

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**FERTILIZACIÓN CON POTASIO EN SOJA: RESPUESTA DEL
CULTIVO A CARACTERÍSTICAS EDÁFICAS Y
TOPOGRÁFICAS**

por

Javier COITIÑO LÓPEZ

TESIS presentada como uno
de los requisitos para obtener
el título de Magíster en
Ciencias Agrarias
opción Ciencias Vegetales

**MONTEVIDEO
URUGUAY
Julio 2016**

Tesis aprobada con mención por el tribunal integrado por Ing. Agr. (Dra.) Mónica Cadenazzi, Ing. Agr. (PhD.) José Terra e Ing. Agr. (PhD.) Fernando O. García, el 26 de Julio de 2016. Autor: Ing. Agr. Javier Coitiño López. Director Ing. Agr. Oswaldo Ernst, Co-directora Ing. Agr. (PhD.) Mónica Barbazán.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Ing. Agr. Oswaldo Ernst, por brindarme la posibilidad de realizar estos estudios y ser el guía durante todo el proceso.

A la Ing. Agr. (PhD.) Mónica Barbazán, por su rol de co-tutora y colaboración activa en los ensayos.

A la Facultad de Agronomía por permitirme continuar con el proceso de formación académica.

A los compañeros del Laboratorio N° 1 de la E.E.M.A.C y compañeros de tareas en esta Estación, Cecilia, Ramiro, Hernán, Gonzalo, Lorena, Monico, Edith y Elsie, por su colaboración en las diversas tareas operativas.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación, por apoyar el trabajo mediante una beca de Maestría.

A mi familia, por acompañar e interesarse en forma constante durante las diversas etapas transcurridas en este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. OBJETIVOS.....	9
2. <u>FERTILIZACIÓN CON POTASIO EN SOJA: RESPUESTA DEL CULTIVO A CARACTERÍSTICAS EDÁFICAS Y TOPOGRÁFICAS</u>	11
2.1. RESUMEN.....	11
2.2. SUMMARY.....	12
2.3. INTRODUCCIÓN.....	13
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
2.4.1. <u>Sitio experimental</u>	16
2.4.2. <u>Prácticas culturales y tratamientos</u>	16
2.4.3. <u>Determinaciones</u>	19
2.4.4. <u>Metodología de análisis de datos</u>	21
2.5. RESULTADOS.....	23
2.5.1. <u>Precipitaciones</u>	23
2.5.2. <u>Respuesta en rendimiento de soja</u>	24
2.5.3. <u>Variación de K en el suelo</u>	26
2.5.4. <u>Relación entre respuesta del cultivo de soja y atributos del suelo</u>	27
2.6. DISCUSIÓN.....	29
2.7. AGRADECIMIENTOS.....	32
2.8. BIBLIOGRAFÍA.....	33

3. <u>VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN POTÁSICA</u>	39
3.1. RESUMEN	39
3.2. SUMMARY	40
3.3. INTRODUCCIÓN	40
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS	42
3.4.1. <u>Sitio experimental</u>	42
3.4.2. <u>Prácticas culturales y tratamientos</u>	43
3.4.3. <u>Determinaciones</u>	44
3.4.4. <u>Análisis de datos</u>	47
3.5. RESULTADOS	47
3.6. DISCUSIÓN	54
3.7. CONCLUSIONES	56
3.8. AGRADECIMIENTOS	57
3.9. BIBLIOGRAFÍA	57
4. <u>DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GLOBALES</u>	61
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	64
6. <u>ANEXOS</u>	77

RESUMEN

Los objetivos de este estudio fueron: (i) cuantificar la respuesta de soja a la fertilización con potasio (K) frente a variaciones en el K intercambiable (K int.) próximas al valor crítico tentativo; (ii) estudiar la asociación de la respuesta en rendimiento a la fertilización con otras características edáficas y topográficas; (iii) estudiar la variación temporal de la respuesta a la fertilización con K; y (iv) identificar zonas dentro de una chacra con diferente respuesta a la fertilización con K. Se realizó un experimento en fajas de fertilización durante dos años sobre cultivos de soja. En el año 2012, se establecieron tratamientos con dosis de K (0, 60 y 240 kg K₂O ha⁻¹) sin limitante de fósforo (P) y un tratamiento control sin fertilización. En 2013 se refertilizó con P y con la dosis de 60 kg K₂O ha⁻¹ en los tratamientos correspondientes. Se realizaron muestreos de suelo y cultivo y se determinaron las propiedades topográficas. Se incorporó la variabilidad espacial en los modelos de análisis para estudiar la respuesta en rendimiento en toda el área. Se identificaron zonas según K int. en 2012, donde se estudió la respuesta en rendimiento. El K int. a siembra promedio en los tratamientos sin K agregado fue 0,46 cmol kg⁻¹ en 2012, y 0,40 cmol kg⁻¹ en 2013. Las diferencias entre años en aporte de K desde el suelo se reflejaron en sintomatología temprana de deficiencias, peso temprano de plantas y niveles nutricionales en estado reproductivo. Existió respuesta en rendimiento a la fertilización solo en 2013, con mayores valores en el tratamiento con 240 kg K₂O ha⁻¹; la respuesta difirió entre zonas identificadas según K int. En 2013, el K int. a siembra interactuó con los tratamientos, mostrando relaciones significativas con el rendimiento solo en los tratamientos sin K. No se identificaron características adicionales al K int. que permitieran mejorar la interpretación del valor de análisis del K int. en el suelo y explicar la respuesta a fertilización con mayor exactitud.

Palabras clave: *Glycine max*, limitantes nutricionales, absorción de nutrientes, rendimiento.

POTASSIUM FERTILIZATION IN SOYBEAN: CROP RESPONSE TO EDAPHIC AND TOPOGRAPHIC CHARACTERISTICS

SUMMARY

The objectives of this research were to: (i) quantify the soybean crop response to potassium (K) fertilization in front of variations in the exchangeable (ex. K) next to the critical tentative value; (ii) study the association between soybean crop response to K fertilization and other soil and topographic properties; (iii) study the temporal variation of crop response to K fertilization; (iv) identify zones inside a field with different responses to K fertilization. A strip fertilization experiment was installed during two years in the same field under soybean crops. In 2012, treatments were established with different K rates (0, 60 and 240 kg K₂O ha⁻¹) without phosphorus (P) limitations and a control treatment without fertilization. In 2013, plots were re-fertilized with P and the 60 kg K₂O ha⁻¹ rate in the corresponding treatments. Soil and crop samplings were done and topographic attributes were determined. Spatial variation was added to the analysis models to study yield response in the entire area. Zones were identified within the field using ex K in 2012 in a cluster analysis. The ex. K in treatments without K fertilization was 0,46 cmol kg⁻¹ in 2012, and 0,40 cmol kg⁻¹ in 2013. Differences between years in soil K supply impacted in early K symptoms of deficiencies, early plants dry weight and K nutritional level at reproductive stage. There was a significant yield response to K fertilization only in 2013, when the higher yield was in the 240 kg K₂O ha⁻¹ treatment; and yield response was different between zones identified as ex K. In 2013, the ex. K interacted with the treatments, with significant relationship with yield in no K fertilization treatments and without relationship when K was added. No additional properties to ex. K were identified that would improve the interpretation of the soil K test and to better explain crop response to fertilization.

Keywords: *Glycine max*, nutritional constraints, nutrient absorption, yield.

1. INTRODUCCIÓN

El potasio (K) es uno de los tres macronutrientes esenciales para el crecimiento vegetal junto al nitrógeno y fósforo. Las plantas acumulan cantidades importantes del elemento, que puede variar entre 2 y 10% del peso seco (Havlin et al., 2005). Es el catión más abundante en las plantas, con roles importantes en procesos fisiológicos necesarios para crecimiento, rendimiento, calidad y resistencia a estrés en todos los cultivos (Zörb et al. 2014, Pettigrew 2008). Está vinculado a los procesos de ajuste osmótico y movimiento estomático, síntesis proteica, activación enzimática, fotosíntesis, translocación de carbohidratos y mantenimiento de balances catión-anión (Hafsi et al. 2014, Oosterhuis 2014). Sus deficiencias pueden provocar reducciones en el rendimiento y calidad de los cultivos. Además, por las funciones fisiológicas en que se involucra está relacionado a resistencia a estreses abióticos como sequía, salinidad, alta iluminación, frío, exceso de amonio, anegamiento, entre otros; también se lo asocia a resistencia a plagas y enfermedades (Zörb et al. 2014, Wang et al. 2013, Römheld y Kirkby 2010).

Si bien el K es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre (Wedepohl, 1995), las cantidades en el suelo varían ampliamente desde 0,04% a 3% (Sparks, 1987). Generalmente, el K en el suelo es clasificado en cuatro fracciones dependientes de su disponibilidad para las plantas: en solución, intercambiable (K int.), no intercambiable y en formas estructurales (Havlin et al. 2005, Sparks y Huang 1985). La mayor fracción, con 90 a 98% del K, es la constituyente de las estructuras cristalinas de minerales como micas y feldspatos potásicos, que no se encuentra disponible para los vegetales en el corto plazo (Sparks, 1987). Las demás fracciones se interconvierten dinámicamente entre sí por procesos de fijación y liberación (Yawson et al., 2011). Las plantas solo pueden tomar iones K^+ desde la solución del suelo, y este se encuentra en rápido equilibrio con el intercambiable, por lo que ambos se consideran rápidamente disponibles

para los cultivos (Askegaard et al., 2003). Pero estos grupos no superan el 2% del K total del suelo (Sparks, 1987). En consecuencia, la disponibilidad final será variable, y dependerá tanto de la cantidad total asociada al tipo de suelo como de la dinámica entre las fracciones.

Existen muchas propiedades físicas y químicas del suelo, interacciones suelo-planta y microorganismos del suelo que afectan los procesos de fijación y liberación de K (Zörb et al., 2014). La capacidad de intercambio catiónico de un suelo, dependiente del contenido de materia orgánica y arcilla del mismo, juega un rol importante en la cantidad de K posible de ser retenido como intercambiable (Römheld y Kirkby, 2010). Además influyen la textura, la mineralogía de la arcilla, el pH y ciclos de humedecimiento y secado que se vinculan a la fijación del K (Zörb et al. 2014, Sardi y Csitari 1998, Sparks 1987, Jungk y Claassen 1986). Existen evidencias de que la concentración de K en la solución en equilibrio se asocia en forma lineal al porcentaje de saturación en K de la CIC (Uribe y Cox, 1988). La cantidad de K intercambiable es además dependiente de las cantidades de otros iones presentes tanto en la solución como unidos a los coloides del suelo. Según Havlin et al. (2005), los cationes divalentes Ca^{+2} y Mg^{+2} , compiten con K a nivel de la absorción radicular. La absorción de K también se puede ver afectada por la presencia de otros iones como Na^{+} o NH_4^{+} que interactúan con su absorción y translocación a la parte aérea (Qi y Spalding 2004, Spalding et al. 1999, Botella et al. 1997). Hay una relación entre cationes considerada históricamente como asociada al suelo ideal, pero actualmente se indica que las mismas no tienen efecto en las propiedades de los suelos dentro de rangos de nutrientes encontrados comúnmente, y que prima la disponibilidad en niveles de suficiencia (Kopittke y Menzies, 2007). Según Barbagelata y Mallarino (2013) el drenaje de los suelos también tendría relación con la disponibilidad de K y la respuesta de los cultivos al elemento.

El K puede ser perdido por lixiviación de la solución del suelo hacia capas más profundas (Havlin et al., 2005) o por erosión y escorrentía superficial (Bertol et al., 2003).

Las especies vegetales y genotipos dentro de estas difieren en sus necesidades y capacidad de absorber K desde el medio externo, como resultado de aspectos morfológicos y fisiológicos (Zörb et al. 2014, Rengel y Damon 2008, Baligar 1985). Al respecto, White (2013) indica que los cereales a menudo logran el máximo crecimiento frente a suministros de K inferiores que leguminosas, y que manifiestan síntomas de deficiencia en hojas con menores niveles de K en tejidos.

