentos.....	15
2. Precipitaciones efectivas mensuales (mm).....	22
3. Variación del rendimiento en soja según tratamiento.....	23
4. Variación del rendimiento en sorgo según tratamiento.....	25
5. Relación entre K intercambiable a floración con 0 (izquierda) y 240 (derecha) $\text{kg de K}_2\text{O}$ y el K intercambiable a la siembra.....	27
6. Concentración de K ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) en suelo a floración en testigo sin agregado de K y el tratamiento con la dosis máxima (240 kg ha^{-1} aplicada en el estudio)...	28
7. Relación entre dosis de K_2O y concentración de K foliar (%).....	31
8. Relación entre % de K en planta y rendimiento (kg ha^{-1}).....	32
9. Relación entre Mg en suelo a siembra ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) y % en planta con y sin agregado de MgO	34
10. Relación Mg y K intercambiable ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) a siembra y % de Mg en planta...	35
11. Relación entre el % de Mg y K en planta.....	36
12. Relación entre Mg en planta y rendimiento en soja.....	37
13. Efecto del pH del suelo en la disponibilidad de Zn.....	39
14. Efecto de la aplicación de Zn en la planta (mg kg^{-1}).....	40

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 15 años se ha producido en Uruguay un proceso de expansión e intensificación agrícola que ha llevado a que la producción total de granos se haya cuadruplicado (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011). Esto se explica porque se incrementó la productividad por superficie, concretamente en cultivos de invierno, donde el trigo y la cebada pasaron de un rendimiento de 2300 y 2000 kg ha⁻¹ en 1995 a 3300 y 3000 kg ha⁻¹ en 2010, respectivamente, y por la expansión de la agricultura hacia áreas no tradicionales. En esta expansión, la soja fue el cultivo dominante, con un área sembrada que creció de 9.000 ha en el año 1998 a casi un millón en el año 2010 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011).

Estos cambios han sido en gran parte atribuidos a la adopción de sistemas de laboreo reducido. En estos sistemas se ha encontrado con mayor frecuencia deficiencias y respuesta a nutrientes como fósforo (P) y potasio (K) que en los sistemas donde se realiza laboreo convencional. Esto se puede deber a factores como la estratificación de los nutrientes que son considerados inmóviles y a que la mayor parte de las raíces se encuentra en zonas superficiales del suelo lo que provoca también una mayor dependencia de las condiciones de humedad para la absorción de los nutrientes requeridos (Bordoli, 2001).

En Uruguay existen trabajos recientes que muestran el efecto de la agricultura en algunas propiedades químicas del suelo y la necesidad de profundizar en el manejo de nutrientes. Para el caso del K, hasta hace una década no era muy frecuente observar síntomas de deficiencias de este nutriente en los cultivos. Entre las explicaciones de esto se puede mencionar la riqueza en K del material geológico que formó los suelos, el escaso lavado producido en texturas medias a pesadas de los suelos agrícolas de Uruguay, y la relativamente reducida extracción por los cultivos dominantes realizados (básicamente cereales de invierno). Por otro lado, la rotación de cultivos con pasturas que se practicaba en los sistemas productivos permitía devolver parte del K a través de las deyecciones de los animales. Se suma a esto que también se realizaba un uso menos intensivo del suelo (más periodos de barbechos) y menor potencial de rendimiento de los cultivos utilizados. Sin embargo, Morón y Quincke (2005) mostraron que en suelos con historia agrícola la concentración de nutrientes como K era menor con respecto a los mismos suelos sin historia agrícola.

Por otro lado, Morón y Baethgen (1996), Barbazán et al. (2007), Bordoli et al. (2012, 2013) en varios estudios han mostrado mediante relevamientos nutricionales en diferentes cultivos abarcando una gran diversidad de tipos de suelos que la producción de cultivos puede estar limitada por la escasez de nutrientes como P, K y azufre (S). En otros nutrientes como magnesio (Mg) o zinc (Zn) no se han encontrado situaciones consistentes de deficiencia, aunque Barbazán et al. (2007) sugirieron que en algunas situaciones era probable encontrar respuesta a Mg. Bordoli et al. (2012, 2013) también sugirieron que en suelos con altos pH podrían existir deficiencias de Zn.

Por lo tanto, en este trabajo se evaluó la respuesta a K, Zn y Mg en seis cultivos de soja de primera y en un cultivo de sorgo en suelos representativos de la zona de producción agrícola del oeste del país.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 POTASIO

2.1.1 Contenido en los suelos y mineralogía

La concentración de K en los suelos en general se encuentra en torno a valores de 0,5 y 2,5% con una media aproximada de 1,2% (Hernández, 1992). En la capa arable del suelo (primeros 20 cm) el contenido de K varía; en suelos de textura liviana, como los formados sobre areniscas cretácicas, es esperable encontrar unos pocos cientos de kilos, pero cuando los suelos son de textura más pesadas (alto contenido de arcillas portadoras de K) este valor puede superar los 50.000 kilos. Sin embargo, no todo ese K está disponible para las plantas, sino que depende de las formas en las que se encuentra.

2.1.2 Formas en que se encuentra en los suelos

Existen cuatro formas de K en los suelos: el K dentro de los minerales primarios, el no intercambiable, el intercambiable y en solución.

El K disponible es el conformado por el K de la solución y el K intercambiable. Cuando se evalúa la fertilidad del suelo lo que se realiza es la cuantificación de estas dos formas. Existen también otras formas de K en el suelo: el K de reserva o de reposición, el cual está integrado por el K fijado o no intercambiable y el K estructural o de las formas minerales (ambos fuertemente unidos a la fase mineral, Conti, 2002).

Según Hernández (1992) la distribución porcentual de las diferentes formas de K en suelo es: de 90 a 98% formando parte de los minerales primarios (forma no asimilable), de 1 a 10% como K no intercambiable o fijado (K lentamente asimilable o retenido) y solo de 0,1 a 2% en las formas en la cual el nutriente se encuentra rápidamente disponible para las plantas (K intercambiable y en solución).

En un estudio de caracterización de las formas de K en los suelos en muestras que se tomaron en el horizonte A (profundidad de 0 a 15 cm) de suelos provenientes de diferentes materiales madre y sin historia agrícola (campo natural) de Uruguay, se obtuvo que el K no intercambiable se encontraba en el rango de 0,13 a 3,35 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, el K bajo forma intercambiable entre 0,11 y 1,5 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ y, por último, el K contenido en la solución del suelo entre 0,0038 y 0,311 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (Hernández, 1992). Esto denota la gran variabilidad que presentan los suelos del país en cuanto al suministro de K para los cultivos.

2.1.2.1 K en solución

Para que las plantas puedan obtener K del suelo este se debe encontrar en la solución del suelo bajo la forma de ión potasio (K^+), que es la única forma en que puede ser absorbido por las raíces de la planta (Conti, 2002).

2.1.2.2 K intercambiable

Es el K unido en forma electrostática a los minerales (coloides) y la fase sólida orgánica. Cuando el K de la solución es rápidamente extraído y absorbido por las plantas del cultivo en crecimiento, el K intercambiable repone total o parcialmente el K a la solución (Conti, 2002).

En su estado natural (sin historia agrícola) la superficie ocupada por suelos con niveles de K intercambiable inferiores a $0,30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ en Uruguay fue estimada en 5 millones de hectáreas (Barbazán et al., 2012). Básicamente esos suelos corresponden a suelos de texturas livianas o con material madre pobres en K, y en zonas sin tradición agrícola. Sin embargo, en un relevamiento nutricional llevado a cabo recientemente por Bordoli et al. (2013) en cultivos comerciales de soja (estado R1-R2), se encontró gran variabilidad en la capacidad de los suelos respecto al aporte de K, observándose valores muy pobres (de $0,08 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) hasta suelos con altos niveles (de $2,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). El 23% de los sitios muestreados presentaron valores por debajo de $0,30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, aún en la zona agrícola.

2.1.2.3 K no intercambiable

Según Conti (2002) el K no intercambiable fijado es la principal fuente de reposición natural de este nutriente, de forma que su contribución es fundamental para la nutrición de los cultivos en crecimiento con alta demanda, cuando la presencia de K en forma intercambiable es insuficiente.

2.1.2.4 K en minerales

La forma más abundante la constituyen las micas y los feldespatos potásicos. Dentro de estos minerales se encuentran la ortosa, microclina, muscovita y biotita. La disponibilidad de K en estas formas es muy baja y diferente, pudiéndose ordenar en forma decreciente de disponibilidad como biotita > muscovita > feldespatos potásicos. También es posible encontrar K en los suelos en minerales secundarios como lo son las illitas (micas hidratadas), vermiculitas y minerales interestratificados (Hernández, 1992). Estos minerales son la fuente principal de K en el suelo para las plantas (Conti, 2002).

2.1.3 Factores del suelo y de las plantas que afectan la disponibilidad de K

2.1.3.1 Las arcillas

La reserva y disponibilidad de K en forma intercambiable y no intercambiable en el suelo depende en gran medida de la calidad y de la cantidad de las arcillas que componen a éste. Existen diferentes tipos de arcillas, mineral caolinítico (bilaminar 1:1, no expandente) con muy poco K intercambiable comportándose como la arena o la materia orgánica en lo referente a la dinámica del nutriente; los minerales illíticos (trilaminar 2:1, no expandente) son las arcillas con mayor contenido de K (mantienen más fuertemente unido el K) y con gran proporción en forma intercambiable; las esmectitas (trilaminar 2:1 expandente) con gran capacidad de fijación del K y dificultad para liberarlo nuevamente a la solución; por último los minerales arcillosos no

cristalinos como el alofan (derivados de cenizas volcánicas) generalmente tiene bajo contenido de K (Conti, 2002).

Para Hernández (1992) aquellos suelos donde predominen las arcillas como la vermiculita o la montmorillonita seguramente tendrán mayor nivel de K, comparado con suelos en donde predominen, por ejemplo, arcillas como la caolinita (que posee alto nivel de alteración y muy bajo contenido de K).

2.1.3.2 Humedad y temperatura del suelo

Como indica Hernández (1992) el grado de humedad del suelo incide en el movimiento del K en el suelo afectando la disponibilidad para las raíces (por medio de la difusión y la absorción). En situaciones en la que la humedad del suelo es baja el movimiento de los iones se dificulta ya que aumenta la tortuosidad (las láminas de agua que rodean a las partículas del suelo son muy delgadas) y como consecuencia de esto se reduce la disponibilidad para las raíces.

Para Bordoli (2001) la concentración de este nutriente relativamente inmóvil en la capa superficial del suelo (debido a aplicaciones superficiales del fertilizante, o K depositado superficialmente por los rastrojos de los cultivos) es una preocupación para la nutrición vegetal, sobre todo en cultivos de verano que sufren períodos de sequía. Esto determina que la zona más seca sea la superficial, disminuyendo la actividad radicular y así la absorción de K (más aún si las zonas más profundas son también deficientes en dicho nutriente).

Por otro lado las temperaturas bajas disminuyen el ritmo de los procesos fisiológicos y el normal crecimiento de los cultivos y como consecuencia la absorción de K (Hernández, 1992).

2.1.3.3 pH del suelo e influencia del Calcio y Magnesio

En suelos que son muy ácidos la alta presencia de Aluminio (Al) y Manganeso (Mn) intercambiable hacen que la absorción del K se vea reducida lo cual afecta el crecimiento de la planta (Hernández, 1992).

La absorción y utilización del K se ve limitada cuando existe alta presencia de Ca y Mg en forma intercambiable debido a que estos compiten con el K por la entrada a la planta. Por esto, los suelos con alto contenido de Ca y Mg necesitan también altos niveles de K para que la planta no resienta la absorción y de esta manera se afecte el crecimiento del cultivo. Se debe considerar no solo la cantidad absoluta del K sino también la cantidad relativa respecto a los nutrientes mencionados (Hernández 1992, Barbazán et al. 2007). Algunos investigadores sugieren considerar la relación entre cationes como indicador de disponibilidad de K para las plantas. Esas relaciones son orientativas y se usan como complemento de otros indicadores. Las relaciones en general son muy amplias. Vitti, citado por IPNI (2011) establecen relaciones ideales de cationes, siendo de 1:3:9 a 1:5:25 para K:Mg:Ca.

2.1.3.4 Sistema radicular y tipo de cultivo

Según Hernández (1992) el tipo de raíces, la densidad radicular y la capacidad de absorber agua son los factores más importantes. La morfología de las raíces de las gramíneas es fasciculado y el de las leguminosas es pivotante (maíz vs. alfalfa), la densidad radicular es mayor, por ejemplo en maíz que en cebolla, determinando las diferencias en absorción de K.

La extracción de K se encuentra regulada también genéticamente, por lo que es de esperar diferencias en la absorción entre variedades de un mismo cultivo, lo que puede incidir en el rendimiento (Hernández, 1992).

2.1.4 Pérdidas de K por lavado

Según Hernández (1992) las pérdidas por lavado pueden darse casi exclusivamente en aquellas situaciones en las que los suelos son arenosos o en los que se encuentran expuestos a inundaciones frecuentes. Las causas de las pérdidas pueden ser explicadas por la baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la poca capacidad de retener al K. La magnitud de las pérdidas anuales estimadas en Uruguay se encuentran en el rango de 65 a 135 kg ha⁻¹ (Casanova y Ferrando, 2003).

2.1.5 Funciones del K en las plantas

Es un nutriente esencial para las plantas ya que estas lo necesitan para regular la presión osmótica y activar enzimas (Marschener, 1995). Romero y Marius (2002) explican, además, que el K cumple una función vital que es la de estabilizar el pH, sintetizar proteínas, carbohidratos y lípidos, y también posee ciertos efectos en el crecimiento vegetal.

Para Kant y Kafkafi (2000) otro aspecto relevante es el asociado a la resistencia a estrés de tipo biótico (enfermedades y plagas) y abiótico (salinidad, heladas y sequías).

2.1.6 Síntomas de deficiencia

Como menciona Marschener (1995), debido a que el K es móvil dentro de la planta, los síntomas de deficiencia aparecen en primer lugar en las hojas más viejas (ante una situación de deficiencia el K es transportado hacia los tejidos que se encuentran en activo crecimiento). El síntoma característico es una clorosis o quemados que comienza desde la punta de las hojas y luego se extiende hacia el resto de la hoja por los bordes de la misma.

Taiz y Zeiger (2006) añaden que a diferencia de lo que ocurre con N, el síntoma producto de la deficiencia de K es irreversible pero la función de este nutriente puede ser suplida en cierta medida en aquellos casos donde hay sodio (Na) en planta en cantidades suficientes.

La deficiencia de K en las plantas repercute en la síntesis proteica y en las células oclusivas a las cuales les provoca la muerte (Romero y Marius, 2002). Para el

caso particular de los cereales, García y Quinke (2012) señalan que deficiencias de K no permite que los cultivos expresen su potencial de rendimiento debido a que distorsionan el normal crecimiento, la maduración, disminuyen la tolerancia a las enfermedades y plagas, además de reducir la respuesta al N. García et al. (2009) sugieren también problemas en el retraso del crecimiento y desarrollo de los cultivos ante las deficiencias.

Cano et al. (2007) observaron plantas de maíz de pequeño tamaño y con tallos quebrados, presentándose también espigas caídas, lo que seguramente explicó el bajo rendimiento de dichos cultivos con deficiencias en K.

Bautes et al. (2009) confirmaron, mediante datos de análisis de laboratorio, que en un cultivo de maíz, las plantas con síntomas (amarillamiento y necrosis en hojas inferiores) presentaban 0,5% de K, en cambio las plantas sin síntomas tenían 1% de K total.

2.1.7 Requerimiento por los cultivos

Los requerimientos de K por los cultivos varían según tipo de planta, especie y/o cultivar. A su vez varían de acuerdo al estado fisiológico en que se encuentre el cultivo, por ejemplo un cultivo de trigo cuando acumula el 50% de la biomasa total del ciclo ya ha absorbido el 95 % de K requerido (Kant y Kafkafi, 2000).

Según García y Quinke (2012) las plantas extraen K del suelo, el K del rastrojo queda en la chacra, pero el que está en el grano se pierde cuando se realiza la cosecha. Hay factores que hacen variar la cantidad de K exportada de la chacra, una de ellas es la relación entre la cantidad de este nutriente en paja y en grano, y la otra es la cantidad extraída por el granos (las oleaginosas como la soja y la colza extraen cantidades superiores de K que los cereales).