En muchos sistemas agrícolas, el suministro de K desde el suelo es insuficiente para afrontar la demanda de plantas en crecimiento, por lo que su incorporación en las estrategias de manejo de la fertilización sería una forma efectiva de complementar y mantener el aporte promoviendo incrementos en la producción (Hafsi et al. 2014, Zörb et al. 2014, Römheld y Kirkby 2010). Existen diversos fertilizantes inorgánicos portadores de K, mientras que hay fuentes adicionales como residuos de cultivos, compost y bioresiduos industriales. Una vía natural de ingreso de K a los sistemas agrícolas es por deposición atmosférica y en las precipitaciones, pero las cantidades en general son muy reducidas (Bengtsson et al., 2003).

Si bien el índice de cosecha de K en grano es generalmente bajo para la mayoría de los cultivos agrícolas extensivos (García y Correndo, 2013), y las pérdidas de K hacia el medio son variables, el status potásico ha disminuido consistentemente en suelos de sistemas agrícolas de todo el planeta (Tan et al. 2012, Malo et al. 2005). Tal resultado es consecuencia de balances aparentes negativos promovidos por falta de entradas de K a los sistemas y reducciones en el ciclado del nutriente por la extracción de residuos de cultivos (Brennan y Bell 2013, Römheld y Kirkby 2010). Existen reportes de que menos del 50% del K extraído en grano y residuos de cultivos es repuesto mediante fertilizantes y enmiendas (Smil, 1999). Como

consecuencia, las deficiencias de K en cultivos se han vuelto un problema en muchas regiones del mundo y sistemas de producción, especialmente en países en desarrollo donde la disponibilidad de fertilizantes es menor (Rengel y Damon 2008, Dobermann et al. 1998). En extensas áreas bajo agricultura se han reportado deficiencias en diversos sistemas de producción de China (Tan et al. 2012, Yang et al. 2004) e India (Hassan, 2002) y en pasturas y cultivos en varias regiones de Australia (Bell et al. 2009, Bedrossian y Singh 2004, Bolland et al. 2002).

Para determinar la disponibilidad de K para los cultivos y la respuesta al nutriente en diferentes suelos, se han evaluado diversos métodos analíticos sin la aparición de uno universal (Askegaard et al., 2004). Los métodos más usados estiman el K int., incluyendo la pequeña proporción del K en solución, mediante la extracción con reactivos químicos (Römheld y Kirkby, 2010). Las muestras de suelo para los análisis de rutina normalmente son tomadas en la capa superficial y secadas al aire o en estufas. El uso de acetato de amonio como extractante es la base de la mayor parte de las recomendaciones de fertilización a nivel mundial (Barbagelata y Mallarino, 2013). Se indica que la evaluación del K int. sería útil para el manejo del K en una situación donde las variaciones producidas por los cultivos y prácticas de manejo sean reducidas (Askegaard y Eriksen, 2002). En sistemas con bajo uso de insumos es conveniente el manejo de K basado en niveles críticos de K int. para poder hacer uso de las reservas del suelo, evitar agregados en exceso y minimizar las pérdidas de rendimiento por su deficiencia. Trabajos realizados en varias regiones han mostrado diferencias en los niveles críticos de K int. según cultivos, tipos de suelos, sistema de producción e historia de fertilización. Pero también existe información sobre la importancia del K no intercambiable y su disponibilidad para los cultivos (Nuñez, 2015), por lo que en situaciones donde el aporte de K desde este pool sea considerable disminuiría la validez del K int. como predictor de respuestas (Römheld y Kirkby, 2010). Los mismos autores, plantean cuestionamientos adicionales al K int. como indicador de disponibilidad. Uno

de ellos es que no considera limitantes espaciales a la disponibilidad como resultado de las características radiculares. Además indican que tampoco considera los diversos factores físicos y químicos del suelo que influyen sobre la distribución y actividad de las raíces, así como las condiciones climáticas.

A su vez es conocido que el secado de las muestras de suelo a analizar con métodos de extracción para estimar K int., afecta la cantidad de K extraído. Haby et al., citados por Barbagelata y Mallarino (2013) indican que el efecto depende de la desviación desde la concentración de K en equilibrio al momento del muestreo y de la mineralogía de la arcilla. Un método alternativo propuesto es el de extracción con acetato de amonio en muestras de suelo húmedas que, según investigaciones recientes, tiene mejor correlación con las respuestas vegetales a la fertilización con K que el análisis en muestras secas (Barbagelata y Mallarino, 2013).

En Uruguay, los suelos tradicionalmente afectados a la agricultura tienen altos valores de K int. en su estado original (Hernández et al. 1988, Altamirano et al. 1976), por lo que la aplicación de fertilizante potásico históricamente ha sido una práctica poco frecuente. En la Guía de Fertilización de Cultivos (Oudri et al., 1976) se reporta escasa respuesta a K en ensayos de fertilización y se proponen rangos de referencia, en que más de 0,30 meq/100g de suelo se consideraba alto; además se recomendaba la fertilización solo en cultivos exigentes como remolacha azucarera y papa en suelos arenosos o con larga historia de agricultura. A partir del año 2000, en los sistemas agrícolas se ha intensificado el uso del suelo con un aumento de los cultivos por año y una reducción en la proporción de pasturas permanentes y pastoreo directo; la predominancia de los cereales de invierno ha sido desplazada por el cultivo de soja, caracterizado por una mayor extracción de K; el manejo mayoritario del suelo pasó a ser con siembra directa. A su vez los cultivos se han expandido hacia nuevas zonas de producción con suelos de menor aptitud, muchas veces de textura más

liviana y con menores contenidos de K en su estado natural, según la Carta de Suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976).

En los últimos años se han incrementado las situaciones con manifestación de síntomas de deficiencia de K en los cultivos, detectado cultivos con concentraciones de K en planta inferiores a las críticas reportadas, registrado frecuentes situaciones con respuesta en rendimiento a la fertilización con K y cuantificado valores de K int. relativamente bajos a los originales. Resultados de un relevamiento de chacras agrícolas en suelos representativos del litoral del país (Morón y Quincke, 2010), indicaron una disminución del contenido de K int. de 40% y 44% para las profundidades de 0-7,5 cm y 7,5-15 cm, respectivamente, al compararlo con sitios de referencia prístinos. A su vez, Cano et al. (2007) y Bautés et al. (2009) presentaron resultados de diversos experimentos en que se encontró respuesta significativa a la fertilización con cloruro de K (KCl) tanto en cultivos de invierno como de verano. En un relevamiento del nivel nutricional de *Lotus corniculatus* a nivel nacional, Barbazán et al. (2007), encontraron que 14% de las situaciones estudiadas presentaron niveles de K en planta inferiores a la concentración de referencia (1,4 %). Por otro lado, Bordoli et al. (2012), en un relevamiento de cultivos de soja distribuidos en diversos tipos de suelos, determinaron que 39% de las situaciones presentaron niveles nutricionales inferiores al crítico considerado para K en hoja (1,76%).

Los centros de investigación local respondieron a esta situación intensificando la obtención de información referida al manejo del nutriente y su dinámica en los suelos. Se generaron pautas primarias para el manejo del nutriente comunes a todos los cultivos extensivos en secano (Barbazán et al., 2011). Estos autores analizaron información de diversos experimentos de respuesta a fertilización con K en varios cultivos, y propusieron un nivel crítico tentativo de $0,34 \text{ cmol kg}^{-1}$ de K int., para lograr un rendimiento relativo del 90% y a partir del cual sería reducida la probabilidad de respuesta a la fertilización. Pero a su vez existe una amplia variación en las

respuestas observadas en torno a ese valor crítico, posiblemente resultado de la forma en que se generó la información a partir de experimentos en los que varió el tipo de cultivo, el tipo de suelo y material generador, la fecha de siembra, la localidad, y las variedades, entre otros. En tanto García-Lamothe y Quincke (2012), proponen para cereales de invierno que el nivel de respuesta marginal al agregado del nutriente se encuentra entre 0,36 y 0,45 cmol kg^{-1} de K int. Barbazán et al. (2013) realizaron nuevos experimentos de respuesta a K durante los años 2010 y 2012, principalmente en soja, siendo incorporados al análisis realizado por Barbazán et al. (2011). Considerando todos los datos reportados, el nivel crítico estimado sería algo superior al de Barbazán et al. (2011), en tanto al tomar solo los experimentos recientes el mismo es menor. Los autores indican que tal comportamiento sugiere la necesidad de incorporar en el análisis de respuesta a K características de suelo vinculadas a la absorción del nutriente, además de estudios por cultivo. También han sido registradas situaciones de respuesta a la fertilización con K en valores de K int. en suelo relativamente altos. Coitiño et al. (2013) trabajando en trigo encontraron respuesta a la fertilización con K y fósforo en una situación no previsible en base a los valores de análisis de suelo, atribuyéndola a limitantes al crecimiento radicular. En tanto García-Lamothe et al. (2009) reportaron respuesta en rendimiento al agregado de KCl en trigo y cebada con valores de K int. superiores a 0,70 cmol kg^{-1} , siendo atribuida a similares causas que el trabajo anterior.

Es frecuente la presencia de variación espacial en atributos del suelo y el terreno dentro de chacras, que resulta en variabilidad del rendimiento de los cultivos a través de las mismas (Terra et al. 2006, Cox et al. 2003, Kravchenko y Bullock 2000). Entre las propiedades edáficas relacionadas a variaciones en los rendimientos se mencionan contenido de materia orgánica, K, fósforo, magnesio, textura, conductividad eléctrica y pH (Terra et al. 2010, Terra et al. 2006, Kaspar et al. 2004, Kravchenko et al. 2003). Atributos del terreno que influyen sobre la dinámica superficial del agua de escurrimiento, como elevación, pendiente, curvatura, área específica de

cuenca, aspecto e índices derivados de estos, también han sido indicados como fuente de variación espacial de rendimientos (Parent et al. 2008, Kaspar et al. 2004, Green et al. 2007). El reconocimiento de esta variación dio origen al concepto de agricultura de precisión, donde se propone variar las medidas de manejo agronómico según características de suelos y cultivos en cada sitio de una chacra (Lark y Wheeler, 2003). Según Plant (2001) la puesta en práctica de este concepto ha sido posible por el acceso a tecnologías como sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica, diversos tipos de sensores, tecnologías de aplicación variable y análisis de datos georreferenciados.

En el manejo de nutrientes sería de valor contar con información en cuanto a la variación que es posible encontrar en nutrientes disponibles a nivel de chacra y las propiedades espaciales de esa variación, así como la variación en la respuesta vegetal dentro de chacras. Para K, trabajos extranjeros mencionan patrones de variabilidad distintos entre chacras (Barbagelata 2006, Lauzon et al. 2005,) y entre sistemas de producción (Cambardella y Karlen, 1999). A nivel local existen estudios en los cuales se trató la variación espacial de K dentro de chacra, pero en ninguno se pudo modelar (Bonilla et al. 2015, Terra et al. 2010, Pravia 2009).

Plant (2001) destaca que uno de los impactos de la agricultura de precisión podría ser en las características de la investigación agrícola. Según tal autor, el uso de este tipo de herramientas tecnológicas permite a los investigadores la realización de experimentos a escala de chacra recabando abundante información de forma práctica, rápida y con gran resolución espacial. Piepho et al. (2011) indican que los experimentos a escala de chacra realizados en campos comerciales, son prácticos y válidos, pudiendo igualar en precisión y validez estadística a los experimentos en estaciones experimentales cuando son diseñados adecuadamente. Los autores anteriormente mencionados realizan una pormenorizada revisión de los aspectos estadísticos de los experimentos a escala de chacra. En estos

experimentos, las unidades experimentales usualmente son grandes parcelas y se toman muchas medidas dentro de cada una. Las cosechadoras modernas equipadas con monitores de rendimiento y GPS, permiten el registro de múltiples datos de rendimiento georreferenciados dentro de cada unidad experimental. Según Plant (2007) en estas condiciones podría ser necesario algún tipo de análisis geoestadístico. Las dimensiones de las parcelas y la superficie a abarcar además son influidas por el uso de maquinaria comercial. En la mayoría de los casos es probable que dentro del área abarcada por un experimento exista variabilidad en diversas características del suelo (Bishop y Lark, 2006). La existencia de tal heterogeneidad dentro y entre parcelas experimentales ha llevado al planteo de diversas estrategias para su consideración en los modelos de análisis (Thöle et al. 2013, Piepho et al. 2011). Una de las ventajas de los experimentos a escala de chacra es que la variación espacial de la respuesta a los tratamientos frente a la heterogeneidad de las condiciones del campo puede ser estudiada (Panten et al. 2010, Bishop y Lark 2006).