Para el caso de especies forrajeras Morón (2004) en trébol blanco relaciona la cantidad de K intercambiable en suelo con valores de este nutriente en planta, y explica que con valores de $0,35 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K intercambiable en suelo los requerimientos del cultivo (2% de K en planta) son cumplidos. En alfalfa Kelling y Matocha, citados por Barbazán et al. (2007) establecen como rango crítico un valor de K en planta entre 0,8-2,2%.

Para cultivos extensivos Correndo y García (2012) utilizan rangos para describir el nivel de K en planta, el de insuficiencia (menos de 1%), suficiencia (mayor a 1%), variando estas cifras en diferentes momentos del ciclo del cultivo. Particularmente para soja se establecen como niveles de suficiencias del nutriente 1,7-2,5 y 1,5-2,5% de K en planta para estado vegetativo y reproductivo respectivamente. Robinson y Reuter (1997) establecen un valor de referencia de 1,76% de K foliar para el cultivo de soja en estadio R1-R2. Este último valor fue tomado como referencia en el relevamiento de soja realizado por Bordoli et al. (2013), en el cual se encontró que casi un 40% de los cultivos muestreados presentaban concentraciones de K por debajo del valor de

referencia, sugiriendo la existencia de problemas en el suministro y/o utilización de K por los cultivos.

En sorgo los valores de referencia son de 2,5-3, 2 y 1,4% de K en planta para el momento de macollaje, vegetativo-panojamiento y floración respectivamente (Correndo y García, 2012).

Según García (2003) para un cultivo de soja, la remoción de K por tonelada de grano es de 33 kg, con un índice de cosecha del nutriente de alrededor del 59%, lo que significaría que si el cultivo tiene un rendimiento de 4 toneladas por hectárea los requerimientos totales serían de 132 kg, con una extracción de 78 kg de K ha⁻¹. Para tener una idea a nivel nacional, en el año 2010 se exportaron 1,8 millones de toneladas de soja, por lo tanto también se exportaron 36000 toneladas de K₂O del suelo (Barbazán et al., 2012).

2.1.8 Fertilización y respuesta al K

El K proveniente de los fertilizantes es casi en su totalidad soluble en agua. Generalmente se presentan bajo la forma de cloruros, sulfatos, nitratos y polisulfatos. El cloruro de potasio (KCl) es el más utilizado y contiene 60 a 63% de K₂O (Hernández, 1992).

Existen varios criterios para manejar la fertilización de nutrientes. Uno de los más usados se basa en determinar la dosis a agregar en función de un valor crítico del nutriente en el suelo por debajo del cual hay más probabilidad de respuesta a la fertilización, y una noción de la cantidad necesaria para cambiar el dato del análisis de suelos. En Uruguay, Oudri et al. (1976) recomendaban fertilizar aquellos suelos con nivel bajo de K intercambiable (<0,15 cmol_c kg⁻¹), y con nivel medio (0,15-0,30 cmol_c kg⁻¹) donde habían cultivos exigentes, pero estos valores fueron sugeridos como de referencia debido a la escasa o nula respuesta encontrada en los estudios de respuesta a este nutriente.

Sin embargo, a partir del año 2006 comienzan a reportarse estudios de respuesta a K (Almada 2006, Cano et al. 2007, Bautes et al. 2009). En un cultivo de maíz en un suelo del noreste del Uruguay, con 0,15 cmol_c kg⁻¹ de K intercambiable, Cano et al. (2007) obtienen un rendimiento superior a 6200 kg ha⁻¹ en los tratamientos donde se aplicó K, mientras que el testigo sin fertilizar rindió solo 2638 kg ha⁻¹ (dado por un No. y peso de grano significativamente menor al resto). Bautes et al. (2009) muestran la existencia de respuesta al agregado de K en cultivos de invierno y de verano cuando el contenido de K intercambiable en el suelo se encontraba en un rango de 0,18 a 0,37 cmol_c kg⁻¹. García et al. (2009) en cultivos de invierno sugieren una respuesta diferencial al agregado de K, dependiendo de las condiciones hídricas de cada año y de las propiedades físicas del suelo. En caso de un año con déficit hídrico o suelos compactados, la exploración radicular se ve perjudicada, existiendo mayor dependencia del K aplicado. García (2011) explica que hay mayor probabilidad de respuesta en

suelos arenosos y en suelos donde la capacidad de reposición de K intercambiable es menor a la velocidad de absorción del nutriente.

Toda esa información reciente generada en Uruguay fue resumida por Barbazán et al. (2011) para distintos cultivos y tipos de suelos, determinando un nivel crítico provisorio de K intercambiable de $0,34 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, destacando la necesidad de profundizar en la dinámica de este nutriente

2.1.9 Localización del fertilizante

Las diferentes formas de aplicación del fertilizante afectan la cantidad que pueda encontrarse disponible para las plantas. La aplicación localizada del fertilizante es mejor que la aplicación al voleo en aquellas situaciones donde los suelos son altamente fijadores, los niveles de K en suelo son bajos y/o las dosis a aplicar son bajas. En cambio cuando los niveles de K en suelo son altos no hay diferencias entre una u otra forma de aplicación (Hernández, 1992). Bordoli y Mallarino (1998) mediante experimentos realizados en Iowa, argumentan que hay respuesta a la fertilización con K, aplicado en bandas profundas, en situaciones donde hubo deficiencias hídricas en el período crítico para el rendimiento de maíz.

2.2 MAGNESIO

2.2.1 Contenido de Mg en los suelos

La presencia de Mg en los suelos es variable, siendo menor en los no calcáreos (alrededor del 1%, expresado como MgO) pero puede llegar a 2 % o más en algunos suelos como los de las estepas semiáridas (Durán, 2004). Según Mikkelsen (2010), el Mg es un elemento muy común en muchos minerales y puede comprender un 2% de la corteza terrestre, y las formas en las que se encuentra este elemento en el suelo son en minerales primarios y secundarios, en forma intercambiable y no intercambiable, y por último en la solución del suelo.

2.2.2 Mg en minerales primarios y secundarios

En las rocas ígneas básicas los minerales que son fuentes comunes de Mg (ferromagnesianos) son el olivino, piroxeno, anfíbol y las micas. En lo que respecta a los minerales secundarios, los que contienen Mg son la magnesita, dolomita, el grupo de las serpentinas y por último el talco (Mikkelsen, 2010).

2.2.3 Mg intercambiable y no intercambiable

Según Mikkelsen (2010) las reacciones de intercambio entre los cationes son estequiometrias (se debe mantener balances de cargas), lo que quiere decir que para que el Mg salga de un mineral a la solución del suelo necesita ser sustituido, por ejemplo, por dos iones de K.

2.2.4 Pérdida de Mg de los suelos

Cuando la extracción por parte de los cultivos, lixiviación y escorrentía supera a la adición por parte de la fertilización, el balance del nutriente en un sistema suelo-planta va a ser negativo, produciendo disminuciones en el contenido del nutriente en el suelo, lo que afecta la disponibilidad para las plantas en sucesivos cultivos (Mikkelsen, 2010).

2.2.4.1 Extracción por los cultivos

Según García (2003) un cultivo de soja requiere 9 kg de Mg por tonelada de grano producido. Esto significa que si tuviera un rendimiento de 4 Mg ha⁻¹, los requerimientos de Mg serían de 36 kg ha⁻¹ y la extracción del mismo en el grano sería de 11 kg ha⁻¹ (índice de cosecha de 30%).

2.2.4.2 Pérdidas por lixiviación y erosión

Dependiendo de características propias del suelo, de la cantidad de agua que atraviesa el perfil, la dimensión de la pérdida de Mg a zonas profundas puede ir desde unos pocos kg/ha⁻¹/año hasta llegar a condiciones en que los suelos pierden alrededor de los 110 kg/ha⁻¹/año. Debido a que la superficie del suelo es la que generalmente tiene mayor contenido de nutrientes y materia orgánica, la escorrentía superficial es una gran fuente de pérdidas de Mg (Mikkelsen, 2010). En Uruguay la magnitud de las pérdidas por este proceso depende en gran proporción de la condición de los suelos como la CIC, estructura, textura y cobertura (Casanova y Ferrando, 2003).

2.2.5 Contenido de Mg en las plantas y funciones

El Mg es un activador específico de enzimas que están asociadas a la respiración celular, a la fotosíntesis y a la síntesis de ADN y ARN (Taiz y Zeiger, 2006).

Kelling y Matocha (1990) para el cultivo de alfalfa dan un nivel de suficiencia del nutriente alrededor de 0,2% de Mg en planta. Para Robinson y Reuter (1997), también es 0,2% pero para soja. En general, el rango de suficiencia para contenido de Mg en plantas oscila entre 0,1 y 0,4% (Correndo y García, 2012).

2.2.6 Síntomas de deficiencia

Debido a que el Mg es relativamente móvil dentro de la planta el síntoma característico aparece en las hojas más viejas. Este se manifiesta como clorosis internerval (Barbazán, 1998). Taiz y Zeiger (2006) añaden que los síntomas comienzan con moteados cloróticos entre las nervaduras de las hojas que progresivamente se van agrandando hasta que los folíolos comienzan a necrosar.

2.2.7 Fuentes de Mg

2.2.7.1 Fuentes solubles

Son variados los materiales con Mg para aplicación al suelo, entre ellos se encuentra la Kieserita (Sulfato de Mg monohidratado con 17% de Mg), el Nitrato de Mg

(9% de Mg), el Cloruro de Mg (25% de Mg), la Kainita, (que es una mezcla de Sulfato de Mg y Cloruro de K, con 9% de Mg), el sulfato doble de Mg y K (con 10% de Mg), la Langbeinita (11% de Mg) que también aporta K y S. En aplicaciones foliares las correcciones de las deficiencias de Mg de los cultivos son temporales (Mikkelsen, 2010).

2.2.7.2 Fuentes semisolubles

Cuando los suelos son ácidos puede utilizarse la dolomita (con 6 a 20% de Mg), que tiene como ventaja el bajo precio. Otro mineral como la Estruvita contiene 10% de Mg y también aporta N y P. El Óxido de Mg contiene la mayor concentración del nutriente (56%), pero es poco soluble, teniendo que aplicarlo con mucha anticipación al suelo (Mikkelsen, 2010).

2.2.8 Fertilización y respuesta a Mg

Los estudios de respuesta a Mg en el país han sido muy escasos, limitados a cultivos como frutilla (Lazbal, 1998).

Sin embargo, en un relevamiento de suelos abarcando una gran cantidad de suelos del país, Barbazán et al. (2007) encontraron que en algunos suelos desarrollados sobre la Unidad Bequeló el cultivo de *Lotus corniculatus* presentó valores de Mg en planta por debajo de los tomados como referencia. En esos suelos las relaciones Mg/K son muy bajas debido a la escasez de Mg en el material madre (Durán, 1989). En otro relevamiento reciente, Bordoli et al. (2013) encontraron valores de Mg en suelo que oscilaban entre 0,6 a 5,2 cmol_c kg⁻¹ en el cultivo de soja, y si bien presentó un amplio rango en la concentración foliar, no se observaron situaciones por debajo de los valores de referencia.

2.3 ZINC

2.3.1 Zn en el suelo

El contenido de Zn en el suelo es variable, siendo de 100 mg kg⁻¹ en rocas basálticas y de 40 mg kg⁻¹ en el granito. Dentro de las rocas sedimentarias, las lutitas contienen más Zn (95 mg kg⁻¹), luego las calizas (20 mg kg⁻¹) y por último las areniscas (16 mg kg⁻¹). Gran proporción del Zn del suelo puede encontrarse dentro de minerales como la augita, hornblenda y biotita que son minerales ferromagnesianos. El origen del Zn en estos minerales está dado por la sustitución isomórfica del Zn⁺² con los iones Fe⁺² y Mg⁺² (Hernández, 1996).

Si bien el análisis de suelo para determinar la disponibilidad de micronutrientes como el Zn no es una práctica generalizada, existen métodos que determinan la fracción de Zn lábil del suelo (disponible para las plantas), mediante el uso de quelatos como el DTPA (ácido dietilamintetracético) y el EDTA (ácido etilendiamintetracético), también por el método Melich-3 (Ratto y Miguez, 2006).

En Uruguay existen pocos estudios que muestren los niveles de Zn en los suelos, y no hay estudios de calibración del análisis de suelos con el rendimiento de cultivos. En un estudio realizado en el litoral uruguayo comprendiendo más de 200 muestras, el valor promedio de Zn extraído (Zn_{DTPA}) fue $0,57 \text{ mg kg}^{-1}$ de suelo, dentro de un rango de $0,07$ a $1,4 \text{ mg kg}^{-1}$ (García, 2011). Sin embargo, Perdomo y Cardellino (2006) en la misma zona del Uruguay trabajaron en suelos con valores promedios de Zn en suelo mayor, próximo a $2,15 \text{ mg kg}^{-1}$.

2.3.2 Factores que afectan la disponibilidad para las plantas

Según Hernández (1996) por cada unidad de aumento del pH el contenido soluble de Zn en la solución del suelo disminuye 100 veces. La explicación es la formación de compuestos insolubles como $Zn(OH)_2$ y $ZnCO_3$ que disminuyen la disponibilidad del nutriente para las plantas. Bordoli et al. (2013) en diferentes zonas del Uruguay para soja (estado R1-R2) encontraron que cuando el pH del suelo era ácido (menor a 5,3) la concentración de Zn en planta era muy alta (83 mg kg^{-1}) comparada con un suelo más alcalino (pH mayor a 7,3) donde el contenido de nutriente en planta era muy bajo (23 mg kg^{-1}), lo que muestra que el cambio en el pH del suelo hace variar la disponibilidad de Zn.

La adsorción por parte de los minerales arcillosos (bentonita, illita y caolinita), por los carbonatos (en mayor magnitud por la magnesita, luego por la dolomita y en menor proporción por la calcita) y la formación de complejos por la materia orgánica del suelo afectan la disponibilidad de Zn para las raíces (Hernández, 1996).

Los suelos del Uruguay son por lo general abundantes en Hierro (Fe), Manganeso (Mn) y Cobre (Cu), la interacción del Zn con estos nutrientes (cationes metálicos) afecta su absorción, ya que competirían por el mismo sitio de transporte (García, 2011).

La presencia de SO_4^{2-} aumenta la solubilidad y movilidad del Zn en la solución del suelo, debido a formación del complejo $ZnSO_4$ (García, 2011).

Hay información de que la alta cantidad de P disponible induce deficiencias de Zn (Hernández, 1996). Sin embargo Malavolta (2006) destaca que la interacción no es competitiva ya que dichos nutrientes son absorbidos con la intervención de distintos transportadores.

La temperatura influye significativamente en disponibilidad de Zn. En sistemas sin laboreo o en siembras tempranas se limita el crecimiento de las raíces, la difusión del Zn y también la liberación de este nutriente a formas disponibles para las raíces (Ratto y Míguez, 2006).

2.3.3 Funciones del Zn en las plantas

Al ser un nutriente esencial las deficiencias de Zn en las plantas repercuten seriamente, esto es debido a las funciones metabólicas en las que el Zn está involucrado como por ejemplo el metabolismo de carbohidratos, interviene en la absorción de otro

nutriente como el fósforo y en la regulación de la producción de hormonas responsables del control del crecimiento vegetal (García, 2011). Aplicado como quelato tiene la capacidad de aumentar la velocidad de germinación y establecimiento del cultivo de maíz (Ratto y Miguez, 2006).

2.3.4 Síntomas de deficiencia en las plantas

Romero y Marius (2002), explican que cuando existe deficiencia de Zn los síntomas aparecen en primer lugar en las hojas nuevas, ya que dicho nutriente no tiene la capacidad de moverse desde las hojas más viejas. El menor tamaño de las hojas y el enulado de éstas pueden evidenciar la falta del nutriente, además de la presencia de entrenudos más cortos (debido a la relación del Zn con las auxinas).

En maíz el acortamiento de los entrenudos y las manchas cloróticas amarillas o blanquecinas dispuestas en forma longitudinal en la hoja son los síntomas más claros de deficiencia, apareciendo más frecuentemente en la segunda o tercera semanas del inicio del ciclo del cultivo (García, 2011). El síntoma tiene también como característica una corta duración en la hoja (mayor exploración radicular y aumento de la temperatura incrementan la difusión del Zn, lo que hacen desaparecer el síntoma) (Ratto y Miguez, 2006).

Taiz y Zeiger (2006) mencionan, además, que es posible identificar la deficiencia de Zn ya que aunque el folíolo se encuentre clorótico en casi su totalidad, las nervaduras principales permanecen de color verde.

2.3.5 Requerimiento por los cultivos

Según García (2003) en un cultivo de soja, la remoción de Zn por tonelada de grano es de 60g con un índice de cosecha del nutriente del 70%. Esto significa que si el cultivo tuviera un rendimiento en grano de 4 Mg ha⁻¹ los requerimientos de Zn serían de 240g y la extracción del mismo en el grano sería de 168g.

Para Hernández (1996), García (2011) ejemplos de cultivos muy sensibles a los bajos niveles de Zn son soja y maíz, y los de sensibilidad media a baja son el sorgo, alfalfa y trigo.

En suelos el nivel crítico es muy amplio (entre 0,3 y 1,5 mg kg⁻¹ de suelo), y depende del cultivo y de las condiciones del suelo y el clima. Generalmente los suelos de textura más arenosa presentan los menores valores críticos (porque aumenta el crecimiento radicular, García, 2011). Según Giménez y García (1998) valores de 0,6 a 1 mg kg⁻¹ pueden ser considerados como marginales o críticos y menos de 0,6 mg kg⁻¹ deficientes. Ratto y Miguez (2006) diferencian los niveles críticos de acuerdo al método de extracción de Zn del suelo, siendo 0,5 mg kg⁻¹ para el método DTPA, 1 mg kg⁻¹ para Melich-3 y de 1,4 mg kg⁻¹ para EDTA.

Al igual que para suelo los niveles de suficiencia de Zn en planta son variables, para una forrajera como alfalfa, Kelling y Matocha (1990) determinaron un nivel crítico de Zn en planta alrededor de 12 mg kg⁻¹. Giménez y García (1998) dan como rango

crítico entre 20 y 70 mg kg⁻¹. Según García (2011) en maíz hasta el estado de 5 hojas los niveles de suficiencia son de 16 a 32 mg kg⁻¹ de materia seca.

2.3.6 Fertilización

El Sulfato de Zn (sal inorgánica con 35 % de Zn) es tipo de fertilizante más comúnmente utilizado. El Óxido de Zn (ZnO) y el Carbonato de Zn (ZnCO₃) son minerales que dejan cantidades adecuadas de Zn⁺² disponible para las plantas. El Fosfato de Zn (Zn₃(PO₄)₂) es menos soluble y el suministro de Zn se puede extender por más tiempo. También puede suministrarse Zn en forma de fritas, de complejos orgánicos y como quelatos sintéticos (Hernández, 1996).

El fertilizante puede ser aplicado al suelo o mediante aplicaciones foliares. La dosis depende del cultivo en cuestión y su deficiencia nutricional, la fuente con la que se trabaje y el método de aplicación. Cuando se aplican sales inorgánicas las dosis rondan entre los 3,5 y 22 kg ha⁻¹, y cuando se utilizan fuentes más solubles como los quelatos y compuestos orgánicos son menores (3,5 a 5,5 kg ha⁻¹). Cuando los suelos son arcillosos o limosos se recomiendan 11 kg ha⁻¹ y de 3,5 a 5,5 kg ha⁻¹ en suelos más arenosos (Hernández, 1996).

Pérez y Pérez (2013) en INTA Barnetche de Bolívar en Argentina lograron incrementos del 19% en rendimiento en grano de maíz producto de la aplicación de Zn a la semilla.

Para maíz bajo riego, Giménez y García (1998) en experimentos en Uruguay en INIA-La Estanzuela lograron recuperar el rendimiento de maíz al cual se le diagnosticó deficiencia de Zn (0,31 mg kg⁻¹ de Zn en suelo y 14,6 mg kg⁻¹ de Zn en planta) mediante la aplicación foliar (estado de 7 hojas) de un producto comercial (6,4% de Zn). Las mayores respuestas en rendimiento en grano se obtuvieron cuando se aplicaron 4 y 6 litros, con 260 y 380 g de Zn ha⁻¹, respectivamente. Más tarde, García (2011) en Uruguay en INIA-La Estanzuela para maíz en secano logró aumentos del rendimiento de 437, 1300, 585 y 453 kg ha⁻¹ desde la zafra 2006/07 a la 2009/10, respectivamente. Se fertilizó el cultivo emergido con 15 kg ha⁻¹ de ZnO (78% de Zn) y aplicado entre bandas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Durante la zafra 2012/2013, se realizaron siete experimentos, en chacras comerciales, ubicadas en los departamentos de Soriano y Flores.

3.1.1 Localización

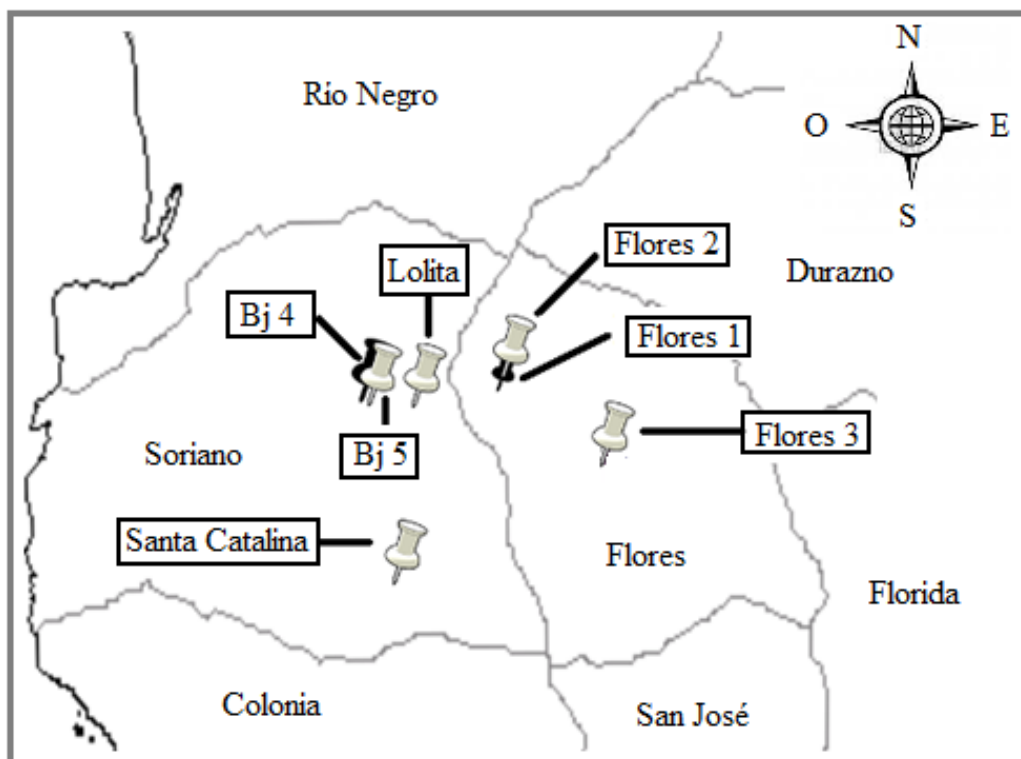


Figura 1. Ubicación espacial de los sitios donde se hicieron los experimentos.

3.1.2 Características de los sitios experimentales

Todos los experimentos se realizaron en soja de primera, a excepción de Flores 3, que corresponde a sorgo. En el Cuadro 1 se describe la característica de manejo de cada sitio.

Cuadro 1. Características de manejo de los sitios.

Ensayo	Sito	Cultivo	Variedad	Fecha de siembra	Antecesor
BJ4	1	soja	Nidera 5909	15-nov	soja 1era
BJ5	2	soja	Nidera 5909	15-nov	soja 1era
Flores 1	3	soja	Nidera 5909	08-nov	-
Flores 2	4	soja	-	-	maíz - barbecho
Lolita	5	soja	Nidera 5909	15-nov	soja 1era
Santa Catalina	6	soja	DM6.8i	02-nov	maíz - barbecho
Flores 3	7	sorgo	-	-	-

La elección de los sitios tuvo como criterio, que fueran representativos de la producción agrícola actual, y que presentaran un rango amplio de valores de K en el suelo, de pH, y de relación Mg/K. Los Cuadros 2 y 3 muestran algunas de las principales características de los sitios.

Cuadro 2. Características generales de los ensayos.

Sitio	Unidad de suelo	Grupo coneat	Material geológico	Tipo de suelo
1	Cuchilla Corralito	10.2	Sedimentos limo arcillosos	Brunosol Subéutricos Lúvicos Típicos
2	Cuchilla Corralito	03.40	Sedimentos limo arcillosos	Brunosol Subéutricos Lúvicos Típicos
3	Paso Palmar	10.2	Sedimentos limo arcillosos	Brunosol Éutricos Lúvicos y Brunosol Subéutricos Lúvicos
4	Paso Palmar	10.2	Sedimentos limo arcillosos	Brunosol Éutricos Lúvicos y Brunosol Subéutricos Lúvicos
5	Risso	10.1	Sedimentos limo arcillosos y arcillosos	Br.Éu.Típicos y Vertisoles Rúpticos Típicos
6	La Carolina	10.1	Sedimentos limo arcillosos y arcillosos	Brunosol Éutricos Típicos y Vertisoles Rúpticos Lúvicos
7	Trinidad	10.16	Sedimentos limo areno arcillosos	Brunosoles Éutricos Típicos y Vertisoles Rúpticos Lúvicos.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño del experimento corresponde a bloques completos al azar, con tres bloques. Para el estudio de respuesta a K se dispusieron cinco tratamientos correspondientes a las diferentes dosis de Cloruro de potasio (KCl) usadas: 0, 30, 60, 120 y 240 kg ha⁻¹ de K₂O. Para estudiar la respuesta a Mg se aplicó una dosis correspondiente a 40 unidades de Mg, usando Sulfato doble de K y Mg (0-0/0-22 +22S+10MgO). Para estudiar la respuesta a Zn se aplicó una dosis de 3 kg ha⁻¹ de ZnO. Todos

los tratamientos recibieron S (Sulfato doble de K y Mg) y P (Superfosfato triple, 0-46/47-0) en cantidades no limitantes para los cultivos.

El manejo de cada sitio fue realizado por el productor, excepto la aplicación de los tratamientos (realizados a la siembra de cada cultivo) y la cosecha. Las parcelas fueron de una superficie de 18 m² (6 x 3 m).

3.3 DETERMINACIONES

3.3.1 De suelo

3.3.1.1 A la siembra

Se tomaron muestras de suelos a la siembra en el mes de noviembre, para conocer el nivel de nutrientes del que se partía y algunas de las características del mismo.

Las muestras se tomaron con calador, sacando entre 10 y 15 tomas por bloque, que luego fueron llevadas al laboratorio para sus respectivos análisis, estos consistieron en la determinación del pH, determinación del fósforo mediante el método Bray No. 1 y determinación de bases de intercambio.

Cuadro 3. Principales características edáficas de los sitios.

Profundidad 0-15 cm								
Sitio	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	P Bray1 (mg kg ⁻¹)	Ca	Mg	K	Na	Zn (mg kg ⁻¹)
				-----cmol _c kg ⁻¹ -----				
1	6,09	5,12	11	19,2	4,6	0,29	0,55	0,37
2	5,99	4,73	25	16,8	3,4	0,22	0,37	0,44
3	4,88	4,14	24	7,4	1,7	0,15	0,34	0,41
4	4,65	3,91	36	3,3	1,3	0,26	0,32	0,76
5	6,10	5,33	12	24,8	3,2	0,36	0,33	0,46
6	5,82	4,70	21	12,2	4,6	0,33	0,39	0,51
7	6,68	5,08	31	24,4	2,6	0,24	0,33	0,40

Profundidad 15-30 cm*								
Sitio	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	P Bray1 (mg kg ⁻¹)	Ca	Mg	K	Na	
				-----cmol _c kg ⁻¹ -----				
1	6,41	5,30	3	23,3	6,4	0,34	0,90	
3	5,35	4,34	5	11,1	1,7	0,20	0,34	
5	6,12	5,43	7	26,3	3,3	0,37	0,32	
6	6,76	5,28	6	18,7	6,6	0,37	1,48	
7	7,32	6,46	5	33,9	2,4	0,29	0,37	

* Sitios 2 y 4 no se tomaron muestras de 15 a 30 cm.

3.3.1.2 Muestra de suelo a floración

Coincidiendo con el periodo de floración del cultivo de soja y de sorgo, se tomaron muestras compuestas de suelo de los tratamientos 0 y 240 kg ha⁻¹ K₂O, con la misma metodología de extracción de muestras que a la siembra, para analizar la evolución de K en el suelo.

3.3.2 De planta

Al estado de floración de la soja, de cada parcela se tomaron al azar 20 hojas con peciolo de la última hoja completamente desarrollada. Este es el momento crítico para poder comparar los datos del análisis de planta con valores críticos internacionales desarrollados para soja (Reuter y Robinson, 1997). De esta manera se puede estudiar si hubo una correlación entre la concentración de nutrientes en el tejido y los tratamientos aplicados.

Las muestras fueron colocadas en bolsas y luego en conservadoras para ser enviadas al laboratorio. La determinación de bases (K, Mg y Zn) se realizó mediante la

técnica de digestión de muestras foliares por vía seca (cenizas). Se pesó 1 g de muestra seca y molida, se colocó en un crisol de porcelana, el cual se llevó a 550 °C por 5 horas.

Luego se agregaron 5 mL de HCl al 20% para disolver las cenizas, y se aforó a 50 mL con agua deionizada. Por último, se midió Mg y Zn mediante espectrometría de absorción atómica y K por espectrometría de emisión.

3.3.3 De rendimiento

El rendimiento fue estimado mediante la cosecha manual de 1 metro lineal y de 6 hileras por parcela. Se infirió una superficie cosechada mediante la consideración de una distancia entre hileras de 0,19 (Sitios 1, 2 y 5) y 0,38 m (Sitios 3, 4, 6 y 7).

La humedad que se tomó en cuenta para corregir el rendimiento fue de 13% para soja y 14% para sorgo.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.4.1 Modelo estadístico

El modelo utilizado para la realización de los experimentos corresponde al de diseño en bloques completos al azar.

$$Y = \mu + \tau + \beta + \varepsilon$$

i: 1, 2, 3, ..., 8.

j: 1, 2, 3.

Y_{ij}: Rendimiento (kg ha⁻¹).

μ: Parámetro, media general.

α_i: Efecto relativo del i-ésimo tratamiento.

β_j: Efecto relativo del j-ésimo bloque.

ε_{ij}: Error experimental de la unidad experimental i, j.

t: No. de tratamientos.

r: No. de bloques.

Supuestos considerados:

-Material agrupable en bloques.

-Bloques homogéneos y diferentes entre ellos.

-Se asignan en cada bloque todos los tratamientos en un proceso completamente aleatorio e independiente en cada uno de ellos

-Igual No. de repeticiones por tratamiento.

3.4.2 Análisis de varianzas y contrastes

La respuesta a la aplicación de los tratamientos en las variables medidas se realizó mediante un análisis de varianza y contrastes ortogonales. Dichos análisis se realizaron mediante el uso del programa InfoStat, donde se evaluó cada sitio en forma individual. Se tomó la probabilidad de 0,05 como nivel de significancia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los rendimientos obtenidos en los ensayos para el cultivo de soja estuvieron en el rango entre los 1438 y 4064 kg ha⁻¹, lo cual denota una gran variabilidad entre los diferentes sitios y/o tratamientos. El promedio para el total de los ensayos fue de 2745 kg ha⁻¹, similares al promedio máximo histórico nacional de la zafra 2012/13 que fue de 2630 kg ha⁻¹ (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2013).

Para el caso del sorgo los rendimientos fluctuaron entre 4943 y 7366 kg ha⁻¹, y una media de 6764 kg ha⁻¹, siendo esta superior al rendimiento medio nacional que en la zafra 2012/13 fue de 4260 kg ha⁻¹ (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2013).

Cuadro 4. Rendimiento (kg ha⁻¹) de grano de soja y de sorgo según el tratamiento aplicado.