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general de esta investigación fue evaluar la respuesta a la fertilización con K del cultivo de soja (*Glycine max*), incorporando la variabilidad espacial de atributos del suelo y del terreno.

Los objetivos específicos fueron:

- i) Cuantificar la respuesta de soja a la fertilización con K frente a variaciones en el Kint. en torno al valor crítico tentativo.
- ii) Estudiar la asociación de la respuesta en rendimiento a la fertilización con otras características edáficas y topográficas.
- iii) Estudiar la variación temporal de la respuesta a la fertilización con K.

iv) Identificar zonas dentro de una chacra con diferente respuesta a la fertilización con K.

La estrategia planteada consistió en la realización de un experimento a escala de chacra durante dos años consecutivos en la misma área. Se utilizó la variabilidad natural del campo como forma de contar con variación en características del suelo y el terreno, manteniendo homogéneos los aspectos vinculados al manejo y clima dentro de la misma zafra. Las metodologías consideradas incorporaron la variabilidad espacial en los modelos de análisis. Los tratamientos consistieron en distintas dosis de fertilizante K, entre las que se incluyó una elevada dosis inicial sin refertilización durante el segundo año y una dosis menor con refertilización anual. De esa forma se pretendió lograr una alta disponibilidad de K que asegurara suficiencia y un aporte intermedio, manteniendo el estudio de las respuestas en los mismos sitios de muestreo durante dos zafras.

Los objetivos fueron desarrollados en dos artículos científicos redactados según las normas de la revista *Agrociencia Uruguay*, que han sido enviados para su revisión.

2. FERTILIZACIÓN CON POTASIO EN SOJA: RESPUESTA DEL CULTIVO A CARACTERÍSTICAS EDÁFICAS Y TOPOGRÁFICAS

Coitiño-López Javier^{1*} – Barbazán Mónica² - Ernst Oswaldo¹

¹Departamento de Producción Vegetal, Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3 km 363, Paysandú 60000, Uruguay. Correo electrónico: javicoilo@hotmail.com

²Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Garzón 780, Montevideo 12900, Uruguay

2.1. RESUMEN

Los objetivos del estudio fueron cuantificar la respuesta del cultivo de soja a la fertilización con potasio (K) frente a variaciones de K en el suelo y estudiar la asociación de dicha respuesta con otras propiedades edáficas y topográficas. Se realizó un experimento de fertilización en franjas durante dos años en soja. En 2012, se establecieron tratamientos con dosis de K (0, 60 y 240 kg K₂O ha⁻¹) sin limitante de fósforo (P) y un tratamiento control sin fertilización, en dos bloques completos. En 2013 se refertilizó con P y con la dosis de 60 kg K₂O ha⁻¹ en los tratamientos correspondientes. Se realizaron muestreos en una grilla regular de 30 X 22 m. Se determinaron nutrientes a siembra, materia orgánica, textura, resistencia a la penetración, conductividad eléctrica, atributos del terreno, concentración de K en hoja (R2-R3) y rendimiento en grano. El K intercambiable (K int.) a siembra promedio en los tratamientos sin K agregado fue 0,46 cmol kg⁻¹ en 2012, y 0,40 cmol kg⁻¹ en 2013. Existió respuesta en rendimiento a la fertilización solo en 2013, donde el mayor rendimiento fue del tratamiento con 240 kg K₂O ha⁻¹. En 2013, el K int. a siembra interactuó con los tratamientos, siendo que se relacionó significativamente con el rendimiento solo en los tratamientos sin fertilización con K. No se identificaron características adicionales al K int. que permitieran mejorar la interpretación del valor de

análisis del K int. en el suelo y explicar la respuesta a fertilización con mayor exactitud.

Palabras clave: *Glycine max*, Uruguay, limitantes nutricionales, absorción de nutrientes, rendimiento.

2.2. SUMMARY

Our objectives were to quantify the soybean crop response to potassium (K) fertilization under variations of soil K supply and to study its association with other soil and topographic properties. A strip fertilization experiment was evaluated during two years in the same field under soybean crops. In 2012 treatments were established with K rates (0, 60 y 240 kg K₂O ha⁻¹) without phosphorus (P) limitations and a control treatment without fertilization. In 2013, plots were refertilized with P and the 60 kg K₂O ha⁻¹ rates in the corresponding treatments. A 30 X 22 m regular sampling grid was delineated. Determinations included nutrients in soil, organic matter, texture, resistance to penetration, electrical conductivity, terrain attributes, K concentration in leaf (R2-R3) and grain yield. Exchangeable K ex. K in treatments without K fertilization was 0.46 cmol kg⁻¹ in 2012, and 0.40 cmol kg⁻¹ in 2013. There were significant yield responses to K fertilization only in 2013, when the highest yield was in the 240 kg K₂O ha⁻¹ treatment. In 2013, ex. K interacted with treatments, with significant relationship in no K fertilization treatments and without relationship when K was added. No other additional properties were identified to complement the interpretation of the soil K test and to better understand crop response to fertilization.

Key words: *Glycine max*, Uruguay, nutritional constraints, nutrients absorption, yield.

2.3. INTRODUCCIÓN

El potasio (K) es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo vegetal y absorbido en mayor cantidad luego del nitrógeno (Havlin *et al.*, 2005). Interviene en funciones fisiológicas relacionadas a la salud de la planta y tolerancia a estreses bióticos y abióticos (Oosterhuis *et al.*, 2014). Actúa en el ajuste de las relaciones hídricas y movimiento estomático, síntesis proteica, activación enzimática, fotosíntesis y translocación de carbohidratos (Ashley *et al.*, 2006). Son diversas las propiedades físicas y químicas del suelo, así como interacciones suelo-planta y microorganismos edáficos que afectan la fijación y liberación del K del suelo y por tanto su absorción por los vegetales (Zörb *et al.*, 2014).

En los sistemas agrícolas frecuentemente es necesaria la aplicación de fertilizantes potásicos para complementar los aportes del suelo y mantener un adecuado suministro del nutriente para los cultivos (Zörb *et al.*, 2014). Una de las alternativas utilizadas para decidir necesidades de fertilización es la definición de niveles críticos del nutriente en el suelo a partir del cual se reducen las probabilidades de obtener mejoras en rendimiento por su agregado. La estimación del K intercambiable (K int.) mediante extracción con sales, principalmente acetato de amonio (NH_4OAc), a partir de muestras de suelo secas es uno de los métodos más difundidos a nivel mundial (Barbagelata y Mallarino, 2013). En Uruguay para prever respuestas a la fertilización se considera un nivel crítico tentativo de $0,34 \text{ cmol kg}^{-1}$ de suelo en la capa de 0 a 15 cm, resultante de la investigación local (Barbazán *et al.*, 2011), pero existe incertidumbre en las respuestas observadas en torno a este nivel. Dicha información ha sido generada con datos obtenidos de experimentos realizados en diversos cultivos, años y localidades. En el cinturón maicero de Estados Unidos también se ha encontrado que los análisis de suelo presentan incertidumbre para predecir respuestas a la fertilización con K (Mallarino *et al.*, 2002), a pesar de las mejoras logradas por considerar cualitativamente la cantidad de K del subsuelo. Dichas

deficiencias del análisis de suelo serían por el uso de muestras secas, con respuestas más erráticas de los cultivos a la fertilización potásica (Barbagelata y Mallarino, 2013), debido a la elevada variación temporal del mismo (Mallarino *et al.*, 2011; Khan *et al.*, 2014), producto del reciclaje de K por lixiviado desde residuos de cultivos (Oltmans y Mallarino, 2015) y absorción por los cultivos de K fijado y sus interacciones con el intercambiable (Mallarino *et al.*, 2011; Khan *et al.*, 2014).

El principal mecanismo de arribo de K a las raíces es a través de difusión por la solución del suelo (Baligar, 1985). Por tal motivo, y por su asociación con el crecimiento radicular el contenido de agua del suelo se relaciona con la absorción de K (Sardi y Fulop, 1994; Seiffert *et al.*, 1995). Otra de las propiedades que afecta la disponibilidad de K para las plantas es la densidad del suelo. Incrementos en la compactación aumentan el contenido volumétrico de agua y por tanto facilitan la difusión de los iones K^+ , pero además reducen el crecimiento radicular, con efectos contrapuestos (Seiffert *et al.*, 1995). En general, la absorción de K tiende a reducirse en condiciones de mayor compactación (Lipiec y Stepniewsky, 1995), aunque dichos efectos tendrían lugar cuando la respiración de la raíz se vea reducida en forma significativa por efectos de disminuciones en la aireación (Wolkowski, 1990). Experimentos realizados en suelos con horizontes argilúvicos desarrollados, demuestran que el aporte de K desde capas superficiales es el más importante en determinar las respuestas vegetales al agregado de K (Wong *et al.*, 2000; Kitchen *et al.*, 2000), siendo esa zona donde se concentra el crecimiento radicular. Además, existen propiedades químicas adicionales al K disponible que se vinculan a la capacidad de absorción del nutriente por los cultivos. Entre ellas se mencionan la capacidad de intercambio catiónico, la mineralogía de la arcilla, pH, los ciclos de humedecimiento y secado y la presencia de otros iones (Sparks, 1987; Sardi y Csitari, 1998; Zörb *et al.*, 2014).

La topografía es una de las variables indicadas como causante de variaciones en propiedades del suelo mediante sus efectos en la dinámica superficial del agua (Moore *et al.*, 1993; Mulla y McBratney, 2002). Algunas de las propiedades del suelo que se han encontrado asociadas a atributos topográficos son textura, materia orgánica, profundidad de horizontes, K en el suelo y capacidad de intercambio catiónico (Moore *et al.*, 1993; Winzeler *et al.*, 2008). Varias de las características edáficas mencionadas se asocian a la absorción de K por los cultivos.

En general, los experimentos en que se ha estudiado la dinámica del K en los suelos y los aspectos vinculados a su absorción por vegetales han sido realizados en laboratorios u otras situaciones con alto nivel de control (Baligar, 1985; Jungk y Claassen, 1986; Uribe y Cox, 1988; Sardi y Fulop, 1994; Seiffert *et al.*, 1995; Sardi y Csitari, 1998). Pero hasta donde sabemos es escasa la información sobre la importancia con que pueden operar estos factores como condicionantes de la respuesta a nivel de campo.

Nos planteamos como hipótesis de trabajo que incorporando otros atributos físicos y químicos del suelo vinculados a la absorción de K y atributos topográficos, se podría mejorar la predictibilidad de las respuestas vegetales según valores de análisis de suelos de Kint. en muestras secas.

Los objetivos del trabajo fueron: (i) cuantificar la respuesta de soja (*Glycine max*) a la fertilización con K frente a variaciones en el Kint. en torno al valor crítico tentativo; y (ii) estudiar la asociación de la respuesta a la fertilización con otras características edáficas y topográficas.

Para lograr este objetivo se trabajó durante dos años consecutivos sobre el cultivo de soja en una superficie de 4,2 ha dentro de una chacra comercial, incorporando la variabilidad natural dentro del campo y la generada por aplicación de fertilizante potásico.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Sitio experimental

La investigación se realizó en una chacra comercial (2011-2013) ubicada en el paraje El Tala (S -33,28° O -57,41°), Departamento de Soriano, Uruguay, manejada en agricultura continua en siembra directa desde hace 15 años. El área del sitio en estudio fue de 4,2 ha y abarcó todas las posiciones topográficas presentes en el campo, incluyendo una loma, ladera alta y ladera media. La región donde se localizó el sitio tiene un paisaje dominado por colinas suaves y los suelos predominantes son Brunosoles Éutricos Típicos (Argiudoles Típicos) transicionales entre las unidades Risso y Cuchilla de Corralito, según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay (Altamirano *et al.*, 1976). En cultivos anteriores al trabajo se realizó fertilización uniforme con P y K, siendo la última aplicación de fertilizante potásico dos años antes con una dosis de 48 kg ha⁻¹ de K₂O.