Tratamientos	Unidades ha ⁻¹		-----Sitios-----						
	K ₂ O	ZnO y MgO	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	2829	2998	1438	2578	1796	3644	4943
2	30	0	2969	2899	2110	2382	1659	3160	6641
3	60	0	2824	2300	2068	2289	2162	2584	7193
4	120	0	3359	3232	2347	2372	1920	3701	7091
5	240	0	3225	3532	2512	2244	2036	3751	7113
6	81	3 (Zn)	2913	3581	2420	2407	1879	3744	6594
7	81	40 (Mg)	3339	3816	2106	2701	2206	4064	7173
8	81	0	2783	3194	2654	2533	2910	3608	7366
			-----DF*-----						
Tratamientos			0,0059	<,0001	0,002	0,6314	0,3869	0,008	0,0294
Contrastes ortogonales									
0 vs resto			0,0687	0,1110	<,0001	0,4138	0,4252	0,5851	0,0005
0 vs resto K			0,0473	0,9601	0,0003	0,2169	0,7163	0,1725	0,0008
30 vs. +60			0,2053	0,4063	0,2750	0,7004	0,3736	0,4678	0,3462
60 vs. +120			0,0035	<,0001	0,0722	0,9324	0,6823	0,0007	0,8673
120 vs. 240			0,3973	0,1073	0,4568	0,6172	0,8219	0,8705	0,9718
+Zn vs. -Zn									
(3 vs. 6)			0,5714	<,0001	0,1229	0,6452	0,5864	0,0019	0,3485
+Mg vs. -Mg									
(7 vs. 8)			0,0311	0,0230	0,01928	0,2018	0,3776	0,1840	0,8105

*DF es la significación estadística de los efectos de los tratamientos en cada sitio.

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

En la Figura 2 se presentan los datos de precipitaciones efectivas mensuales para el periodo 2012-2013 (INIA. GRAS, 2003) y las precipitaciones medias mensuales históricas de la región en estudio (INIA. GRAS, 2003).

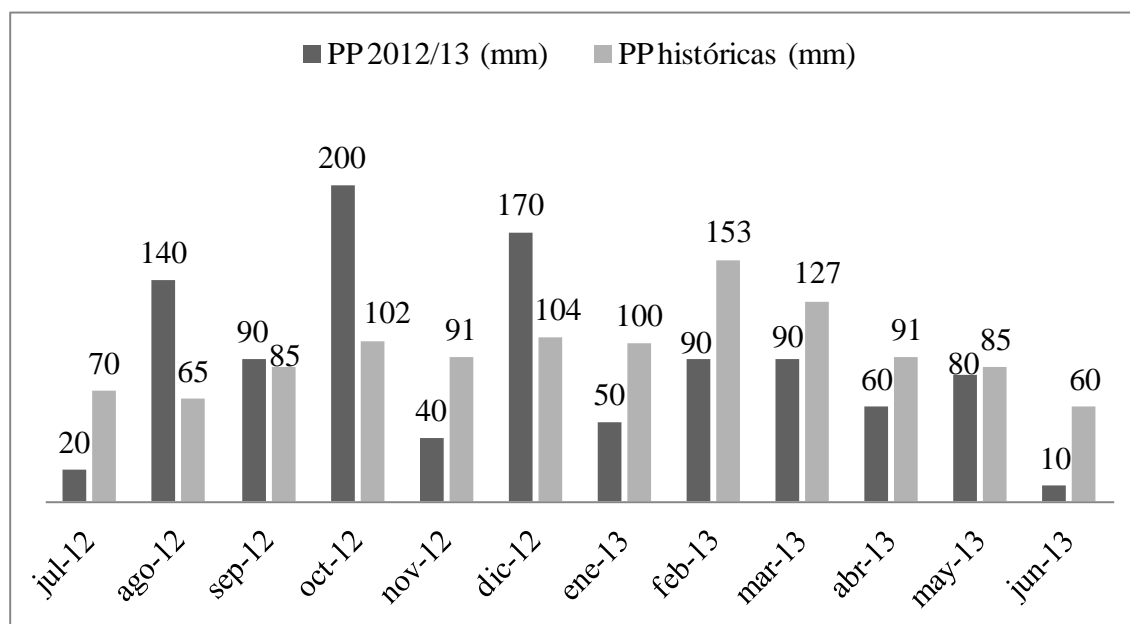


Figura 2. Precipitaciones efectivas mensuales (mm).

Para el periodo correspondiente a los meses de octubre-diciembre el régimen pluviométrico del año en estudio superó a la media histórica (para la localidad de Mercedes). Esto es un aspecto positivo en cuanto a la recarga hídrica de los suelos en el periodo de barbecho, que posibilitó una buena disponibilidad de agua para el crecimiento inicial de los cultivos.

En la época en que se realizó la siembra, si bien las precipitaciones para este mes fueron menores a la media histórica, es un aspecto positivo ya que posibilitó realizar la siembra sin inconvenientes.

En el mes de diciembre las precipitaciones fueron altas lo que permitió llegar al inicio del periodo crítico con suficiencia de agua en el perfil. Como contraparte en los meses de enero a marzo las precipitaciones estuvieron por debajo de la media, pudiendo ocasionar deficiencias en el segundo y tercer tercio del periodo crítico (R2-R8).

4.2 RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN POTÁSICA

4.2.1 Rendimiento

Según el Cuadro 4, se observó respuesta al agregado de K ($Pr < 0,05$) en los Sitios 1, 3 y 7 comparando el testigo y las aplicaciones, mientras que en 2 y 6 existió respuesta para las dosis mas altas.

La respuesta a K en los Sitios 1 y 3 era esperable, ya que se partió con deficiencias de este nutriente (0,29 y 0,15 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de K intercambiable) a la siembra, los cuales son cercanos o inferiores a los valores críticos de 0,30 y 0,34 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ sugeridos para cultivos en general (Oudri et al. 1976, Barbazán et al. 2011). La respuesta al agregado de K se observó hasta la dosis de 30 unidades de K_2O , aunque en el Sitio 1 se observaron diferencias significativas entre la dosis de 60 y más de 60 unidades (Sitio 1, Pr = 0,0035).

En los Sitios 4 y 5 no se encontraron respuestas al agregado de este nutriente, a pesar de que en el primero los niveles iniciales de K fueron bajos. Una de las posibles causas de no encontrar efecto puede haber sido el alto valor de mínima diferencia significativa (DMS). Si bien estadísticamente para estos Sitios no se encontró diferencia, existe una tendencia clara la cual muestra que a mayores dosis aumentan los rendimientos. Esto se puede ver claramente si se analiza las dosis superiores 120 y 240 kg con respecto a las demás. En el Sitio 5 se partió de niveles iniciales cercanos al rango crítico y no existió efecto al agregado de este nutriente, además los muy bajos rendimientos medios no pueden ser explicados por el nivel de K en suelo sino por causas ajenas que son particulares del sitio. En el Sitio 6 los buenos rendimientos son explicados tanto por los elevados niveles de K como demás factores determinantes del rendimiento.

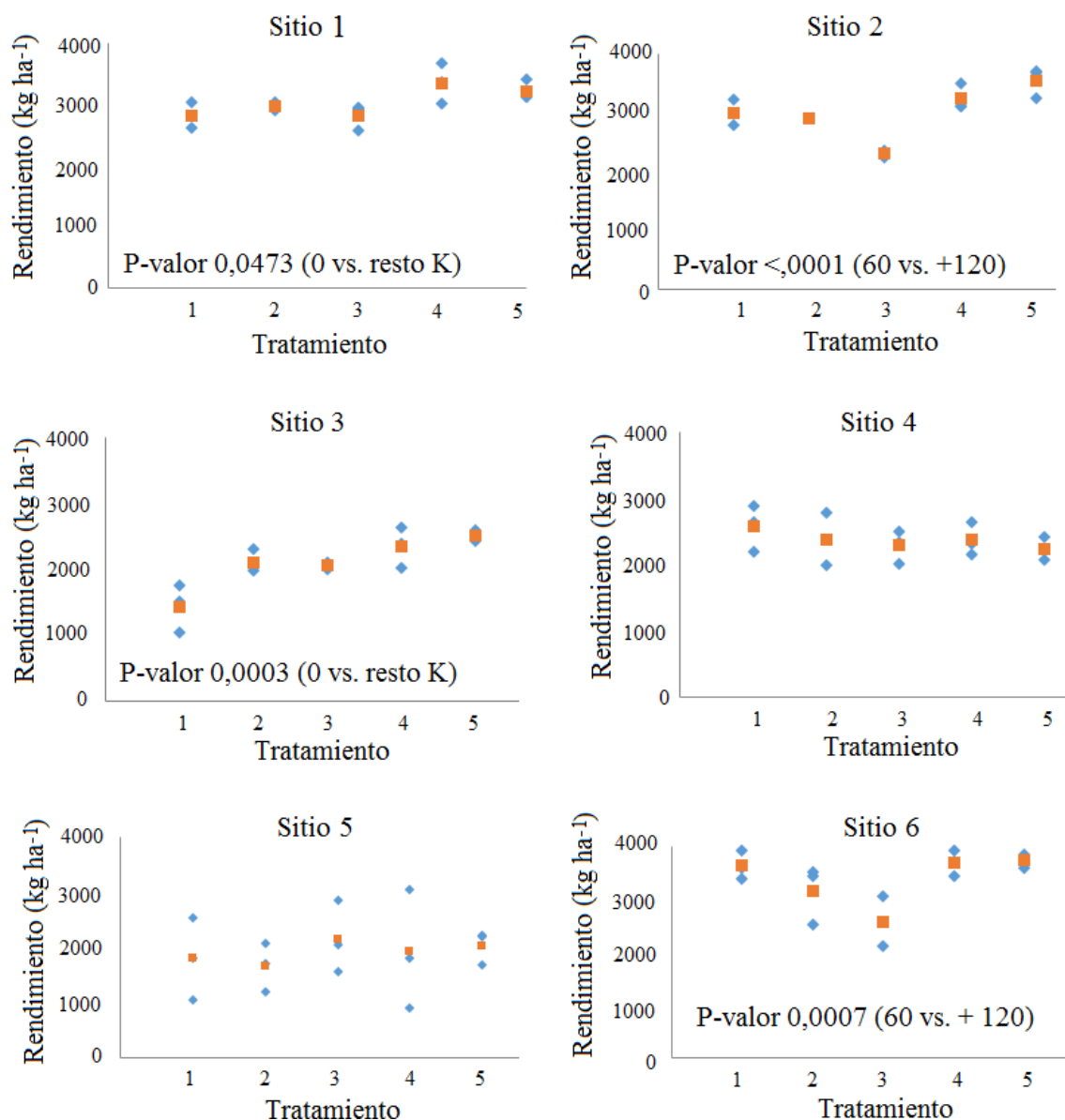


Figura 3. Variación de los rendimientos de soja según tratamiento y sitio.

Se puede observar que para soja, en los Sitios 1 y 3, existen diferencias estadísticas cuando se comparan los rendimientos de testigos frente a la media de los demás tratamientos. Por esto se puede decir que con la aplicación de cualquier dosis de K los rendimientos del cultivo van a ser mayores.

En los Sitios 2 y 6 se encontró diferencia en el contraste entre los tratamientos con 60 unidades de K₂O frente a los de 120 y 240 unidades de K₂O, esto puede estar dado por el bajo rendimiento en el tratamiento con 60 unidades, que es menor al testigo y a la dosis de 30 unidades.

Si se observa la distribución de los rendimientos en cada una de las aplicaciones se puede ver que en las de 120 y 240 unidades de K_2O los rendimientos son menos variables respecto a los restantes en donde hay mayor dispersión de los resultados. Esto indica que sin fertilización de K o aplicación de 30 y/o 60 unidades de K_2O los rendimientos pueden ser muy bajos o muy altos, sin embargo se puede tener la seguridad de tener altos rendimientos cuando se elevan las dosis. Queda claro que el Sitio 6 es promedialmente superior en rendimiento en casi todos los tratamientos y Sitio 5 el inferior.

Como muestra la Figura 5, en sorgo se encontró diferencia significativa entre los rendimientos medios de los tratamientos con K, aunque la respuesta fue hasta la dosis de 30 unidades. Al igual que en los Sitios 1 y 3 de soja cualquier aplicación con K tendría efecto en el rendimiento del cultivo. Hay una diferencia en rendimiento de 1700 kg ha^{-1} entre el testigo y la aplicación de solo 30 unidades de K_2O , y de 2150 kg ha^{-1} entre el primero y los tratamientos 120 y 240 (Figura 4).

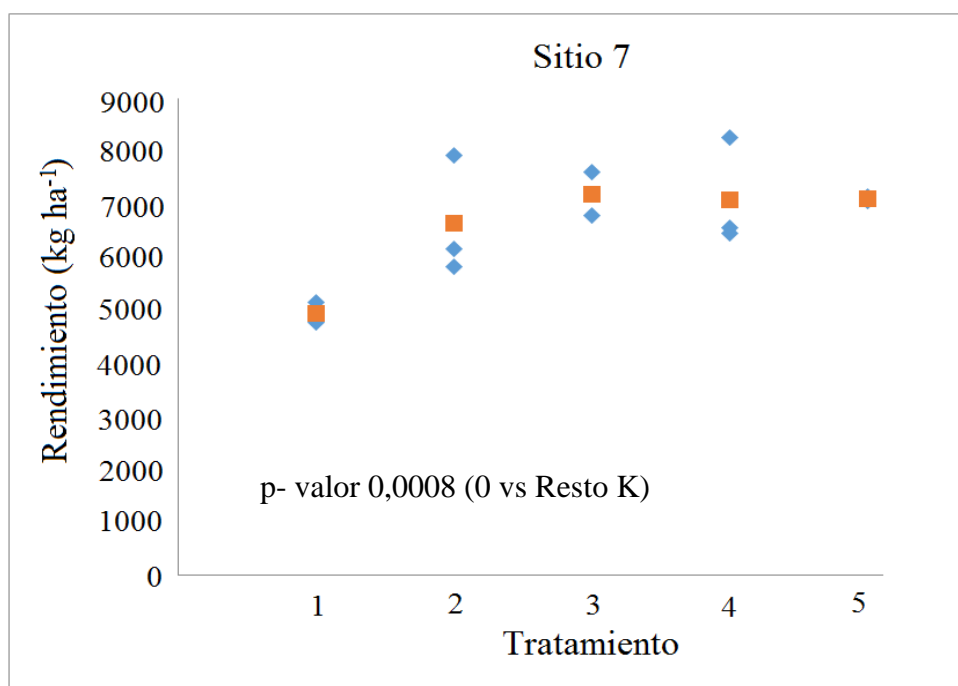


Figura 4. Variación del rendimiento en sorgo según tratamiento.

4.2.2 Efecto de la aplicación de K en el suelo

4.2.2.1 Variación de K en suelo

Como puede verse en el Cuadro 5 hay variación entre el nivel inicial de K en suelo y el testigo a floración, debido a la diferencia con la que se realizó el muestreo (tomas por bloque a siembra y por tratamiento a floración), pero sobre todo por la dinámica del nutriente en el suelo en los dos momentos mencionados.

Estos suelos se caracterizan por poseer una alta capacidad buffer por lo que cuando el cultivo extrae este nutriente, se establece el equilibrio entre el K intercambiable y K en solución, aún en condiciones de baja disponibilidad. Para el caso de los tratamientos con 240 unidades de K_2O , como era de esperar, los niveles aumentaron, ya que se aplicó por encima de lo requerido por el cultivo. Si bien la concentración de K intercambiable aumenta, no es de gran magnitud debido a que los suelos cuentan con una historia agrícola importante y además por sus características texturales poseen una alta retención del nutriente y escasas pérdidas por lavado (Hernández, 1991).

Los cultivos absorben la mayor parte del K del suelo en las etapas iniciales (Kant y Kafkafi, 2000), lo que quiere decir que el K que se encuentra disponible en la medición a floración factiblemente sea el utilizable por el cultivo siguiente. El Cuadro 5 muestra que cuando los niveles de K intercambiable a siembra se encuentran cercanos a los críticos sugeridos (Barbazán et al., 2011) como en el caso del Sitio 5 y 6, no sería necesario fertilizar para el cultivo siguiente. En estos casos, dosis de 240 unidades solo aumentarían su concentración en el suelo. Para aquellos suelos en los que los niveles a siembra fueron bajos como en los Sitios 1, 3 y 4, si no se fertiliza, el cultivo posterior comenzaría con déficit.

Cuadro 5. Valores de K intercambiable en suelo a siembra y a floración.

Tratamiento/Sitio	1	3	4	5	6	7
K a siembra ($cmol_c kg^{-1}$)	0,29	0,15	0,26	0,36	0,33	0,24
K a floración ($cmol_c kg^{-1}$)						
0	0,24	0,15	0,29	0,42	0,31	0,35
240	0,34	0,22	0,35	0,46	0,47	0,39

Por otro lado, como muestra claramente la Figura 5, existe una alta asociación entre los niveles iniciales de K intercambiable a siembra y los que se pueden encontrar a floración, tanto para los tratamientos sin agregado de K como para los que recibieron K. Este grado de asociación está reflejado en el alto valor de R^2 de 0,63 y 0,85. Esto es explicado por la alta cantidad y calidad de las arcillas presentes, que permitirían tener una alta CIC y consecuentemente una elevada capacidad de reposición de K de la solución (Conti, 2002).

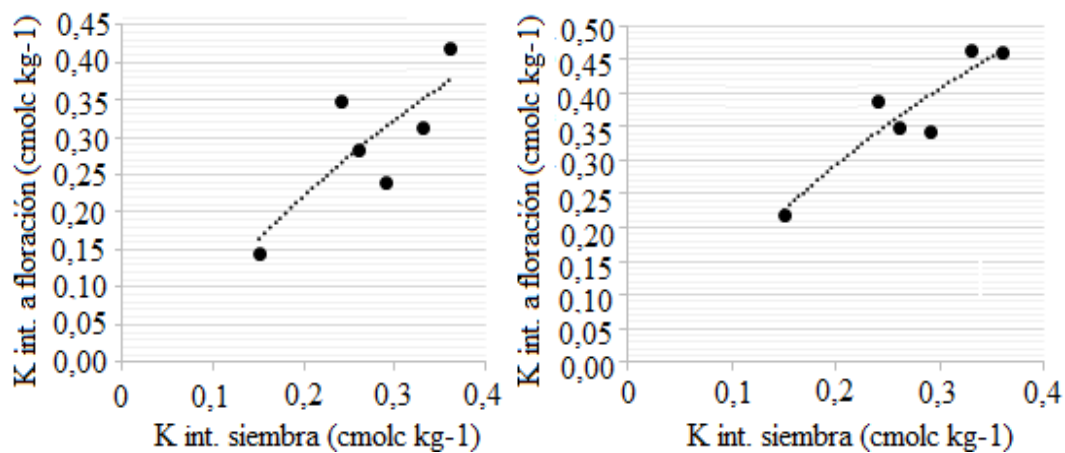


Figura 5. Relación entre K intercambiable a floración con 0 (izquierda) y 240 (derecha) kg de K₂O y el K intercambiable a la siembra.

4.2.2.2 Cálculo del equivalente de fertilizante

Para calcular el equivalente de fertilizante se evaluó la concentración de K en suelo a floración entre el testigo y la dosis más alta. Con esos datos se estimó la dosis necesaria para elevar 0,1 cmol_c kg⁻¹ de suelo. Los resultados para cada sitio están descriptos en la Figura 6.

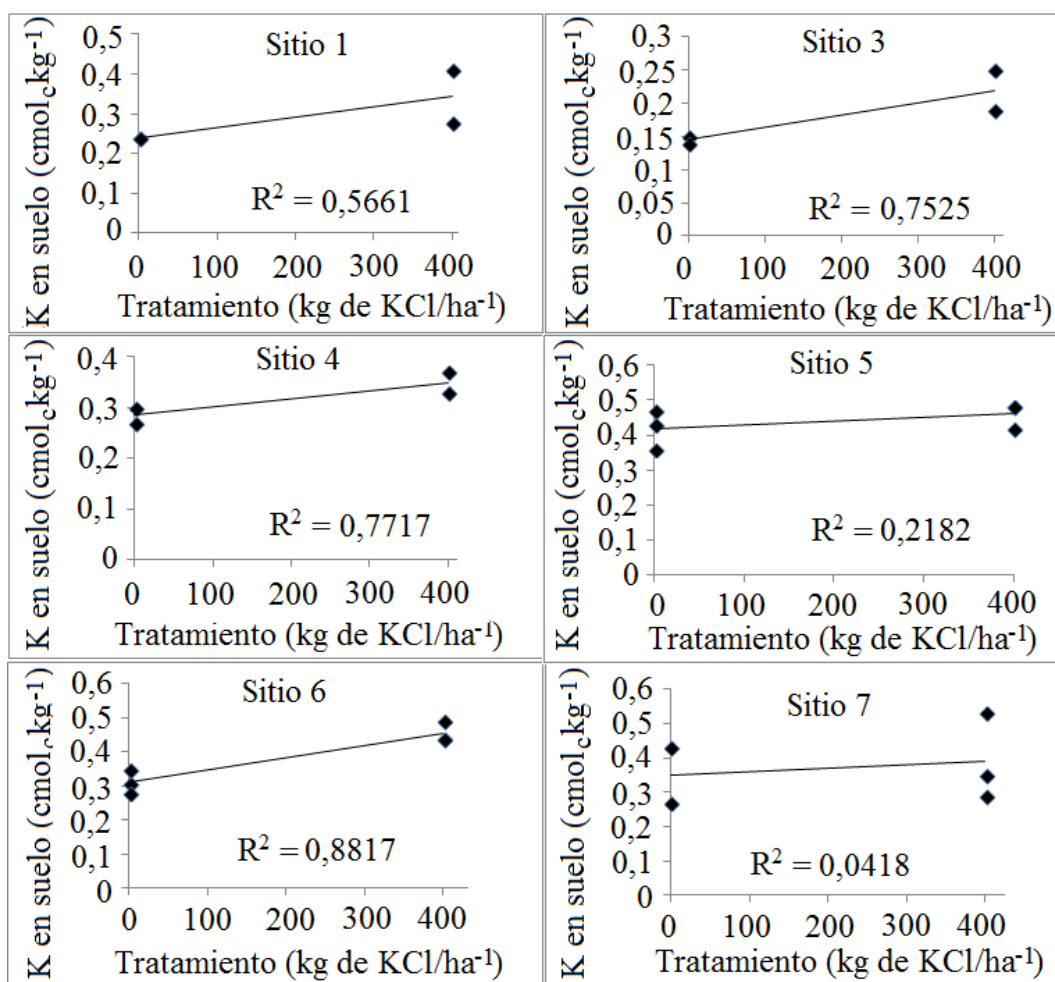


Figura 6. Concentración de K (cmol_c kg⁻¹) en suelo a floración en testigo sin agregado de K y el tratamiento con la dosis máxima (240 kg ha⁻¹ aplicada en el estudio).

Los niveles de K intercambiable en el suelo aumentaron con la dosis de 240 kg K₂O (400 kg ha⁻¹ ha KCl), pero la magnitud del incremento no fue igual para todos los sitios. Con los datos obtenidos se estudiaron los modelos matemáticos que más se ajustaron para cada situación obteniendo así el equivalente de fertilizante para cada sitio. En el Cuadro 6 se presentan dichos modelos con sus respectivos equivalentes de fertilizantes.

Como se puede ver en el Cuadro 6, se ajustó el modelo de regresión lineal ya que se contaba solo con dos tratamientos para comparar. Si bien este modelo es el mismo para todas las situaciones, el valor de sus variables es diferente ya que, como se mencionó anteriormente, las magnitudes en los cambios de concentración de K en suelo fueron diferentes.

Cuadro 6. Modelos matemáticos y equivalente de fertilizante.

Sitio	Variables			Equivalente Fertilizante	Equivalente Fertilizante
	b	a	y	x (KCl)	x (K ₂ O)
1	0,0003	0,240	0,340	333	208
3	0,0002	0,145	0,245	500	313
4	0,0002	0,285	0,385	500	313
5	0,0001	0,420	0,520	1000	625
6	0,0004	0,313	0,413	250	156
7	0,0001	0,350	0,450	1000	625

Y: $a + bx$

Y: al valor al que subirá el suelo (es el que tiene el suelo más 0.1)

a: valor de K del suelo en el testigo

b: es la pendiente

x: la dosis a aplicar para cambiar en 0,1: $x = (y - a) / b$

Los valores de equivalente de fertilizante obtenidos fueron muy superiores a la dosis teórica (117 kg ha^{-1} de K₂O a los 20 cm, asumiendo que la densidad del suelo es $1,25 \text{ g/cm}^3$; o de 88 kg ha^{-1} de K₂O teniendo en cuenta los 15 cm). En el Sitio 1 y 6 si bien son elevados, se ajustan más al valor de referencia. En el resto de los sitios, los valores de K necesarios para cambiar el valor del análisis del suelo para K son entre 1,8 y 7 veces más que la dosis teórica. Esto puede deberse a que exista retención del nutriente en el suelo, ya que la mayoría de estos poseen una historia agrícola importante.

4.2.3 Efecto de la aplicación de K en planta

Se observó un aumento del K en la planta a medida que se incrementa la dosis aplicada, ya que hay mayor disponibilidad de K en la solución del suelo (Cuadro 7). Se puede ver que los valores de K en planta son mayores en aquellos suelos donde se partió con niveles relativamente más altos de K intercambiable a la siembra (Sitios 5 y 6). En el Sitio 3, como era de esperar, el valor promedio de K en planta fue muy bajo.

Cuadro 7. Concentración de K (%) en soja según tratamiento. Los valores entre paréntesis son los niveles de K intercambiable en el suelo a la siembra ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$).

Sitio	K int.	Dosis kg ha^{-1} de K_2O						DF*	Promedio sitios
		0	30	60	81	120	240		
1	(0,29)	0,58	0,72	0,74	0,78	0,94	0,97	n.s	0,79
3	(0,15)	0,56b	0,63b	0,77ab	0,82ab	0,78ab	1,15a		0,79
4	(0,26)	0,95	1,12	1,10	1,27	1,19	1,27	n.s	1,15
5	(0,36)	0,85c	0,95bc	1,22ab	1,25abc	1,38ab	1,49a		1,19
6	(0,33)	1,37	1,58	1,45	1,67	1,49	1,46	n.s	1,50

*DF es la comparación estadística de los efectos de los tratamientos en cada sitio (Tukey; Alfa: 0,05), valores de la misma fila con igual letra no difieren estadísticamente. n.s= efecto no significativo.

Se encontraron diferencias significativas en los Sitios 3 y 5. En el primer caso (p -valor= 0,019) la respuesta probablemente es debida a que se partió de niveles bajos de K intercambiable por lo que era de esperar aumentos significativos en la concentración de K en planta. En el Sitio 5, si bien se contó con un valor más alto que el resto de los sitios de K intercambiable a la siembra, hubo respuesta de concentración de nutriente en el cultivo a los tratamientos (p -valor= 0,0058). Esto se debe a que aumenta la concentración de K en solución y aumenta la capacidad de absorción.

En el Sitio 6 no se observó respuesta a los tratamientos, ya que el suelo contaba con $0,33 \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de K, por ello no se refleja el aumento de dosis de K en K foliar. Para el caso de los Sitios 1 y 4 los contenidos de K inicial fueron intermedios, $0,29$ y $0,26 \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente, y aunque no hubo diferencias estadísticas en los efectos de la aplicación de los tratamientos, se ve claramente la tendencia a que aumente el K foliar cuando se aumenta la dosis, siendo mínima en el testigo sin aplicación y máxima en los tratamientos donde se fertilizó con más K.

Para mostrar con mayor claridad la relación entre la variable K foliar y tratamiento se elaboraron a continuación gráficos para cada Sitio (Figura 7).

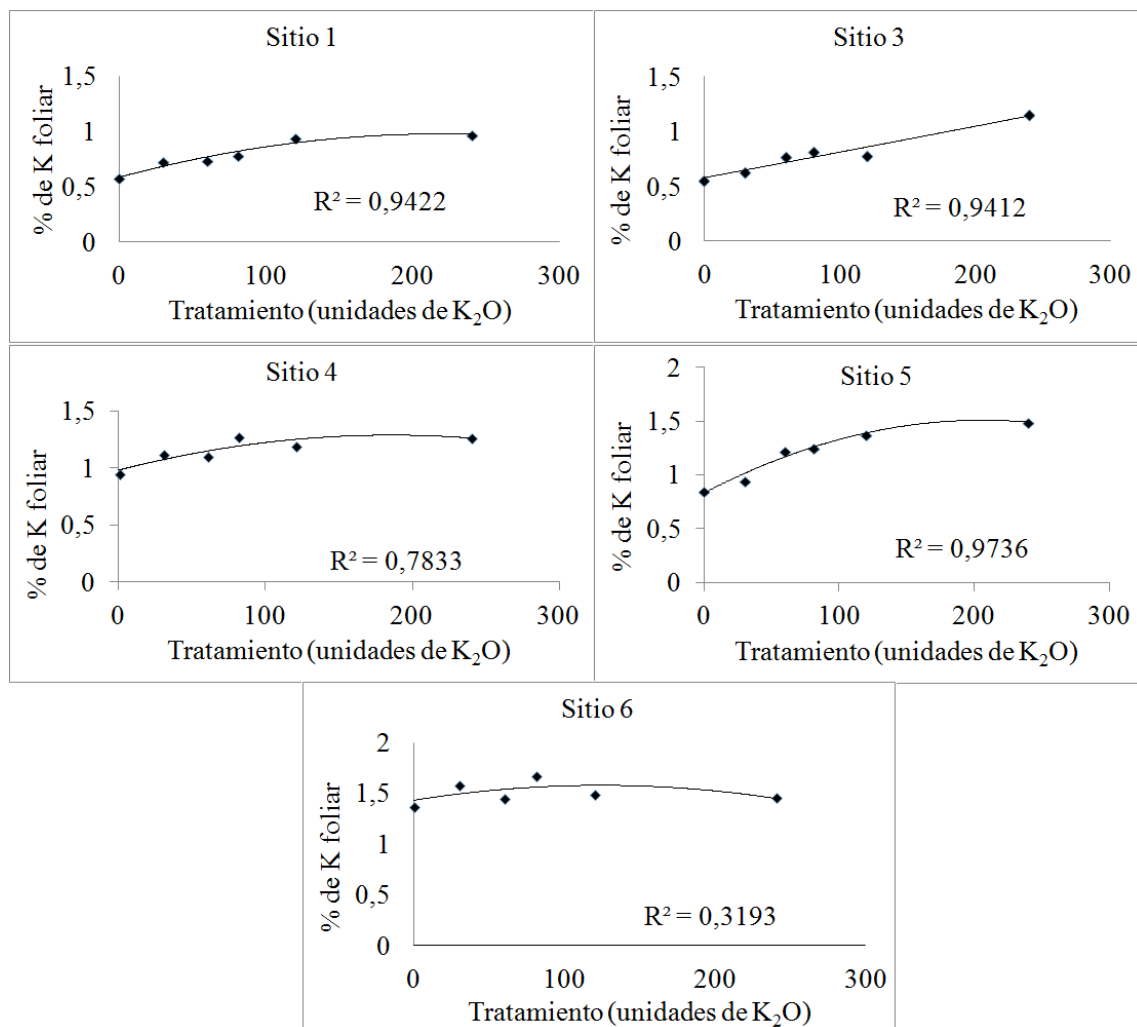


Figura 7. Relación entre dosis de K₂O y concentración de K foliar (%).

Cuando se estandarizan los datos se puede ver con mayor claridad que existe una tendencia que indica que con mayores dosis se incrementa la concentración de K en la planta. Por esto el elevado valor de R², que indica que gran parte del contenido de K en planta es explicado por el contenido de K en suelo. Esta respuesta tiene un ajuste cuadrático, con incrementos decrecientes de K en planta a medida que se aplican mayores dosis, pero se llega a un nivel máximo de fertilizante en el cual no hay aumentos de K foliar. En el Sitio 3 los incrementos de K en planta son más constantes al aumento de las dosis debido a que los niveles de K a siembra eran muy bajos, existiendo mayor respuesta al agregado.

Para determinar la asociación entre el K en planta y el rendimiento se elaboró la Figura 8.