Adicionalmente el sitio presentó valores de K int. en el rango de interés, con variabilidad tanto en topografía como en los valores de nutrientes y textura (Cuadro 1, Figura 1 A y B).

2.4.2. Prácticas culturales y tratamientos

El trabajo se realizó en dos cultivos de soja sucesivos. El primer año fue sembrado (Cultivar Nidera 5009) luego de la cosecha de un cultivo de trigo, y al año siguiente como cultivo de estación completa (Cultivar SPS 590), luego de un cultivo de cobertura de avena negra (*Avena fatua*). Los cultivos se instalaron durante las zafas agrícolas 2011-2012 (Año 2012) y 2012-2013 (Año 2013), respectivamente. Las fechas de siembra para ambos años fueron 21 de diciembre y 13 de noviembre, con un espacio entre líneas de 19 cm, y un objetivo de 50 y 45 plantas m⁻², para los años 2012 y 2013, respectivamente. Se establecieron cuatro tratamientos de fertilización distribuidos al azar en dos bloques completos (Cuadro 2 y Figura 1 C). Las

unidades experimentales fueron fajas contiguas de 240 m de largo y 22 m de ancho. Los tratamientos aplicados durante 2012 consistieron en tres dosis de K (0, 60 y 240 kg K₂O ha⁻¹) sin limitante de P y un tratamiento control (0 kg K₂O ha⁻¹ y 0 kg P ha⁻¹). En 2013 se repitieron las fertilizaciones con P en los tratamientos correspondientes y con K solo en el tratamiento con 60 kg K₂O ha⁻¹. De esta forma fue posible establecer comparaciones para evaluar el efecto del agregado de P, y estudiar la respuesta a la fertilización con K en condiciones de aporte de P no limitante. Los fertilizantes fueron aplicados en cobertura al momento de la siembra. La fuente de K utilizada fue cloruro de potasio (KCl) en tanto que el P se aplicó como superfosfato triple (0-46-0). Otras prácticas de manejo como control de malezas, enfermedades e insectos se realizaron siguiendo guías generadas por la investigación nacional. Para todas las operaciones durante el cultivo se utilizó maquinaria comercial.

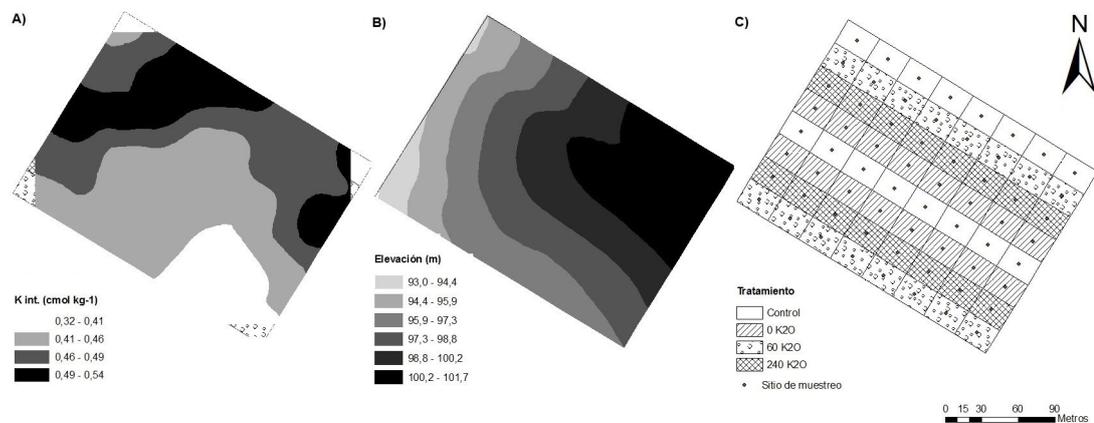


Figura 1. (A) Mapa de potasio intercambiable en suelo de 0-15 cm (Kint.) a siembra 2012; (B) Mapa topográfico (C) Diseño experimental y ubicación de sitios de muestreo.

Cuadro 1. Estadística descriptiva de las fracciones de arena, limo y arcilla, potasio (Kint.), sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg) intercambiables, fósforo (P) y materia orgánica (MO) de 0-15 cm para todos los sitios de muestreo a siembra 2012.

Variable	Media	DE	CV	Rango	P(15)	P(85)
Arcilla (%)	30,09	2,93	9,73	15,4	27,42	32,52
Limo (%)	37,82	3,8	10,04	22,3	34,72	40,98
Arena (%)	32,08	2,43	7,57	8,7	29,19	34,95
K 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	0,45	0,05	11,36	0,22	0,41	0,51
Na 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	0,37	0,06	15,26	0,37	0,32	0,40
Ca 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	22,72	2,39	10,53	11,99	21,20	24,52
Mg 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	2,65	0,30	11,48	1,29	2,31	3,00
P Bray 0-15 cm (mg kg ⁻¹)	13,7	2,12	15,49	9,9	11,5	16,1
MO 0-15 cm (%)	3,94	0,29	7,41	2,01	3,75	4,15

P(15): percentil 15%; P(85): percentil 85%.

Cuadro 2. Descripción de tratamientos de fertilización con potasio (K) y fósforo (P) a la siembra de soja en año 2012 y 2013.

Tratamiento	2012		2013	
	K	P	K	P
	(kg K₂O ha⁻¹)	(kg P₂O₅ ha⁻¹)	(kg K₂O ha⁻¹)	(kg P₂O₅ ha⁻¹)
Control	0	0	0	0
0 K ₂ O	0	46	0	46
60 K ₂ O	60	46	60	46
240 K ₂ O	240	46	0	46

2.4.3. Determinaciones

En cada faja se delinearón celdas de 30 m x 22 m, resultando ocho celdas por faja. Al centro de cada celda, en un área circular de 4 a 5 m de radio se definieron sitios de muestreo dentro de los cuales se realizaron las mediciones manuales (Figura 1 C). En total hubo 64 sitios de muestreo.

Luego de la cosecha de trigo y previo a la siembra de soja del año 2012, se tomaron con calador muestras de suelo de la capa superficial (0-15 cm) compuestas por 12 tomas, que, a su vez, se dividieron en dos profundidades (0-7,5 cm y 7,5-15 cm). Las muestras se conservaron en bolsas plásticas en refrigerador hasta ser secadas en estufa de aire forzado a 40°C durante 48 h y posteriormente molidas hasta pasar a través de una malla de 2 mm. Se extrajeron las bases intercambiables con acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$) 1M con una relación suelo solución 1:10, a partir de la cual se analizó K y sodio (Na) por espectrofotometría de emisión, y calcio (Ca) y Mg intercambiables por lectura en espectrofotómetro de absorción atómica modelo 373 (Perkin Elmer Inc., Waltham, MA, EUA). A su vez se analizó P disponible mediante Bray 1 (Bray y Kurtz, 1945) y materia orgánica por el método de oxidación con dicromato (Walkley y Black, 1934). Previo a la siembra correspondiente al año 2013, se tomaron muestras de suelos en los mismos sitios, siendo solamente analizado el K int. Los valores de las variables evaluadas a ambas profundidades se promediaron, asumiendo densidad aparente constante, para obtener datos correspondientes a la profundidad 0-15 cm. Adicionalmente se analizó la distribución de tamaños de partículas por el método del hidrómetro, con oxidación previa de materia orgánica (Gee y Or, 2002).

En diciembre de 2012 durante la implantación de un cultivo de soja se midió la resistencia a la penetración del suelo, a través del método Índice de cono con penetrómetro electrónico Rimik CP 20. Se registraron valores a intervalos verticales de 2 cm hasta una profundidad de 40 cm. En cada sitio de muestreo se realizaron dos inserciones, promediando los datos de ambas. Posteriormente se calcularon valores promedio para intervalos de 4 cm. En el mismo momento se realizaron mediciones de conductividad eléctrica (CE) directa, insertando un sensor en el suelo a dos profundidades, de 0 a 7 y de 0 a 40 cm, con un equipo portátil Spectrum EC110. Dichas mediciones se realizaron en dos lugares dentro de cada sitio de muestreo, para luego promediarlos. Tanto la medición de resistencia a la penetración

como la de CE directa con el equipo portátil fueron ejecutadas en condiciones de humedad del suelo próximas a capacidad de campo.

Se registraron datos de conductividad eléctrica aparente (CEa) con un equipo Veris 3100 (Veris Technologies Inc., Salina, KS, EUA) asociado a un GPS con corrección diferencial, que permitió georreferenciar las mediciones. La operación se realizó durante el invierno de 2013, momento en que un cultivo de avena sembrado como cobertura se encontraba en macollaje y las condiciones de humedad fueron próximas a capacidad de campo. El relevamiento del área se realizó remolcando el dispositivo con un vehículo en transectas espaciadas aproximadamente 11 m entre sí. La CEa del suelo, en miliSiemens por metro (mS m^{-1}) se registró en intervalos de 1 s, brindando puntos espaciados entre 2,5 y 3,5 m. El Veris 3100 permite realizar dos mediciones de CEa en forma simultánea, una superficial (CEa-s) en que el 90% de la respuesta es obtenido de los primeros 30 cm del suelo, y una lectura profunda (CEa-p) en que el 90% de la respuesta corresponde a una profundidad de suelo de 100 cm (Sudduth *et al.*, 2005). Simultáneamente a la ubicación de las mediciones de CEa, el GPS registró datos de elevación del terreno, a partir de los cuales se construyó un modelo digital de elevación y calcularon atributos topográficos. Los atributos primarios del terreno calculados fueron pendiente, aspecto, curvatura del perfil y curvatura del plano y área específica de cuenca (Wilson y Gallant, 2000), en tanto los atributos secundarios fueron Índice topográfico de humedad (TWI), Índice de poder de escorrentía (SPI) e Índice de capacidad de transporte de sedimentos (LS) (Moore *et al.*, 1993). Se calcularon valores de atributos del terreno y CEa promedio para cada sitio de muestreo a partir de los datos comprendidos en un radio de 5 m desde el punto central.

Durante el ciclo del cultivo, en el estadio de R2 según escala de Fehr *et al.* (1971) en 2012 y en R3 durante 2013 se tomaron muestras de tejido para analizar la concentración de K. Por cada sitio de muestreo se tomaron al azar 20 hojas completas, seleccionando la más joven y completamente

expandida de cada planta. Las muestras fueron secadas a 60°C durante 48 h y posteriormente se molieron a un tamaño inferior a 2 mm. Se determinó la concentración total de K por emisión de 0,50 g de una muestra calcinada durante 5 h a 550°C (Isaac y Kerber, 1971).

El rendimiento en grano de soja se determinó y georreferenció en ambos años usando una cosechadora equipada con monitor de rendimiento y GPS. Los 12 m centrales de cada faja fueron cosechados y se registraron rendimientos cada 2 o 3 m en la dirección de avance de la máquina. Los datos fueron depurados eliminando los puntos superpuestos, los situados en los 5 m iniciales y finales de cada faja, los inferiores y superiores en tres desvíos estándar al promedio de rendimiento de cada año y a los inferiores y superiores en tres desvíos estándar al promedio de distancia entre puntos. El rendimiento correspondiente a cada sitio de muestreo se determinó promediando los registros del monitor en un radio de 5 m desde el punto central, que correspondió a entre 3 y 7 datos.

Durante todo el período del experimento se registraron las precipitaciones en forma diaria mediante la lectura de un pluviómetro ubicado a 2000 m del experimento.

2.4.4. Metodología de análisis de datos

A partir de los datos de suelo provenientes del muestreo discreto, de CEa y elevación se realizaron interpolaciones mediante el procedimiento geoestadístico Kriging ordinario, siguiendo los pasos indicados por Webster y Oliver (2007). De las variables edáficas relevadas en el muestreo discreto solo se pudieron construir mapas consistentes para K int. a siembra en el año 2012. En tanto sí se lograron mapas de CEa-s y CEa-p y un modelo digital de elevación para toda el área en estudio. Luego los valores interpolados se rasterizaron a una grilla de 2 x 2 m. A partir del modelo digital de elevación se calcularon atributos del terreno empleando los

algoritmos correspondientes en ArcMap 10.0 (Environmental System Research Institute, Redlands, CA, EUA).