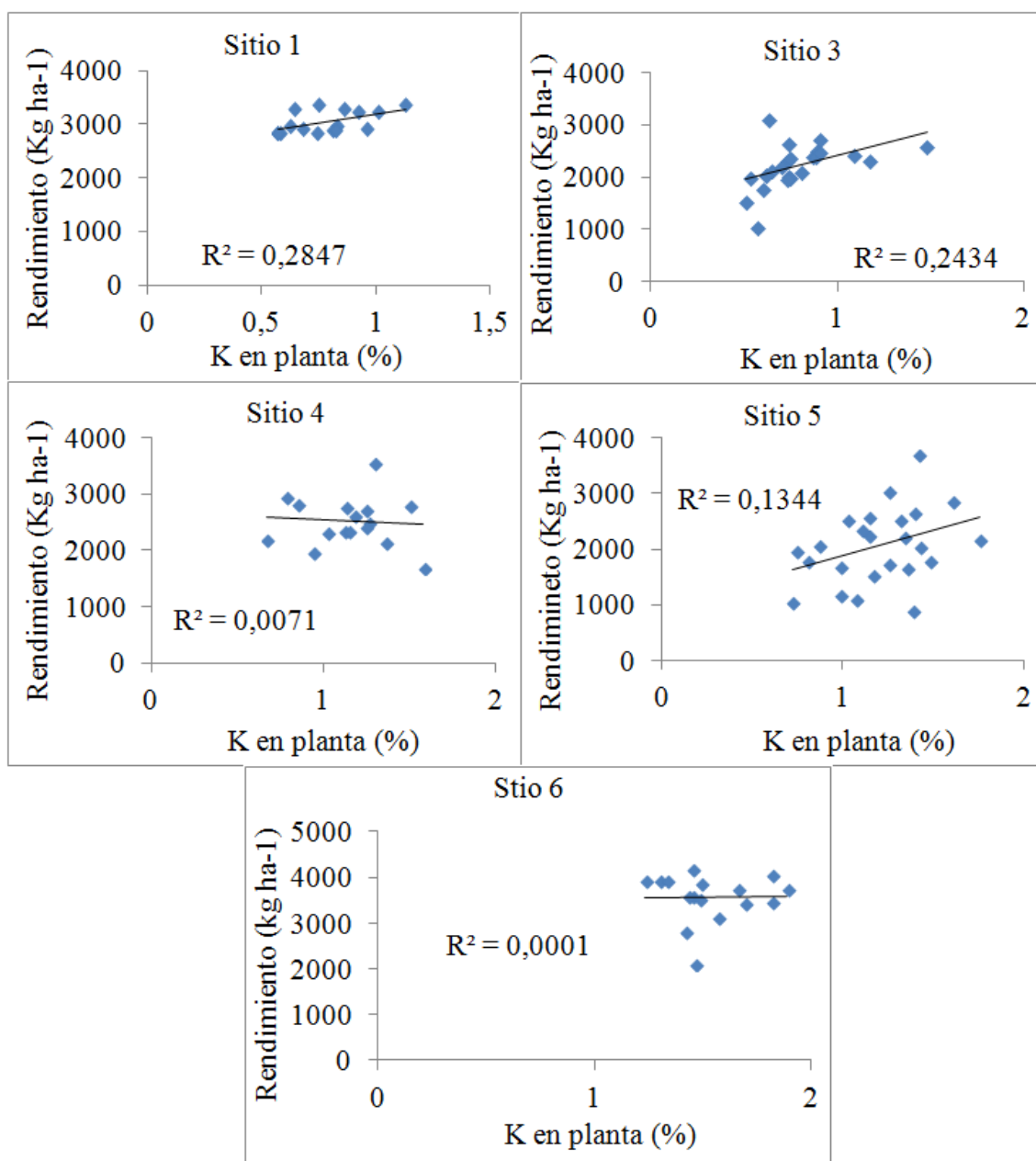


Figura 8. Relación entre % de K en planta y rendimiento (kg ha^{-1}).

Existe una baja asociación entre el K en planta y el rendimiento, por lo que se podría afirmar que el contenido de K foliar no puede ser utilizado como predictor del rendimiento.

Solo en casos particulares de algunas pocas parcelas del Sitio 6 se pudo superar el valor crítico de referencia para el cultivo de soja de 1,50 % sugerido por Correndo y García (2012), pero si se considera el valor de 1,76% de K en planta (Reuter y Robinson,

1997), en ningún tratamiento se superó ese valor. Esto podría ser explicado por el aumento en la eficiencia de utilización del K de las nuevas variedades del cultivo que se utilizan en la actualidad.

4.4 EFECTO DE LA APLICACIÓN DE MAGNESIO

4.4.1 Rendimiento

Para evaluar el efecto de la fertilización con Mg se contrastaron los resultados obtenidos sin aplicación del nutriente y con 40 kg de MgO, los cuales son indicados en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Rendimiento medio por sitio según tratamiento con Mg*.

Sitio	Tratamiento		Promedio-Sitio
	Sin Mg	Con Mg	
	Rendimiento soja (kg ha ⁻¹)		
1	2783	3338	3060
2	3193	3816	3504
3	2654	2106	2380
4	2533	2701	2617
5	2910	2206	2558
6	3608	4064	3836
Promedio tratamiento	2947	3039	
	Rendimiento sorgo (kg ha ⁻¹)		
7	7366	7173	7270

*Para el estudio del Mg se comparó el tratamiento 7 (con 40 unidades de MgO) contra el 8 (sin Mg).

Hubo efecto significativo en rendimiento producto de la aplicación de 40 unidades de MgO de 560 y 620 kg ha⁻¹ en los Sitios 1 y 2, respectivamente. En el Sitio 1 el valor de probabilidad fue de 0,0311 y en el Sitio 2 igual a 0,0230. También se aprecia una tendencia a mejorar el rendimiento en el Sitio 4 (160 kg ha⁻¹) y en el 6 (450 kg ha⁻¹). Para los restantes sitios no es posible definir el efecto negativo que tuvo la aplicación, pero éste no es significativo estadísticamente.

Si bien en algunos sitios los rendimientos fueron superiores en los tratamientos con Mg (Sitios 1, 2, 4 y 6), en otros no lo fueron, obteniendo los mayores rendimientos en los tratamientos sin aplicación, lo que hace que al evaluar la media por tratamiento de todos los sitios no haya diferencia (para soja la diferencia es menor a 100 kg ha⁻¹ y para sorgo no supera los 200 kg ha⁻¹). Cuando se analizó la variabilidad en los rendimientos en soja, se vio que el coeficiente de variación de los rendimientos fue mayor cuando se aplicaron 40 unidades de MgO, mientras que en sorgo ocurrió lo contrario.

4.4.2 Efecto de la aplicación de Mg en planta

Para evaluar el efecto en planta al igual que para K se tomaron muestras de suelo a la siembra y de planta a floración. Los resultados se muestran en la Figura 9.

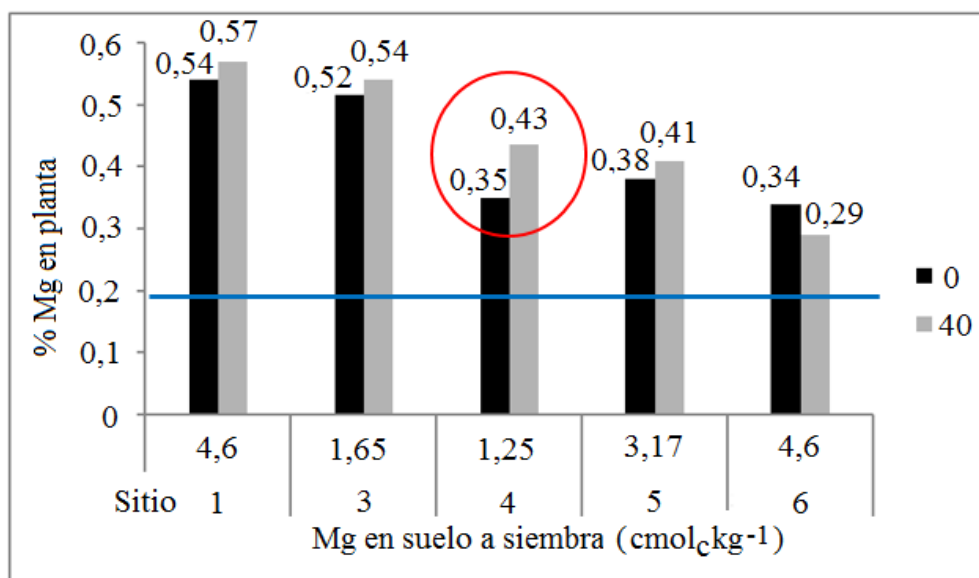


Figura 9. Relación entre Mg en suelo a siembra (cmol_c kg⁻¹) y % en planta con y sin agregado de MgO.

En todos los casos, menos en el Sitio 6, hubo un aumento del Mg en planta cuando se aplicaron 40 unidades de MgO, siendo mayor el incremento en el Sitio 4.

No se pudo establecer una relación entre el Mg en el suelo a la siembra y en la planta, debido a que por ejemplo en los Sitios 1 y 2 no existen casi diferencias en contenido en planta pero en éste último sitio hay 1,65 cmol_c kg⁻¹ de Mg intercambiable, lo que equivale a 2,8 veces menor cantidad de Mg en suelo. Si bien el resultado de análisis de suelo para los Sitios 1 y 6 fueron iguales (4,6 cmol_c kg⁻¹), lo obtenido en planta resultó muy diferente, conteniendo 0,55 % y 0,32 % respectivamente. Al igual que para el caso del K el menor contenido de Mg porcentual en el Sitio 6 podría ser explicado por el gran tamaño de las plantas observadas.

4.4.3 Relación Mg/K y Ca/Mg

Uno de los factores que afecta la disponibilidad de Mg y K es la relación entre ambos nutrientes. Se requiere un equilibrio en los niveles de ambos para no sufrir deficiencias de uno de ellos.

Cuadro 9. Relación Mg/K y Ca/Mg intercambiables ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$).

Sitio	Mg	K	Mg/K	Ca/Mg
1	4,60	0,29	16,1	4
2	3,35	0,22	15,2	5
3	1,65	0,15	11,3	4
4	1,25	0,26	4,8	3
5	3,17	0,36	8,8	8
6	4,60	0,33	13,9	3
7	2,56	0,24	10,7	10

Comparando los rangos establecidos en la bibliografía, la relación Mg/K indicaría que la disponibilidad del Mg sería suficiente, mientras que la relación Ca/Mg es la adecuada en todos los Sitios a excepción del Sitio 5 y 7 que mostrarían una carencia del nutriente. A continuación se verifica el antagonismo en la absorción de los nutrientes (Figura 10).

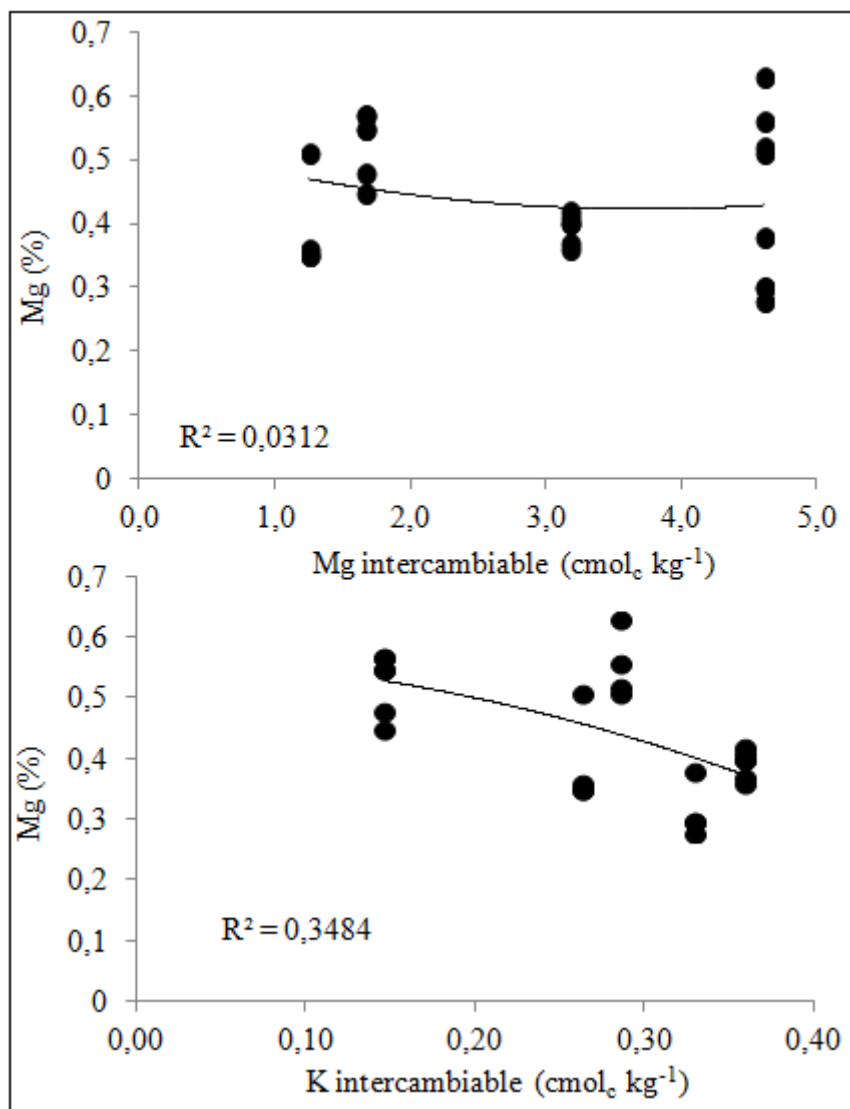


Figura 10. Relación Mg y K intercambiable (cmol_c kg⁻¹) a siembra y % de Mg en planta.

La concentración de Mg en planta no estuvo afectada por la concentración de este nutriente en el suelo, pero sí con la disponibilidad de K intercambiable. Encontrándose elevada asociación entre dichas variables, disminuyendo el % de Mg foliar cuando se incrementa el K intercambiable, debido a que ambos nutrientes competirían por la misma forma de entrada a la planta. Para este caso el modelo que mejor se ajustó es el polinómico de segundo grado, con un R^2 de 0,3484.

Para concluir la relación entre estos cationes se plantea la asociación de estos dos nutrientes en planta (Figura 11).

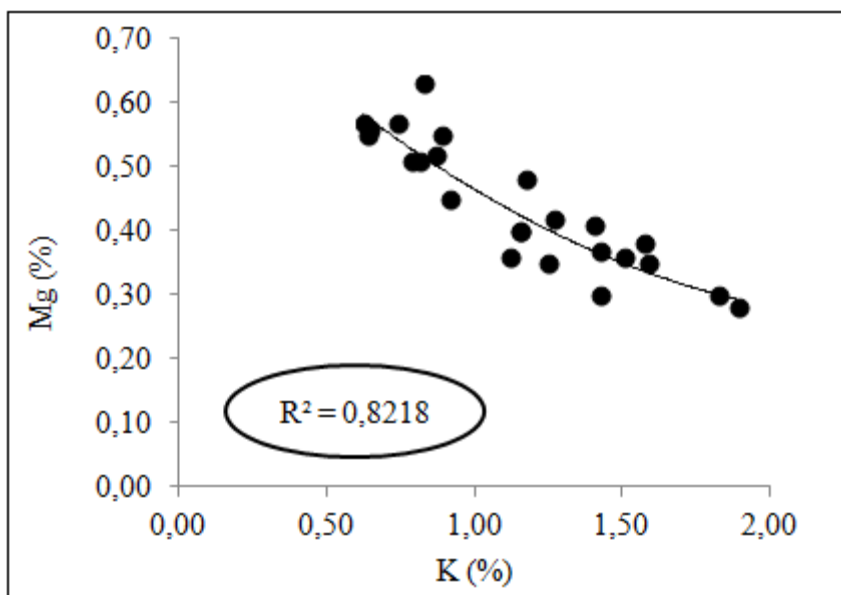


Figura 11. Relación entre el % de Mg y K en planta.

Como era esperable, al incrementarse la concentración del K foliar el % de Mg en planta disminuye, demostrando un claro antagonismo entre estos nutrientes. Esto queda bien establecido por el elevado $R^2 = 0,8218$.

A continuación se evaluó cómo afectó el Mg en la planta a floración en el rendimiento en soja (Figura 12).

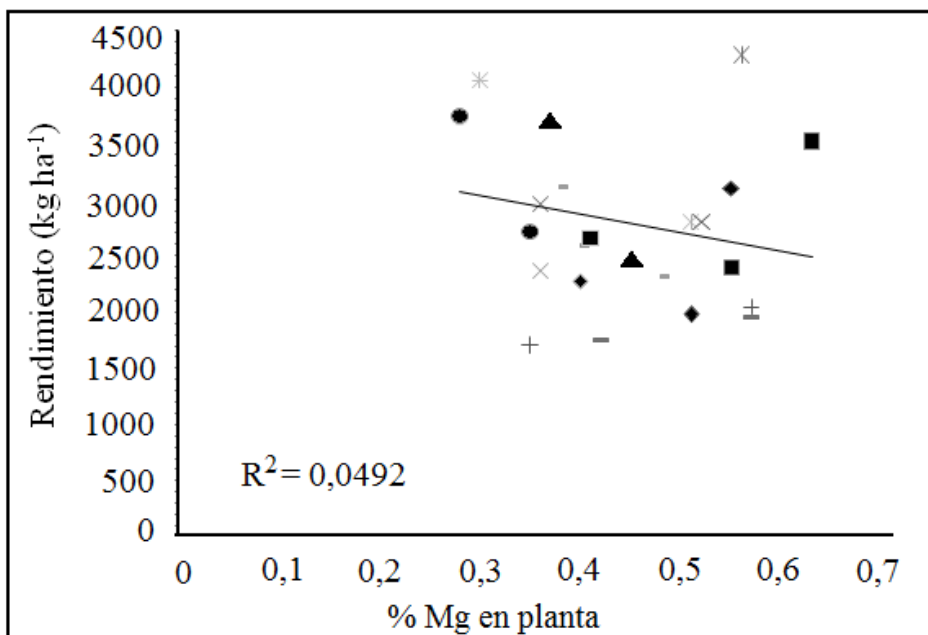


Figura 12. Relación entre Mg en planta y rendimiento en soja.

Se puede observar que para el caso de estos experimentos no hay una asociación clara entre las variables estudiadas, expresado en un muy bajo valor de R^2 . La explicación de lo expresado anteriormente puede ser que en todos los casos el contenido de Mg en planta supera el nivel crítico de 0,2 % sugeridos para soja (Kelling y Matocha 1990, Robinson y Reuter 1997). Por lo tanto el contenido de Mg en planta no sería un buen predictor del rendimiento de los cultivos.

4.3 EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ZINC

4.3.1 Rendimiento

Para el estudio del Zn se comparó el tratamiento 3 (testigo sin aplicación de Zn) y 6 (3 kg ha⁻¹ de ZnO), ambos con igual cantidad de K y P (Cuadro 10).

Cuadro 10. Rendimiento medio por sitio según tratamiento con Zn.

Sitio	Zn a siembra (mg kg ⁻¹)	Tratamientos		P-valor*
		Sin Zn	Con Zn	
		Rendimiento soja (kg ha ⁻¹)		
1	0,37	2824	2913	0,5714
2	0,44	2300	3581	<0,0001
3	0,41	2068	2420	0,1229
4	0,76	2289	2407	0,6452
5	0,46	2162	1879	0,5864
6	0,51	2584	3744	0,0019
Promedio- tratamiento		2371	2824	0,1384
		Rendimiento sorgo (kg ha ⁻¹)		
7	0,4	7192	6594	0,3385

* Contraste ortogonal entre tratamiento con y sin agregado de Zinc.

Se observó respuesta significativa ($Pr=<0,0001$) al agregado de 3 kg de ZnO en soja en el Sitio 2, con una diferencia en rendimiento de 1280 kg ha⁻¹ entre el testigo y el tratamiento con aplicación de Zn. En el Sitio 6 también hubo un incremento importante del rendimiento ($Pr=0,0019$) cuando se aplicó ZnO (1190 kg ha⁻¹). Para los demás casos el efecto del tratamiento con ZnO en el rendimiento fue bajo (aunque con efecto positivo para la mayor parte de los casos), obteniendo valores de probabilidad muy por encima del valor de significancia.

La diferencia en rendimiento por tratamiento para todos los sitios en soja fue de 450 kg ha⁻¹, cercano a la DMS (660 kg) y al valor de significancia (p -valor= 0,1384). En cuanto a los rendimientos medios por sitios, se mantiene la tendencia a que los Sitios 3,

4 y 5 sean los menos productivos, como ocurrió para el análisis de los anteriores nutrientes.

En sorgo la mayor producción se dio en el tratamiento sin agregado de Zn, el cual rindió 600 kg ha^{-1} más de que el tratamiento con Zn. De todas formas en cualquiera de los dos casos se supera ampliamente la media de rendimiento nacional de 4260 kg ha^{-1} (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2013).

4.3.2 Efecto del Zn en el suelo

Los valores de Zn a siembra son similares a los reportados por García (2011) para el litoral oeste uruguayo, sin historia de aplicación de Zn al suelo, y variaron de $0,37$ a $0,76 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn. No existió una relación entre el contenido inicial de Zn en el suelo y los rendimientos en el testigo, teniendo el Sitio 4 la mayor concentración de este nutriente pero no el mayor rendimiento. Contrariamente, el Sitio 1 con un 50% menor contenido de Zn en el suelo, el rendimiento fue ampliamente superior.

Aunque la producción en estos sitios no pueda ser explicada por el contenido de Zn a siembra, se debe mencionar el efecto positivo que tiene el agregado de Zn. Como puede verse en el Cuadro 10 los incrementos porcentuales en el rendimiento con el agregado de Zn a la siembra, llegan a ser mayor a 30% en más de un caso.

4.3.3 Efecto del pH del suelo en la disponibilidad de Zn

De acuerdo con Hernández (1992), Bordoli et al. (2013) con el aumento del pH se observó una disminución en la disponibilidad de Zn para las plantas. En la Figura 13a se encuentran los datos de todos los sitios y en la 13b no se consideró el Sitio 3 para que pudiera observarse que el mismo era un caso atípico, o que simplemente este Sitio se formó a partir de material deficiente en este nutriente. Existe una alta asociación entre dichas variables, demostrado por el elevado valor de $R^2 = 0,8702$ (Figura 13b), lo que quiere decir que el 87% de la variación del Zn en el suelo está determinado por el pH. En el estudio de este nutriente se encontró que además de la fertilización hubo un efecto importante del pH del suelo, que afectó la comparación y análisis de los diferentes sitios.

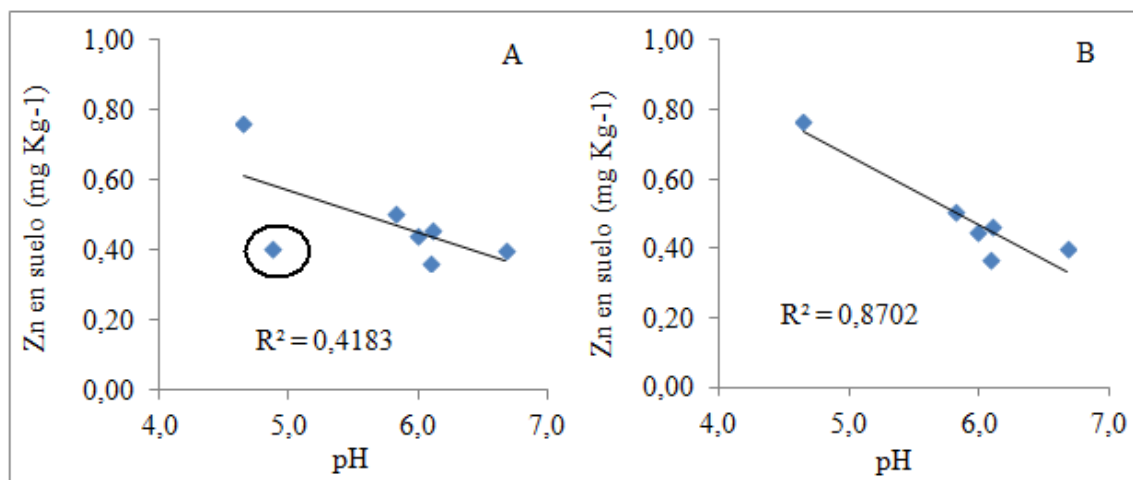


Figura 13. Efecto del pH del suelo en la disponibilidad de Zn.

4.3.4 Efecto de la aplicación de Zn en planta

En la Figura 14 se muestran los cambios en la concentración de Zn en planta, producto de la aplicación de este nutriente, son despreciables, siendo en algunos lugares hasta cinco puntos inferior cuando se fertiliza, por lo que no se puede obtener una conclusión clara de cómo afecta la concentración de este nutriente en planta al rendimiento.

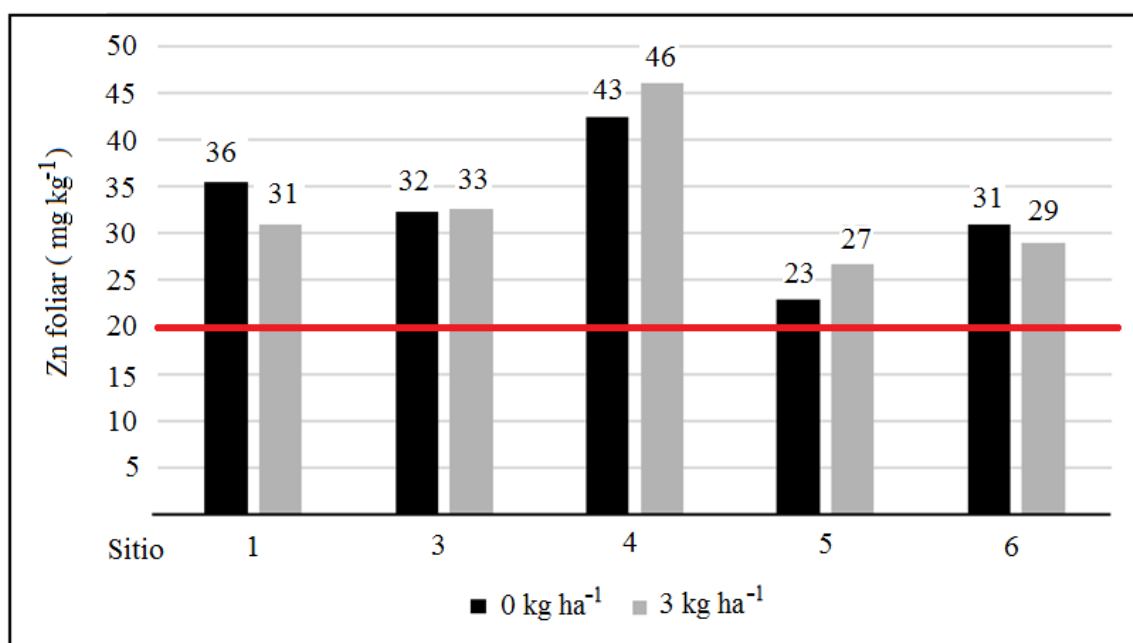


Figura 14. Efecto de la aplicación de Zn en la planta (mg kg⁻¹).

Al igual que estudios llevados a cabo por Bordoli et al. (2013), las mayores concentraciones de Zn en planta se encontraron en aquellos sitios donde el pH del suelo

era inferior. Esto pudo observarse en el Sitio 4 donde el pH fue 4,65 y el Zn foliar fue promedialmente $44,5 \text{ mg kg}^{-1}$. Por el contrario en el Sitio 5 con un pH de 6,11 el valor medio de Zn en planta fue 25 mg kg^{-1} . En todas las situaciones el Zn se encontró por encima del nivel mínimo suficiente de 20 mg kg^{-1} sugeridos (Giménez y García 1998, García 2011).

En general no hay un efecto claro del tratamiento con aplicación de Zn, ya que este es levemente positivo en algunos Sitios y en otros no lo es.

5. CONCLUSIONES

1- Para K se observó respuesta en rendimiento al agregado de dicho nutriente en aquellos sitios donde se partió con notoria deficiencia. La respuesta fue a partir de 30 unidades de K_2O en los Sitios 1, 3 y 7. Debido a la gran variabilidad de los rendimientos obtenidos, en la mayor parte de los sitios no se encontró diferencia estadísticamente significativa (causado por el alto DMS) entre los efectos de los tratamientos, sin embargo se podría afirmar para todos los sitios que existen aumentos del rendimiento cuando se incrementan las dosis de K.

Cuando se evaluó la concentración de K a floración se encontró que en el testigo sin aplicación los niveles fueron similares respecto al contenido a siembra. Esto no fue debido a que el cultivo no absorbió dicho nutriente, sino a la capacidad del suelo de mantener el equilibrio. Lo mismo sucedió cuando se aplicaron 240 unidades de K_2O , el equilibrio se desplazó hacia la parte intercambiable lo que provocó que el incremento en la concentración en la forma intercambiable no fuera de gran magnitud. Esta es la causa por la cual se obtuvieron altos valores cuando se estimó el equivalente de fertilizante.

Otro de los efectos esperados de los tratamientos ocurrió cuando se analizó la concentración de K en planta, existiendo una tendencia general a que el contenido de K foliar se incremente con mayores dosis. Sin embargo no fue tan clara la asociación entre el rendimiento y dicha variable.

2- Se encontró respuesta en rendimiento al agregado de Mg en los Sitios 1 y 2, además se observó un efecto positivo en los Sitios 4 y 6. No obstante la variabilidad en los rendimientos con aplicación fue mayor, lo que no asegura siempre altos rendimientos.

Existió una asociación positiva entre el K intercambiable y el contenido de Mg en planta, no así entre ésta última y el rendimiento.

3- Cuando se estudió la influencia del Zn en el rendimiento se pudo encontrar que para los Sitos 2 y 6 hubo diferencias significativas cuando se aplicó, y para los restantes la tendencia fue la misma. Para el cultivo de soja el incremento fue de 450 kg ha^{-1} cuando se evaluó la media por tratamiento para todos los sitios.

4- Tradicionalmente los estudios de fertilización de los cultivos de soja se centran en la evaluación del efecto del agregado de nutrientes tales como N y P pero las nuevas exigencias y optimización de los recursos han llevado a considerar también otros nutrientes como K, Mg y Zn. Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que es necesario profundizar los estudios en estas nuevas alternativas de manejo nutricional del cultivo.

6. RESUMEN

La expansión e intensificación de la agricultura en los últimos años ha llevado a la explotación de áreas de menor productividad y a una mayor tasa de extracción, provocando que se den deficiencias de nutrientes que antes no aparecían como problemáticas. En el presente estudio se evaluó el efecto del agregado de K, Zn y Mg en la planta y en el suelo. Para esto en la zafra 2012/13 se realizaron ensayos en cultivos comerciales de soja y sorgo localizados en el litoral agrícola de Uruguay. Los experimentos contaron con ocho tratamientos, de los cuales cinco fueron para la evaluación de K, y los restantes para los nutrientes Mg y Zn. La disponibilidad hídrica hasta el mes de diciembre fue más alta que la media histórica y luego de este mes fue menor, pudiéndose observar una media para el ciclo del cultivo similar a la media de la región, por lo que este factor permitió llevar a cabo el estudio sin inconvenientes. Al evaluar cada nutriente se encontró que hubo efecto producto del agregado de K en el rendimiento, en la concentración en planta y suelo. En algunos sitios se observó también efecto del agregado de Mg y de Zn, encontrando para la mayor parte de los casos un efecto positivo. Surge como necesario continuar con la realización de más estudios que incluyan el agregado de Zn y de Mg para poder ajustar recomendaciones para la aplicación de estos nutrientes.

Palabras clave: K, Mg y Zn en suelo y planta; Nivel crítico en suelo y planta; Respuesta a la fertilización en cultivos de verano.

7. SUMMARY

The expansion and intensification of agriculture in recent years has led to the exploitation of areas of minor productivity and to a mayor rate of extraction, provoking nutrition deficiencies that do not appear as problems before. In this study the effect of the added of K, Zn and Mg in the plant and soil were evaluated. For this purpose in the 2012/2013 harvest, testing of commercial soya and sorghum crops in the coastal agricultural area of Uruguay were made. The experiment counted with eight treatments, which five of them were made for the evaluation of K and the rest of them for the other nutrients mentioned before. The water availability until December was higher than the historical average and then after this month it was lower, seeing that the average for the cycle of the crop was similar to the average of the region, for this reason the study was done without inconvenient. When evaluating each nutrient it was found that there was a spillover due to the use of K in the output, in the concentration in both, plant and soil. In some places it was also observed the effect of the Zn and Mg, finding in most cases a positive effect. It would be necessary to continue with the carrying out of more studies which include the cluster of Zn and Mg to be able to adjust recommendations to the implementation of these nutrients.