El efecto de los tratamientos se estudió en forma independiente para cada año. Se utilizó la estrategia de selección de modelos dentro del marco de modelos mixtos, propuesta por Thöle *et al.* (2013) para experimentos a escala de campo. Los análisis se realizaron en el programa estadístico R, usando las funciones *lm {stats}* para la etapa inicial de construcción del modelo y *gls {nlme}* para las siguientes. La variable de respuesta incorporada en el análisis fue el rendimiento de soja registrado con monitor de rendimiento. Se probaron como covariables todos aquellos atributos que fueron interpolados, considerándose el valor estimado más cercano a cada punto del monitor de rendimiento. Las covariables testeadas fueron elevación, las coordenadas bidimensionales (x e y), todos los atributos primarios y secundarios del terreno, CEa-s, CEa-p y K int. en suelo a siembra 2012 de 0-15 cm. La selección de la estructura de covarianza de los residuos se realizó mediante el ajuste de modelos geoestadísticos, donde se probaron estructuras isotrópicas de las formas lineal, esférica, gaussiana, exponencial y cuadrática racional. Adicionalmente se consideró la posible existencia de covarianzas diferentes entre bloques y fajas, agrupando según estos factores en la estimación de los modelos geoestadísticos. La selección final del modelo se realizó utilizando el criterio de Akaike corregido y la prueba de razón de verosimilitud. Se realizaron pruebas de comparación de medias de tratamientos con Test Tukey (p -valor $<0,05$) para cada año.

Se analizó la variación entre tratamientos en los niveles de K int. en suelo a siembra entre los dos años para cada profundidad. Se utilizó un modelo estadístico de bloques completos al azar con submuestreo, en que la submuestra considerada fue el sitio de muestreo. Fueron probadas todas las variables edáficas como covariables, resultando no significativas. Se realizaron ANAVAS y pruebas de comparación de medias con Test Tukey

(p-valor <0,05) para cada profundidad. A su vez se calcularon intervalos de confianza para la variación de K int. dentro de cada tratamiento.

La existencia de interacciones entre las variables edáficas y topográficas y la respuesta en rendimiento del cultivo a la fertilización se estudió mediante modelos de regresión sencillos. Dicho estudio se realizó solamente para el año 2013, en que se detectó respuesta en rendimiento significativa a los tratamientos. Inicialmente se construyeron modelos del tipo: Rendimiento = Bloque + Error. Los residuos del modelo que consideró el efecto de Bloque (residuos de bloque), se incorporaron como variables de respuesta en otro modelo que incluyó los tratamientos como efectos fijos y variables regresoras, incluidas de a una, anidadas dentro de tratamientos. Las variables regresoras consideradas fueron todos los atributos físicos y químicos del suelo y los atributos del terreno calculados. Se testearon regresiones lineales y cuadráticas, resultando significativas solo las primeras y para algunas de las variables. Los modelos anteriores se analizaron mediante ANAVA. Modelos con similar estructura se utilizaron para estudiar las relaciones entre concentración de K en hoja y K int., y entre rendimiento y concentración de K en hoja.

2.5. RESULTADOS

2.5.1. Precipitaciones

En el año 2012 las precipitaciones ocurridas entre la madurez del trigo y siembra de soja fueron 68 mm en varios eventos, en tanto durante el ciclo del cultivo fueron 485 mm, siendo 102 mm los precipitados durante el período crítico. Para el año 2013 las precipitaciones entre la senescencia del cultivo de cobertura y la siembra de soja fueron 339 mm; las sucedidas durante el ciclo del cultivo fueron 696 mm y las ocurridas en el período crítico fueron 151 mm.

2.5.2. Respuesta en rendimiento de soja

El rendimiento del cultivo de soja varió entre 2786 y 2930 kg ha⁻¹ en el año 2012, y entre 3097 y 3708 kg ha⁻¹ en 2013 (Cuadro 3). Durante el año 2012 el rendimiento no mostró diferencias significativas entre tratamientos (Cuadros 3 y 4). El modelo escogido siguiendo la estrategia propuesta por Thöle *et al.* (2013) incluyó la elevación y la coordenada en Y como covariables, con estimación de covarianza de errores agrupada por bloques mediante un modelo geoestadístico de la forma exponencial. El efecto de las covariables se reflejó en que los sitios ubicados en posiciones topográficas más altas y con mayores valores en la coordenada Y registraron rendimientos superiores.

Cuadro 3: Comparación de medias de rendimiento de soja según tratamiento para los años 2012 y 2013 según Test Tukey (p-valor <0,05)

Tratamiento	Rendimiento 2012 (kg ha⁻¹)	Rendimiento 2013 (kg ha⁻¹)
Control	2930 a	3097 a
0 K ₂ O	2786 a	3147 a
60 K ₂ O	2922 a	3378 b
240 K ₂ O	2816 a	3708 c

*Letras distintas en la fila indican diferencias significativas.

Cuadro 4. Análisis de varianza de rendimiento de soja para año 2012 siguiendo metodología propuesta por Thöle *et al.* (2013).

Efecto	P-Valor
Elevación	0,07
Coordenada en Y	0,07
Bloque	0,37
Tratamiento	0,82

A diferencia del año 2012, en el 2013 se detectaron diferencias significativas entre tratamientos en rendimiento de soja (Cuadros 3 y 5). El

modelo más adecuado incorporó en su estructura fija la elevación, la coordenada en Y, el K int. 0-15 cm a siembra 2012 y la interacción coordenada en Y * K int. 0-15 cm a siembra 2012, siendo utilizado para la estructura de covarianza de los residuos un modelo geoestadístico de tipo cuadrático racional sin realizar agrupamientos. El comportamiento de rendimiento respecto a la elevación y coordenada en Y fue similar al año 2012. No existió respuesta significativa a la fertilización con fósforo. Los tratamientos en que se fertilizó con K (60 K₂O y 240 K₂O) lograron rendimientos superiores a los que no lo aportaron (Control y 0 K₂O) (Cuadro 3). Adicionalmente el tratamiento 240 K₂O se diferenció del 60 K₂O con un rendimiento 10% superior.

Cuadro 5. Análisis de varianza de rendimiento de soja para año 2013 siguiendo metodología propuesta por Thöle *et al.* (2013). K int. 0-15 cm 2012: potasio intercambiable de 0-15 cm a siembra 2012.

Efecto	P-Valor
Elevación	<0,0001
Coordenada en Y	0,0021
K int. 0-15 2012	0,1511
Coordenada en Y * K int. 0-15 cm 2012	0,1861
Bloque	<0,0001
Tratamiento	<0,0001

2.5.3. Variación de K en el suelo

El valor promedio de K int. 0-15 cm en los tratamientos sin fertilización con K, fue de 0,46 cmol kg⁻¹ en 2012 y 0,40 cmol kg⁻¹ en 2013. A su vez para

todos los sitios de muestreo y tratamientos, en 2013 los valores de K int. 0-15 cm variaron entre 0,31 a 0,61 cmol kg⁻¹.

La variación en los niveles de K int. en suelo a la siembra de los cultivos de soja correspondientes a los años 2012 y 2013 fue diferente entre tratamientos y entre profundidades (Cuadro 6). En la profundidad de 0-15 cm, los tratamientos Control y 0 K₂O registraron los mayores descensos en K int.; el tratamiento 240 K₂O fue el único en que se cuantificó un incremento en el K int., ubicándose el tratamiento 60 K₂O en una posición intermedia con una leve reducción. Las diferencias en la evolución de K int. 0-15 cm fueron resultado de lo sucedido en la capa de 0-7,5 cm, dado que en la capa más profunda todos los tratamientos registraron disminuciones.

Cuadro 6. Variación en el potasio intercambiable en suelo (cmol kg⁻¹) a la siembra de soja entre los años 2012 y 2013 según tratamiento, Test Tukey (p-valor <0,05).

Profundidad	Control	0 K ₂ O	60 K ₂ O	240 K ₂ O	p-valor
0-7,5 cm	- 0,08 c	- 0,09 c	-0,01 b	0,11 a	<0,0001
7,5-15 cm	- 0,04 a	- 0,04 a	- 0,04 a	- 0,02 a	0,0134
0-15 cm	- 0,06 c	- 0,07 c	- 0,02 b	0,05 a	<0,0001

*Letras distintas en la fila indican diferencias significativas.

2.5.4. Relación entre respuesta del cultivo de soja y atributos del suelo

En el estudio de interacciones entre atributos edáficos y topográficos y la respuesta en rendimiento del cultivo de soja para el año 2013 solamente se detectaron regresiones significativas de la forma lineal y para algunas de las variables estudiadas. Los residuos de rendimiento en 2013 registraron una interacción significativa entre tratamientos y el valor de K int. a la siembra de ese año medido de 0 a 7,5 cm (P valor = 0,0006) y de 0 a 15 cm

(P valor = 0,005) (Figura 2). Se estudiaron las relaciones con K int. 0-15 cm por ser la profundidad de muestreo estándar. Las regresiones fueron significativas para los tratamientos Control y 0 K₂O, en los cuales no se fertilizó con K, con residuos de rendimiento que tendieron a tomar valores negativos. En cambio no existieron relaciones significativas entre residuos de rendimiento y K int. 0-15 cm en los tratamientos con fertilización con K en ausencia de limitantes de P (60 K₂O y 240 K₂O), y los valores de residuos de rendimiento correspondientes a los mismos en general, fueron positivos. El comportamiento fue similar tanto al considerar la capa de 0 a 7,5 cm como la capa de 0 a 15 cm (datos no presentados).

Adicionalmente, el magnesio (Mg) intercambiable en el suelo a siembra de 2012 medido de 0 a 7,5 cm y de 0 a 15 cm, y la relación Mg intercambiable / K int. de 0 a 15 cm presentaron interacciones significativas con tratamientos, al evaluar los residuos de rendimiento (Datos no presentados). Sin embargo no fue posible interpretar estos resultados por si solos, ya que se correlacionaron significativamente con K int. 0 a 15 cm, mediante coeficientes de correlación de Pearson de -0,28, -0,40 y -0,86, respectivamente.

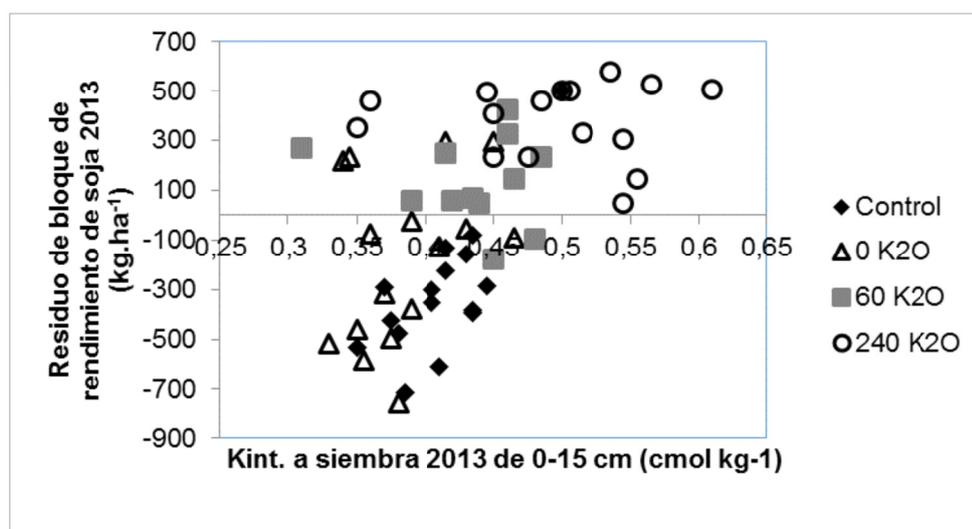


Figura 2. Residuos de bloque de rendimiento de soja del año 2013 según potasio intercambiable (K int.) en suelo a la siembra del mismo año en la

capa de 0-15 cm y tratamientos (Rombos: Control; Triángulos: 0 K₂O; Cuadrados: 60 K₂O; Círculos: 240 K₂O). Regresiones: Tratamiento Control: $y = 5711 x - 2655$; Tratamiento 0 K₂O: $y = 2949 x - 1311$.