Key words: K, Mg and Zn in soil and plant; Citric level in soil and plant; Answer to the fertilization in summer crops.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ALMADA, P. 2006. Fertilización P y K de maíz en tres suelos de Durazno. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 67 p.
2. BARBAZÁN, M. 1998. Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes. Montevideo, Facultad de Agronomía. 27 p.
3. _____; FERRANDO, M.; ZAMALVIDE, J. 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* en Uruguay. *Agrociencia* (Montevideo). 11(1): 22 – 34.
4. _____; _____; _____. 2008. Diagnóstico nutricional de *Lotus corniculatus* L. en suelos del Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 39: 6-13.
5. _____.; BAUTES, C.; BEUX, L.; BORDOLI, M.; CANO J.; ERNST O.; GARCÍA 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.
6. _____.; _____.; _____.; _____.; CALIFRA, A.; CANO, J.; DEL PINO, A.; ERNST, O.; GARCÍA, A.; GARCÍA, F.; MAZZILLI, S.; QUINCKE, A. 2012. Soil potassium in Uruguay; current situation and future prospects. *Better Crops*. 96 (4): 21-23.
7. 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*. no. 41: 1-8.

8. BORDOLI, J.; MALLARINO, A. 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agronomy Journal*. 90: 27-33.
9. _____.; 2001. Dinámica de nutrientes y fertilización en siembra directa. In: Díaz Rosselló, R. coord. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 289-297.
10. _____.; BARBAZÁN, M.; ROCHA, L. 2012. Soil nutritional survey for soybean production in Uruguay. *Agrociencia (Montevideo)*. 16 (3): 76-83.
11. _____.; _____.; _____. 2013. Relevamiento nutricional del cultivo de soja en Uruguay. (en línea). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 11: 8-15. Consultado 01 jun. 2013. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/C599DE921435EE5185257BE1005196B9/\\$FILE/IAH%2011%20-%20SEP%202013.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/C599DE921435EE5185257BE1005196B9/$FILE/IAH%2011%20-%20SEP%202013.pdf)
12. 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.
13. CASANOVA, O.; FERRANDO, M. 2003. Cuantificación mediante lisímetros del lavado de bases del suelo, bajo dos regímenes hídricos. *Agrociencia (Montevideo)*. 7 (2): 39-48.
14. CLÉRICI, C.; BAETHGEN, W.; GARCÍA, F.; HILL, M. 2004. Estimación del impacto de la soja sobre erosión y c orgánico en suelos agrícolas del Uruguay. In: Jornada de Cultivos de Verano (2004, La Estanzuela). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 17-22 (Actividades de Difusión no. 371).

15. 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.
16. CORRENDO, A.; GARCÍA, F. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico; cultivos extensivos. IPNI Cono Sur. Archivo Agronómico. no. 14. 8 p.
17. DURÁN, A. 2004. Composición del suelo. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 49 p.
18. GARCÍA, A.; QUINKE, A.; PEREIRA, S.; DÍAS, M. 2009. Respuesta a cloruro de potasio (KCl) en trigo y cebada. In: Jornada Cultivos de Invierno (2009, Mercedes, Soriano, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 13-18 (Actividades de Difusión no. 566).
19. _____ . 2011. El zinc en la producción de maíz de secano. Revista INIA. no. 26: 49-52.
20. _____.; QUINKE, A. 2012. El Potasio (K) en la producción de cultivos de invierno. In: Jornada Cultivos de Invierno (2012, Mercedes, Soriano, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 9-14 (Actividades de Difusión no. 677).
21. GIMENÉZ, A.; GARCÍA, A. 1998. Agricultura de precisión; zona con deficiencia de Zinc en un cultivo de maíz bajo riego. (en línea). Montevideo, INIA. 5 p. Consultado 15 ene. 2014. Disponible en <http://www.inia.org.uy/online/site/publicacion-ver.php?id=1861>.
22. HERNÁNDEZ, J. 1992. Potasio. Montevideo, Facultad de Agronomía. 36 p.

23. _____. 1996. Micronutrientes. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 31- 40.
24. HOFFMAN, E. s.f. Criterios y estrategias de fertilización que apunten a asegurar el suministro de fosforo en cultivos de soja segunda. Montevideo, Facultad de Agronomía. 11 p.
25. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA (INIA). 2003. Grupo agroclima y sistemas de información (GRAS). (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 15 jul. 2013. Disponible en <http://www.inia.org.uy/online/site/951411.php>.
26. KANT, S.; KAFKAFI, U. 2000. Absorción de potasio por los cultivos en distintos estadios fisiológicos. (en línea). In: Internacional Potash Institute Annual Conference (5th., 2000, Rehovot, Israel). Potasio en plantas y animales. Rehovot, s.e. pp. 263-279. Consultado 24 ago. 2012. Disponible en <http://www.ipipotash.org/udocs/Sesion%20V.pdf>
27. KELLING, K.; MATOCHA, J. 1990. Plant analysis as an aid in fertilizing forage crops. In: Westerman, R. L. ed. Soil testing and plant analysis. 3rd. ed. Madison, WI, Soil Science Society of America. pp. 603-643.
28. LAZBAL, F. 1998. Efecto de diferentes dosis de nitrógeno, boro, hierro y magnesio en el rendimiento y calidad del cultivo de frutilla. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 95 p.
29. MALAVOLTA, E. 2006. Relación entre el Fosforo y el Zinc. INPOFOS. Informaciones Agronómicas. no. 63: 12-13.

30. MARSCHENER, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. (en línea). 2nd. ed. London, Academic Press. pp. 229-478. Consultado 05 ene. 2014. Disponible en <https://www.google.com.uy/search?tbm=bks&hl=es&q=Marschner+1995>.
31. MIKKELSEN, R. 2010. Soil and fertilizer magnesium. Better Crops. 94 (2): 26-28.
32. MORÓN, A.; BAETHGEN, W. 1996. Relevamiento de la fertilización de los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Montevideo, INIA. 15 p. (Serie Técnica no. 73).
33. OUDRI, N.; CASTRO, J.; DOTI, R.; SECONDI DE CARBONELL, A. 1976. Guía para fertilización de cultivos. Montevideo, MAP. 48 p.
34. PERDOMO, C.; CARDELLINO, G. 2006. Respuesta del maíz a fertilizaciones definidas con diferentes criterios de fertilización. Agrociencia (Montevideo). 10 (1): 63-79.
35. PÉREZ, G.; PÉREZ, A. 2013. Fertilización con Zinc en el cultivo de maíz; impregnación de fertilizantes fosforados. (en línea). Bolívar, INTA. 6 p. Consultado 20 ene. 2014. Disponible en <http://inta.gob.ar/documentos/fertilizacion-con-zinc-en-el-cultivo-de-maiz-impregnacion-de-fertilizantes-fosforados/>.
36. QUINCKE, A.; SAWCHIK, J. 2011. Manejo y conservación de suelos; elementos para mejorar el diseño de las rotaciones agrícolas. In: Jornada de Divulgación (2011, Durazno, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 11-12 (Actividades de Difusión no. 646).

37. RATTO, S.; MIGUEZ, F. 2006. Zinc en el cultivo de maíz, deficiencia de oportunidad. INPOFOS. Informaciones Agronómicas. no. 63: 8-11.
38. REUTER, D.; ROBINSON, J. 1997. Plant analysis; an interpretation manual. Victoria, Australia, CSIRO. 572 p.
39. ROMERO, G.; MARIUS, N. 2002. Deficiencia de nutrientes. Montevideo, Facultad de Agronomía. 9 p.
40. TAIZ, L; ZEIGER, E. 2006. Plant physiology. 3rd. ed. Sunderland, Massachusetts, Sinauer. 707 p.
41. TERRA, A.; GARCÍA, F. 2001. Siembra directa y rotaciones forrajeras en las Lomadas del Este; síntesis 1995-2000. Montevideo, INIA. 100 p. (Serie Técnica no. 125).
42. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. PRENADER. 2010. Cartografía de suelos CONEAT. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 29 jul. 2012. Disponible en <http://www.prenader.gub.uy/coneat/viewer.htm?Title=CONEAT%20Digital>.

9. ANEXOS

ANEXO 1. Análisis estadístico por Sitio para cada nutriente.

Sitio 1.

Dependent Variable: Rendimiento					
Sum of	DF	Squares	Mean Square	F value	Pr>F
Source Model	9	1291961,13	143551,24	4,03	0,01
Error	14	498291,22	35592,23		
Corrected Total	23	1790252,34			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Rendimiento Mean		
0,721664	6,226296	188,66	3030,04		
Source	DF	Type I SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	83710,74	41855,37	1,18	0,3372
trat	7	1208250,38	172607,19	4,85	0,0059
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	83710,74	41855,37	1,18	0,3372
trat	7	1208250,38	172607,19	4,85	0,0059

Dependent Variable: Rendimiento					
Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F value	Pr>F
0 vs resto	1	138393,91	138393,90	3,89	0,0687
0 vs resto K	1	168368,74	168368,74	4,73	0,0473
30 vs +60	1	62798,63	62798,63	1,76	0,2053
60 vs +120	1	438065,49	438065,49	12,31	0,0035
120 vs 240	1	27135,19	27135,19	0,76	0,3973
Zn vs -Zn	1	11955,14	11955,14	0,34	0,5714
Mg vs -Mg	1	463215,06	463215,06	13,01	0,0029

Sitio 2.

Dependent Variable: Rendimiento					
Sum of Source	DF	Squares	Mean Square	F value	Pr>F
Model	9	4831723,91	536858,21	11,78	<.0001
Error	14	637982,85	45570,20		
Corrected Total	23	5469706,75			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Rendimiento Mean		
0,883361	6,683526	213,4718	3193,99		
Source	DF	Type I SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	103031,39	51515,69	1,13	0,3507
trat	7	4728692,52	675527,50	14,82	<.0001
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	103031,39	51515,69	1,13	0,3507
trat	7	4728692,52	675527,50	14,82	<.0001

Dependent Variable: Rendimiento					
Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F value	Pr>F
0 vs resto	1	131879,61	131879,61	2,89	0,111
0 vs resto K	1	118,33	118,33	0,39	0,9601
30 vs +60	1	33413,92	33413,92	0,73	0,4063
60 vs +120	1	2340796,68	2340796,67	51,37	<.0001
120 vs 240	1	134921,36	134921,36	2,96	0,1073
Zn vs-Zn	1	2461123,01	2461123,00	54,01	<.0001
Mg vs -Mg	1	579849,47	579849,47	12,72	0,0031

Sitio 3.

Dependent Variable: Rendimiento					
Sum of	DF	Squares	Mean Square	F value	Pr>F
Source					
Model	9	3061469,61	340163,290	4,93	0,0041
Error	14	966767,42	69054,816		
Corrected Total	23	4028237,026			
Rendimiento					
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Mean		
0,760002	11,90682	262,7828	2206,994		
Source	DF	Type I SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	97805,10	48902,548	0,71	0,5094
trat	7	2963664,51	423380,644	6,13	0,0020
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	97805,10	48902,548	0,71	0,5094
trat	7	2963664,51	423380,644	6,13	0,0020

Dependent Variable: Rendimiento					
Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F value	Pr>F
0 vs resto	1	2026643,87	2026643,869	29,35	<.0001
0 vs resto K	1	1617884,29	1617884,29	23,43	0,0003
30 vs +60	1	89132,47	89132,47	1,29	0,2750
60 vs +120	1	261031,90	261031,90	3,78	0,0722
120 vs 240	1	40453,11	40453,11	0,59	0,4568
Zn vs -Zn	1	186114,89	186114,89	2,70	0,1229
Mg vs -Mg	1	450232,69	450232,69	6,52	0,0230

Sitio 4.

Dependent Variable: Rendimiento					
Sum of Source	DF	Squares	Mean Square	F value	Pr>F
Model	9	637295,93	70810,66	0,75	0,6596
Error	14	1318080,02	94148,57		
Corrected Total	23	1955375,95			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Rendimiento Mean		
0,32592	12,5853	306,8364	2438,06		
Source	DF	Type I SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	138816,83	69408,41	0,74	0,4961
trat	7	498479,10	71211,30	0,76	0,6314
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	138816,83	69408,41	0,74	0,4961
trat	7	498479,10	71211,30	0,76	0,6314

Dependent Variable: Rendimiento					
Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F value	Pr>F
0 vs resto	1	66791,36	66791,36	0,71	0,4138
0 vs resto K	1	157424,82	157424,82	1,67	0,2169
30 vs +60	1	14520,19	14520,19	0,15	0,7004
60 vs +120	1	701,5819	701,58	0,01	0,9324
120 vs 240	1	24597,14	24597,14	0,26	0,6172
Zn vs -Zn	1	20848,84	20848,84	0,22	0,6452
Mg vs -Mg	1	42292,44	42292,44	0,45	0,5136

Sito 5.

Dependent Variable: Rendimiento					
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F value	Pr>F
Model	5047507,34	9	560834,15	1,46	0,255
Error	5393497,49	14	385249,82		
Corrected Total	10441004,83	23			
R-Square	0,483431	Coeff Var	29,96941	Root MSE	620,685
				Rendimiento Mean	2071,062
Source	DF	Type I SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	1937939,51	968969,754	2,52	0,1166
trat	7	3109567,83	444223,976	1,15	0,3869
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	1937939,51	968969,754	2,52	0,1166
trat	7	3109567,83	444223,976	1,15	0,3869

Dependent Variable: Rendimiento					
Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F value	Pr>F
0 vs resto	1	259938,938	259938,9382	0,67	0,4252
0 vs restoK	1	52979,9868	52979,9868	0,14	0,7163
30 vs +60	1	325443,138	325443,1384	0,84	0,3736
60 vs +120	1	67327,0109	67327,0109	0,17	0,6823
120 vs 240	1	20273,4088	20273,4088	0,05	0,8219
Zn vs-Zn	1	119475,782	119475,7816	0,31	0,5864
Mg vs-Mg	1	743025,418	743025,4177	1,93	0,1866

Sitio 6.

Dependent Variable: Rendimiento					
Sum of	DF	Squares	Mean Square	F value	Pr>F
Source					
Model	9	4569278,17	507697,57	3,67	0,0148
Error	14	1937149,33	138367,81		
Corrected Total	23	6506427,50			
Rendimiento					
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Mean		
0,702271	10,5315	371,9782	3532,05		
Source	DF	Type I SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	193517,11	96758,56	0,7	0,5135
trat	7	4375761,06	625108,72	4,52	0,0080
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	193517,11	96758,56	0,7	0,5135
trat	7	4375761,06	625108,72	4,52	0,0080

Dependent Variable: Rendimiento					
Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F value	Pr>F
0 vs resto	1	43203,797	43203,797	0,31	0,5851
0 vs resto K	1	285994,45	285994,45	2,07	0,1725
30 vs +60	1	77093,76	77093,76	0,56	0,4678
60 vs +120	1	2606291,42	2606291,42	18,84	0,0007
120 vs 240	1	3812,77	3812,77	0,03	0,8705
Zn vs -Zn	1	2016600,40	2016600,40	14,57	0,0019
Mg vs -Mg	1	310984,04	310984,04	2,25	0,1560

Sitio 7.

Dependent Variable: Rendimiento					
Sum of	DF	Squares	Mean Square	F value	Pr>F
Source Model	9	13156964,4	1461884,93	2,56	0,0557
Error	14	7990115,37	570722,53		
Corrected Total	23	21147079,76			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Rendimiento Mean		
0,622165	11,1684	755,4618	6,38		
Source	DF	Type I SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	251690,43	125845,22	0,22	0,8048
trat	7	12905274	1843610,56	3,23	0,0294
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F value	Pr>F
rep	2	251690,43	125845,22	0,22	0,8048
trat	7	12905274,00	1843610,56	3,23	0,0294

Dependent Variable: Rendimiento					
Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F value	Pr>F
0 vs resto	1	11371117,60	11371117,56	19,92	0,0005
0 vs resto K	1	10246177,20	10246177,15	17,95	0,0008
30 vs +60	1	542293,88	542293,88	0,95	0,3462
60 vs +120	1	16538,28	16538,28	0,03	0,8673
120 vs 240	1	737,01	737,01	0,02	0,9718
Zn vs -Zn	1	537067,88	537067,88	0,94	0,3485
Mg vs -Mg	1	55996,29	55996,29	0,10	0,7587