En la Figura 3 A se presenta la relación entre los residuos de bloque de la concentración de K en hoja de soja en estadio R3 en 2013 y el K int. a siembra 2013 de 0-15 cm. Para dicha variable de respuesta se encontró una interacción significativa (P valor = 0,002) entre tratamientos y K int. a siembra 2013 de 0-15 cm. Las regresiones siguieron el mismo comportamiento que los residuos de rendimiento y K int. 0-15 cm a siembra 2013 (Figura 2).

Las relaciones entre residuos de rendimiento de soja para el año 2013 y el nivel nutricional medido como concentración de K en hoja en R3 también fueron diferentes entre tratamientos (Figura 3 B) (P valor de interacción = 0,0002). Las regresiones siguieron similar comportamiento que los residuos de rendimiento y K int. 0 a 15 cm a siembra 2013 (Figura 2).

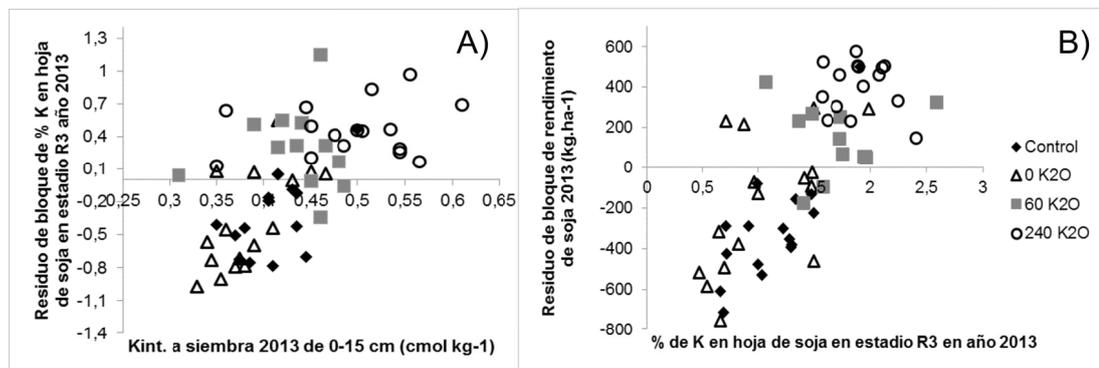


Figura 3. A) Residuos de bloque de % de potasio (K) en hoja de soja en estadio R3 en año 2013 según potasio intercambiable (K int.) en suelo a la siembra del mismo año en la capa de 0-15 cm y tratamientos (Rombos: Control; Triángulos: 0 K₂O; Cuadrados: 60 K₂O; Círculos: 240 K₂O). Regresiones: Tratamiento Control: $y = 5,75 x - 2,67$; Tratamiento 0 K₂O: $y = 7,38 x - 3,22$. **B)** Residuos de bloque de rendimiento de soja del año 2013

según % de potasio (K) en hoja de soja en estadio R3 del mismo año y tratamientos (Rombos: Control; Cuadrados: 0 K₂O; Triángulos: 60 K₂O; Cruces: 240 K₂O). Regresiones: Tratamiento Control: $y = 594,83 x - 972,57$; Tratamiento 0 K₂O: $y = 430,85 x - 627,21$.

2.6. DISCUSIÓN

Si bien no es posible descartar el efecto del régimen hídrico diferencial entre años como posible limitante para la expresión de respuesta a K en el año 2012, ni el comportamiento errático de las respuestas en estos valores de K_{int.} en muestras secas reportada en otras investigaciones (Barbagelata y Mallarino, 2013), la disminución en los valores de K_{int.} se presenta como una de las variables cuantificadas que explica la diferencia de la respuesta entre años.

La disminución en el K_{int.} registrada entre la siembra de ambos cultivos en los tratamientos sin fertilización con K (Cuadro 6), fue atenuada en el tratamiento 60 K₂O, mientras que en el 240 K₂O se cambió el comportamiento, demostrando la existencia de efectos residuales de la fertilización a nivel de K_{int.} dependientes de la dosis recibida. La aplicación del fertilizante en cobertura sin incorporar determinó que las mayores diferencias entre tratamientos ocurrieran en la capa superficial de suelo, de 0 a 7,5 cm. En un trabajo donde se analizó la variación de K_{int.} de 0 a 15 cm de suelo a los 45-50 días luego de aplicar 240 kg de K₂O en superficie, en varios tipos de suelos en Uruguay, se encontraron incrementos que fluctuaron entre 0,04 y 0,31 cmol kg⁻¹ (Barbazán *et al.*, 2013). El incremento de 0,05 cmol kg⁻¹ registrado en nuestro estudio en el tratamiento 240 K₂O es considerado muy reducido, lo cual denota características de un suelo con importante capacidad de fijación.

Las relaciones lineales significativas entre los residuos de rendimiento y el K_{int.} en suelo (Figura 2) sólo para los tratamientos sin fertilización con K

(Control y 0 K₂O) confirmaron que este nutriente fue limitante y que tal restricción se eliminó al agregarlo. La respuesta en rendimiento se dio hasta valores de K int. en suelo 0 a 15 cm (Figura 2) próximos a 0,45 cmol kg⁻¹, superiores al crítico manejado por Barbazán *et al.* (2011) situado en 0,34 cmol kg⁻¹. Estos valores de K int. se encuentran en el límite entre los rangos “Óptimo” y “Alto” identificados por Mallarino *et al.* (2002) para suelos de Iowa (Estados Unidos), en que se reportan frecuentes incrementos en rendimiento por fertilizar con K con valores máximos cercanos al 20%.

De todas las variables edáficas y topográficas relevadas, las únicas que presentaron una interacción consistente con la respuesta a la fertilización fueron el K int. en suelo en las profundidades 0 a 7,5 cm y 0 a 15 cm. Por lo tanto, para esta situación no se detectaron otras variables que permitieran mejorar la interpretación de las respuestas a la fertilización con K más allá de la propia disponibilidad del nutriente en el suelo. En cuanto a las interacciones detectadas entre Mg intercambiable y la relación Mg intercambiable / K int. con los tratamientos aplicados, consideramos que no aportan información adicional para interpretar respuestas a la fertilización con K, a causa de las correlaciones con K int. En la literatura se indica que, en general, la concentración de K en solución condiciona la absorción y/o concentración de Mg en la parte aérea de los vegetales (Spear *et al.*, 1978; Ohno y Grunes, 1985), pero no habrían efectos del Mg en suelo sobre la absorción de K (Ohno y Grunes, 1985) o serían muy reducidos (Ding *et al.*, 2006). Además, para las relaciones Mg/K intercambiables en el suelo la información indica que estas no serían importantes en sí mismas, sino que prima la disponibilidad de estos nutrientes por encima de niveles de suficiencia (McLean *et al.*, 1983; Kopittke y Menzies, 2007).

En nuestro experimento, el tratamiento 240 K₂O presentó incrementos en el K int. y el residuo de rendimiento logrado en todos los sitios de muestreo del mismo fue superior al promedio en 2013, aún en los menores valores de K int. Esta respuesta diferencial sugiere la posibilidad de

considerar la evolución de los valores de K int. entre años, en particular en valores de K int. en torno al crítico. En nuestras condiciones además puede estar influyendo que la profundidad de muestreo considerada diluye el efecto de la aplicación de elevadas dosis de fertilizante en cobertura, que generaría una capa superficial enriquecida suficiente para el crecimiento vegetal. Esto podría explicar parte de las observaciones que presentan un comportamiento diferente a la tendencia general en la Figura 2, situados en valores relativamente bajos de K int. y con residuos de rendimiento positivos. Aunque hay que considerar también que la medición de K int. en dichos sitios puede haber sido afectada por el secado de las muestras. McLean y Watson, citados por Barbagelata y Mallarino (2013), indican que en situaciones de agregado de K reciente, el secado de muestras podría promover la fijación del K, resultando valores de K int. medido inferiores a la disponibilidad real. Los sitios asociados al tratamiento 60 K₂O, recibieron posteriormente al análisis de suelo la dosis de fertilizante correspondiente, lo que explica el residuo superior en los menores niveles de K int. En cambio los sitios del tratamiento 0 K₂O que pertenecen al mencionado grupo no pudieron ser interpretados en función de las variables cuantificadas, ya que según sus características serían esperados menores residuos.

El efecto positivo de la fertilización con K sobre el rendimiento en ausencia de limitantes de P lo explica la mejora en el nivel nutricional de K evaluado en R3. Los tratamientos en que se fertilizó con K permitieron lograr una concentración de K en hoja superior e independiente de la disponibilidad en suelo (Figura 3 A). Además, mayores valores de concentración de K en hoja tuvieron una relación directa con el rendimiento obtenido (Figura 3 B), hasta un nivel próximo a 1,7 % de K, similar al crítico de 1,76% indicado por Reuter *et al.* (1997) para el estadio R1-R2 y al rango calculado por Clover y Mallarino (2013).

La asociación positiva de elevación y la coordenada Y con rendimiento fue válida para ambos años y todos los tratamientos. Consideramos que esta

relación es particular del sitio estudiado, pudiendo estar asociada a características edáficas no relevadas como profundidad de horizontes y tipo de suelo. Además es posible que no haya tenido relación con la dinámica superficial del agua, dado que se dio de similar forma para años con regímenes hídricos contrastantes.

2.7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al International Plant Nutrition Institute y Canpotex por haber financiado parcialmente la actividad a través del proyecto “Fertilización K y P: estudios de largo plazo”; a Miguel Carballal y Martín Luzardo por aportar el sitio experimental y colaborar en las tareas logísticas; a ISUSA por aportar los fertilizantes; al Profesor Jorge Franco por la colaboración en el análisis estadístico y a la Asociación Uruguaya de Siembra Directa por el apoyo institucional.

La investigación que da origen a los resultados presentados en la presente publicación recibió fondos de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación bajo el código POS_2011_1_3545.

2.8. BIBLIOGRAFÍA

- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R.** 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Tomo III: Descripción de las unidades de suelos. Montevideo: MAP. 273 p.
- Ashley M, Grant M, Grabov A.** 2006. Plant responses to potassium deficiencies: a role for potassium transport proteins. *Journal of Experimental Botany*, 57(2): 425 -436.
- Baligar VC.** 1985. Potassium uptake by plants, as characterized by root density, species and K/Rb ratio. *Plant and Soil*, 85(1): 43 - 53.

- Barbagelata PA, Mallarino AP.** 2013. Field Correlation of Potassium Soil Test Methods Based on Dried and Field-Moist Soil Samples for Corn and Soybean. *Soil Science Society of America Journal*, 77(1): 318 - 327.
- Barbazán MM, Bordoli JM, Coitiño J, del Pino A, Hoffman E, Mazzilli S.** 2013. Avances en estudios de potasio en Uruguay. En: Simposio Fertilidad (2013, Rosario, Santa Fe, Argentina). *Nutrición de los cultivos para la intensificación productiva sustentable*. Acassuso: IPNI. pp 151 - 155.
- Barbazán M, Bautes C, Beux L, Bordoli M, Cano JD, 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 Uruguay*, 15(2): 93 - 99.
- Bray RH, Kurtz LT.** 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, 59: 39 - 45.
- Clover MW, Mallarino AP.** 2013. Corn and soybean tissue potassium content responses to potassium fertilization and relationships with grain yield. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2): 630-642.
- Ding Y, Luo W, Xu G.** 2006. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Annals of Applied Biology*, 149(2): 111 - 123.
- Fehr WR, Caviness CE, Burmood DT, Pennington JS.** 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine Max (L.) Merrill*. *Crop Science*, 11(6): 929 - 931.
- Gee G, Or D.** 2002. Particle-Size Analysis. En: Dane JH, Topp GC. [Eds.]. *Methods of soil analysis: Part 4: Physical methods*. Madison: Soil Science Society of America. pp. 812 - 815.

- Havlin JL, Beaton JD, Tisdale SL, Nelson WL.** 2005. Soil Fertility and Fertilizers, an Introduction to Nutrient Management. 7a ed. New Jersey: Pearson Education. 515 p.
- Isaac RA, Kerber JD.** 1971 Atomic absorption and flame photometry: techniques and uses in soil, plant and water analysis. En: Instrumental methods for analysis of soil and plant tissues. Madison: Soil Science Society of America. pp. 17 - 37.
- Jungk A, Claassen N.** 1986. Availability of phosphate and potassium as the result of interactions between root and soil in the rhizosphere. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 149 (4): 411 – 427
- Khan SA, Mulvaney RL, Ellsworth TR.** 2014. The potassium paradox: Implications for soil fertility, crop production and human health. Renewable Agriculture and Food Systems, 29(1): 3 - 27.
- Kitchen N, Sudduth K, Fridgen J, Robert PC, Rust RH, Larson WE.** 2000. Influence of claypan soil topsoil thickness and fertility factors on corn and soybean yield. En: Proceedings of the 5 International Conference on Precision Agriculture; 16 - 19 Julio, 2000; Bloomington, Minnesota, Estados Unidos; pp 1 - 16, American Society of Agronomy.
- Kopittke PM, Menzies NW.** 2007. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. Soil Science Society of America Journal, 71(2): 259 - 265.
- Lipiec J, Stępniewski W.** 1995. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. Soil and Tillage Research, 35(1–2): 37 - 52.
- Mallarino AP, Clover MW, Oltmans RR.** 2011. Identification of reasons for high temporal soil-test potassium variation. En: North Central Extension Industry Soil Fertility Conference (41°, 2011, Des Moines, Iowa). Proceedings. Brookings, South Dakota: International Plant Nutrition Institute. pp 65 – 73.

- Mallarino AP, Wittry DJ, Barbagelata PA.** 2002. Iowa soil-test calibration research update: Potassium and the Mehlich-3 ICP phosphorus test. En: North Central Extension Industry Soil Fertility Conference (2002, Des Moines, Iowa). Proceedings. Des Moines, Iowa: Iowa University. pp 29 – 39.
- McLean EO, Hartwig RC, Eckert DJ, Triplett GB.** 1983. Basic cation saturation ratios as a basis for fertilizing and liming agronomic crops. II. Field Studies. *Agronomy Journal*, 75(4): 635 - 639.
- Moore ID, Gessler PE, Nielsen GA, Peterson GA.** 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science*, 57: 443 - 452.
- Mulla DJ, McBratney AB.** 2002. Soil Spatial Variability. En: Warrick AW. [Ed.]. *Soil physics companion*. Boca Raton : CRS Press. pp. 343 - 373.
- Ohno T, Grunes DL.** 1985. Potassium-magnesium interactions affecting nutrient uptake by wheat forage." *Soil Science Society of America Journal*, 49(3): 685 - 690.
- Oltmans RR, Mallarino AP.** 2015. Potassium uptake by corn and soybean, recycling to soil, and impact on soil test potassium. *Soil Science Society of America Journal*, 79(1): 314 – 327.
- Oosterhuis DM, Loka DA, Kawakami EM, Pettigrew WT.** 2014. The physiology of potassium in crop production. *Advances in Agronomy*, 126: 203 - 233.
- Reuter DJ, Robinson JB, Dutkiewicz C.** 1997. *Plant analysis an interpretation manual*. Melbourne, Australia: CSIRO. 572p
- Sardi K, Fulop P.** 1994. Relationship between soil potassium level and potassium uptake of corn affected by soil moisture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 25(9-10): 1735 - 1746.

- Sardi K, Csitari G.** 1998. Potassium fixation of different soil types and nutrient levels. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29(11-14): 1843 - 1850.
- Seiffert S, Kaselowsky J, Jungk A, Claassen N.** 1995. Observed and calculated potassium uptake by maize as affected by soil water content and bulk density. *Agronomy Journal*, 87(6): 1070-1077.
- Sparks D.** 1987. Potassium dynamics in soils. En: Stewart BA [Ed.]. *Advances in Soil Science*. New York, Springer. 6: 1 - 63.
- Spear SN, Edwards DG, Asher CJ.** 1978. Response of cassava, sunflower, and maize to potassium concentration in solution III. Interactions between potassium, calcium, and magnesium. *Field Crops Research*, 1(0): 375 - 389.
- Sudduth KA, Kitchen NR, Wiebold WJ, Batchelor WD, Bollero GA, Bullock DG, Clay DE, Palm HL, Pierce FJ, Schuler RT, Thelen KD.** 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1-3): 263 - 283.
- Thöle H, Richter C, Ehlert D.** 2013. Strategy of statistical model selection for precision farming on-farm experiments. *Precision Agriculture*, 14: 434 - 449.
- Uribe E, Cox F.** 1988. Soil properties affecting the availability of potassium in highly weathered soils. *Soil Science Society of America Journal*, 52: 148 - 152.
- Walkley A, Black IA.** 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29 – 38.
- Webster R, Oliver MA.** 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*, segunda ed. Chichester: Wiley. 332p.

- Wilson JP, Gallant JC.** 2000. Digital Terrain Analysis. En: Wilson JP, Gallant JC. [Eds.]. Terrain Analysis: Principles and Applications. Chichester: Wiley. pp. 1 - 27.
- Winzeler HE, Owens PR, Joern BC, Camberato JJ, Lee BD, Anderson DE, Smith DR.** 2008. Potassium fertility and terrain attributes in a fragiudalf drainage catena. Soil Science Society of America Journal, 72(5): 1311 - 1320.
- Wolkowski RP.** 1990. Relationship between wheel-traffic-induced soil compaction, nutrient availability, and crop growth: A Review. Journal of Production Agriculture, 3(4): 460 - 469.
- Wong MTF, Edwards NK, Barrow NJ.** 2000. Accessibility of subsoil potassium to wheat grown on duplex soils in the south-west of Western Australia. Soil Research, 38(3): 745 - 751.
- Zörb C, Senbayram M, Peiter E.** 2014. Potassium in agriculture – Status and perspectives. Journal of Plant Physiology, 171(9): 656 - 669.

3. VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN POTÁSICA

Coitiño-López Javier¹ –Barbazán Mónica² - Ernst Oswaldo^{1*}

¹Departamento de Producción Vegetal, Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3 km 363, Paysandú 60000, Uruguay. Correo electrónico: javicoilo@hotmail.com

²Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Garzón 780, Montevideo 12900, Uruguay

3.1. RESUMEN

El objetivo del estudio fue cuantificar cambios temporales en el aporte de potasio (K) desde el suelo y la respuesta de soja. Se realizó un experimento de fertilización en fajas durante dos años en soja. En 2012, se establecieron tratamientos con dosis de K (0, 60 y 240 kg K₂O ha⁻¹) sin limitante de fósforo (P) y un tratamiento control sin fertilización, en dos bloques completos. En 2013 se refertilizó con P y con la dosis de 60 kg K₂O ha⁻¹ en los tratamientos correspondientes. Se realizaron muestreos de suelo y cultivo en una grilla regular de 30 X 22 m en ambos años. Se determinó K intercambiable (K int.) a siembra, peso de plantas y sintomatología temprana de deficiencias de K, nivel nutricional de K en R2-R3, rendimiento en grano y componentes del rendimiento. Se identificaron zonas dentro del área según K int. a siembra en 2012 donde se estudió la respuesta en rendimiento. El K int. disminuyó 0,06 cmol kg⁻¹ en 2013 en los tratamientos sin K agregado, mientras que aumentó en el que incluyó 240 kg ha⁻¹ de K₂O. El cultivo respondió al cambio en aporte de K, en sintomatología de deficiencia de K, peso temprano de plantas y nivel nutricional en favor de tratamientos con agregado de K. En 2012 no existió respuesta en rendimiento en grano a los tratamientos. En 2013 existió una respuesta en rendimiento a los tratamientos diferencial entre zonas atribuida a la reducción de K int.

Palabras clave: *Glycine max*, potasio, Uruguay.

3.2. SUMMARY

Our objectives were to quantify temporal changes in the soil K supply and its association with the soybean crop response to K fertilization. A strip fertilization experiment was evaluated during two years in the same field under soybean crops. In 2012, treatments were established with K rates (0, 60 y 240 kg K₂O ha⁻¹) without phosphorus (P) limitation and a control treatment without fertilization. In 2013, plots were re-fertilized with P and the 60 kg K₂O ha⁻¹ rates in the corresponding treatments. In both years soil and crop sampling were done in a regular 30 X 22 m grid. Determinations included exchangeable K (ex. K), plant weight and early symptoms of K deficiencies, foliar K concentration R2-R3 and grain yield and yield components. Yield fertilization response was evaluated within zones identified by ex K in 2012. Ex K decreased 0.06 cmol kg⁻¹ in 2013 in no K fertilization treatments, and increased in the 240 kg K₂O ha⁻¹ treatment. The crops responded to variations in soil K supply between years with changes in K symptomatology deficiency, early plant weight and K nutritional level. In 2012, there was no significant grain yield response to fertilization. In 2013, there was a grain yield response to the treatments differential between zones attributed to the reduction in ex. K.

Key words: *Glycine max*, potassium, Uruguay.

3.3. INTRODUCCIÓN

Después de 10 años de agricultura continua sin laboreo en Uruguay, en los suelos tradicionalmente afectados al rubro agrícola que tienen altos valores de potasio intercambiable (K int.) en su estado original (Hernández et al. 1988, Altamirano et al. 1976), se han cuantificado disminuciones relativamente importantes respecto a situaciones prístinas (Morón y Quincke, 2010). A su vez se han incrementado las situaciones con manifestación de

síntomas de deficiencia de K en cultivos agrícolas, detectando frecuentemente cultivos con concentraciones de K en planta inferiores a las críticas reportadas y registrando diversas situaciones con respuesta en rendimiento a la fertilización con K (Barbazán *et al.*, 2007; Cano *et al.*, 2007; Baudes *et al.*, 2009; Bordoli *et al.*, 2012). En respuesta a la situación se sugirió un nivel crítico de K int. calculado a partir de muestras de suelo secas por debajo del cual es probable la respuesta en rendimiento a la fertilización con K (Barbazán *et al.*, 2011; Barbazán *et al.*, 2013).

El análisis de plantas es considerado como una herramienta complementaria a los análisis de suelo para evaluar el aporte de K hacia las plantas (Öborn *et al.*, 2005). La concentración de K en planta presenta un amplio rango de variación entre lugares, años, especies y prácticas de manejo, siendo reportadas concentraciones entre 0,4 y 4,3% (Askegaard *et al.*, 2004). Muchos cultivos, incluidos trigo, maíz, arroz y canola, presentan patrones de acumulación de K en que el máximo contenido se da en antesis, siendo posteriormente redistribuido desde las hojas senescentes hacia los granos (White, 2013). En tanto soja, sorgo y girasol, continúan absorbiendo K durante la maduración de los granos (White, 2013). La concentración de K en la materia seca de las plantas varía con el crecimiento, por lo que para ser usada como indicador de suficiencia se deberían establecer rangos de concentraciones óptimas según estado de desarrollo y especie (Johnson y Goulding citados por Zörb *et al.*, 2014). Reuter *et al.* (1997) presentan una revisión de trabajos en que se establecieron valores de referencia de K y otros nutrientes en diversos cultivos, órganos de tejido vegetal y estados de desarrollo.

Los típicos síntomas visuales de deficiencia de K son clorosis y necrosis en las puntas y bordes de láminas, que normalmente se inician en las hojas más maduras (Marschner, 1995; Fageria *et al.*, 2001). No obstante, la definición de limitantes por K al rendimiento no se podría basar en síntomas de deficiencia visuales, ya que la relación entre estos y la respuesta de cultivos a la fertilización es débil (Askegaard y Eriksen, 2002).

En las condiciones productivas de Uruguay, el rendimiento de grano de los cultivos anuales de secano presenta elevada variabilidad interanual, superando a la generada por características del suelo y el terreno y prácticas de manejo (Pravia 2009, Terra *et al.* 2010). Resulta de interés el conocer la relación entre la variabilidad temporal del rendimiento de cultivos agrícolas y la fertilización con K. En este contexto, el análisis de niveles nutricionales sería un elemento diagnóstico útil en la interpretación de respuestas en forma adicional a los análisis de suelo.

El objetivo del trabajo fue cuantificar cambios temporales en el aporte de K desde el suelo y la respuesta de soja (*Glycine max*), incluyendo síntomas tempranos de deficiencia, estado nutricional y componentes del rendimiento.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Sitio experimental

La investigación se realizó en una chacra comercial (2011-2013) ubicada en el paraje El Tala (S -33,28° O -57,41°), Departamento de Soriano, Uruguay, manejada en agricultura continua en siembra directa desde hace 15 años. El área del sitio en estudio fue de 4,2 ha y abarcó todas las posiciones topográficas presentes en el campo, incluyendo una loma, ladera alta y ladera media. La región donde se localizó el sitio tiene un paisaje dominado por colinas suaves y los suelos predominantes son Brunosoles Éutricos Típicos (Argiudoles Típicos) transicionales entre las unidades Risso y Cuchilla de Corralito según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay (Altamirano *et al.*, 1976). En cultivos anteriores al trabajo se realizó fertilización uniforme con fósforo (P) y K, siendo la última aplicación de fertilizante potásico dos años antes con una dosis de 48 kg ha⁻¹ de K₂O. En el Cuadro 1 se presenta información sobre características químicas y textura del suelo del experimento.

Cuadro 1. Estadística descriptiva de las fracciones de arena, limo y arcilla, potasio (Kint.), sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg) intercambiables, fósforo (P) y materia orgánica (MO) de 0-15 cm para todos los sitios de muestreo a siembra 2012.

Variable	Media	DE	CV	Rango	P(15)	P(85)
Arcilla (%)	30,09	2,93	9,73	15,4	27,42	32,52
Limo (%)	37,82	3,8	10,04	22,3	34,72	40,98
Arena (%)	32,08	2,43	7,57	8,7	29,19	34,95
K 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	0,45	0,05	11,36	0,22	0,41	0,51
Na 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	0,37	0,06	15,26	0,37	0,32	0,40
Ca 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	22,72	2,39	10,53	11,99	21,20	24,52
Mg 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	2,65	0,30	11,48	1,29	2,31	3,00
P Bray 0-15 cm (mg kg ⁻¹)	13,7	2,12	15,49	9,9	11,5	16,1
MO 0-15 cm (%)	3,94	0,29	7,41	2,01	3,75	4,15

P(15): percentil 15%; P(85): percentil 85%.

3.4.2 Prácticas culturales y tratamientos

El trabajo se realizó en dos cultivos de soja sucesivos. El primer año fue sembrado (Cultivar Nidera 5009) luego de la cosecha de un cultivo de trigo, y al año siguiente como cultivo de estación completa (Cultivar SPS 590), luego de un cultivo de cobertura de avena negra (*Avena fatua*). Los cultivos se instalaron durante las zafas agrícolas 2011-2012 (Año 2012) y 2012-2013 (Año 2013), respectivamente. Las fechas de siembra para ambos años fueron 21 de diciembre y 13 de noviembre, con un espacio entre líneas de 19 cm, y un objetivo de 50 y 45 plantas/m², para los años 2012 y 2013, respectivamente. Se establecieron cuatro tratamientos de fertilización distribuidos al azar en dos bloques completos (Cuadro 2 y Figura 1 A). Las unidades experimentales fueron fajas contiguas de 240 m de largo y 22 m de ancho. Los tratamientos aplicados durante 2012 consistieron en tres dosis de K sin limitante de P (0, 60 y 240 kg K₂O ha⁻¹) y un tratamiento control (0 kg K₂O ha⁻¹ y 0 kg P ha⁻¹). En 2013 se repitieron las fertilizaciones con P en los tratamientos correspondientes y con K solo en el tratamiento con 60 kg

$\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$. De esta forma fue posible establecer comparaciones para evaluar el efecto del agregado de P, y estudiar la respuesta a la fertilización con K en condiciones de aporte de P no limitante. Los fertilizantes fueron aplicados en cobertura al momento de la siembra. La fuente de K utilizada fue cloruro de potasio (KCl) en tanto el P se aplicó como superfosfato triple (0-46-0). Otras prácticas de manejo como control de malezas, enfermedades e insectos se realizaron siguiendo guías generadas por la investigación nacional. Para todas las operaciones durante el cultivo se utilizó maquinaria comercial.

Cuadro 2. Descripción de tratamientos de fertilización con potasio (K) y fósforo (P) a la siembra de soja en año 2012 y 2013.

Tratamiento	2012		2013	
	K (kg $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$)	P (kg $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	K (kg $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$)	P (kg $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)
Control	0	0	0	0
0 K_2O	0	46	0	46
60 K_2O	60	46	60	46
240 K_2O	240	46	0	46

3.4.3. Determinaciones

En cada faja se delinearón celdas de 30 m x 22 m, resultando ocho celdas por faja. Al centro de cada celda, en un área circular de 4 a 5 m de radio se definieron sitios de muestreo dentro de los cuales se realizaron las mediciones manuales (Figura 1 A). Luego de la cosecha de trigo y previo a la siembra de soja del año 2012, se tomaron muestras de suelo de la capa superficial (0–15 cm) compuestas por 12 tomas con calador. Las muestras se conservaron en bolsas plásticas en refrigerador hasta ser secadas en estufa de aire forzado a 40°C durante 48 h y posteriormente molidas hasta pasar a través de una malla de 2 mm. Se realizó extracción de bases

intercambiables con acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$) 1M con una relación suelo solución 1:10, a partir de la cual se analizó K int. por espectrofotometría de emisión. Además se analizó fósforo disponible mediante Bray 1 (Bray y Kurtz, 1945). El muestreo y análisis de K int. se repitió previo a la siembra del año 2013. En la Figura 1 B se presenta el mapa interpolado de K int. a siembra del año 2012, en tanto en la Figura 1 C se presenta el mapa interpolado de K int. a siembra del año 2013 elaborado a partir del muestreo realizado en sitios de tratamientos sin fertilización con K (Control y O K_2O).

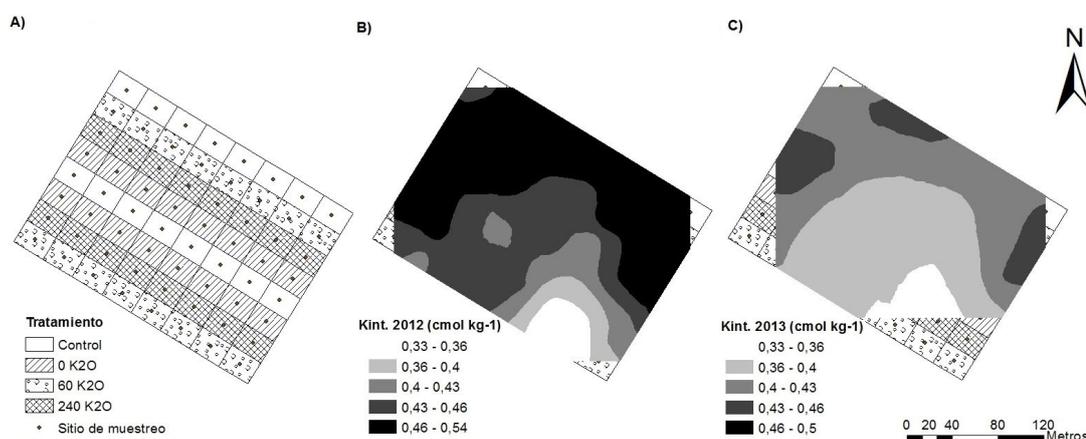


Figura 1. Diseño experimental (A), mapa de potasio intercambiable (K int.) a siembra en año 2012 (B) y mapa de potasio intercambiable (K int.) a siembra en año 2013 interpolado a partir de sitios sin fertilización con potasio (C).

Durante el ciclo del cultivo, en el estadio de 4 nudos según escala de Fehr *et al.* (1971) en 2012, y en 5 nudos durante 2013, se contaron las plantas en 5 m lineales de dos surcos contiguos. Además se cortaron al azar 30 plantas de cada sitio en las que se determinó el porcentaje de plantas con síntomas visuales de deficiencia de K, según lo descrito por Marschner (1995). Las plantas fueron secadas en estufa de aire forzado a 60°C hasta peso constante para la determinación del peso seco. En el estadio de R2

(Fehr *et al.*, 1971) en 2012 y en R3 durante 2013 se tomaron muestras de tejido para analizar el % de K. Por cada sitio de muestreo se tomaron al azar 20 hojas completas, seleccionando la más joven y completamente expandida de cada planta. Las muestras fueron secadas a 60°C durante 48 h y posteriormente se molieron a un tamaño inferior a 2 mm. Se determinó la concentración total de K por emisión de 0,50 g de una muestra calcinada durante 5 h a 550°C (Isaac y Kerber, 1971).

El rendimiento en grano de soja se determinó y georreferenció en ambos años usando una cosechadora equipada con monitor de rendimiento y GPS. Los 12 m centrales de cada faja fueron cosechados y se registraron rendimientos cada 2 a 3 m en la dirección de avance de la máquina. Los datos fueron depurados utilizando procedimientos estándar. El rendimiento correspondiente a cada sitio de muestreo se determinó promediando los registros del monitor en un radio de 5 m desde el punto central, que correspondió a entre 3 y 7 datos. Además se realizaron muestreos manuales para determinar componentes del rendimiento. En cada sitio de muestreo se contaron las plantas en 5 m lineales de 3 surcos consecutivos y se cortaron 9 plantas al azar. En laboratorio se trillaron las muestras y se calcularon los componentes peso de mil granos y granos por planta.

Durante todo el período del experimento se registraron las precipitaciones en forma diaria mediante la lectura de un pluviómetro ubicado a 2000 m del sitio de ensayo.

3.4.4. Análisis de datos

El efecto de los tratamientos en todas las variables se estudió en forma independiente para cada año. Se realizaron análisis de varianza considerando los sitios dentro de la faja como submuestras, excepto para el rendimiento en grano medido con monitor de rendimiento. Las medias de tratamientos se compararon mediante Test de Tukey (P valor \leq 0,05). El

porcentaje de plantas con síntomas fue transformado mediante raíz cuadrada.

Con fines descriptivos y para identificar zonas dentro del campo con menor variabilidad en K int., se realizó un análisis de *clusters* (Khattree y Naik, 2000) incorporando el K int. medido en 2012 como variable de entrada. Los grupos (*clusters*) fueron creados con un procedimiento de medias-c difusas, que consiste en una clasificación continua no supervisada, mediante el software Management Zone Analyst (MZA) (Fridgen *et al.*, 2004). Se utilizaron dos índices para definir el número óptimo de grupos a formar, el índice de desempeño difuso (FPI) y el de clasificación de entropía normalizada (NCE) (Fridgen *et al.*, 2004). Posteriormente se estudiaron dentro de cada grupo las diferencias en rendimiento entre tratamientos, mediante análisis de varianza que consideraron modelos con tratamientos como efecto fijo. En todos los casos, las medias de tratamientos se compararon mediante Test de Tukey (P valor $\leq 0,05$).

3.5. RESULTADOS

Las precipitaciones ocurridas en la zafra 2011-2012 entre la madurez del trigo y siembra de soja fueron de 68 mm en varios eventos, durante el ciclo del cultivo fueron de 485 mm (desde el 21 de diciembre al 30 de abril), siendo 102 mm los precipitados durante el período crítico. En la zafra 2012-2013, las precipitaciones entre la senescencia del cultivo de cobertura y la siembra de soja fueron de 339 mm; durante el ciclo del cultivo fueron de 696 mm (desde el 13 de noviembre al 30 de marzo) y en el período crítico fueron de 151 mm.

El mapa de K int. a siembra en el año 2012 (Figura 1 B) revela la existencia de variación en los niveles dentro del área del experimento. El valor promedio de K int. para ese año en los tratamientos sin fertilización con K (Control y K₂O) fue de 0,46 cmol kg⁻¹, con variaciones desde 0,39 a 0,54 cmol kg⁻¹, mientras que la media de K int. para toda el área fue de 0,45 cmol

kg⁻¹. En tanto, para el año 2013, el promedio de K int. en los sitios de los tratamientos sin fertilización con K (Control y K₂O) fue de 0,40 cmol kg⁻¹ con variaciones desde 0,33 a 0,50 cmol kg⁻¹. Mientras que el valor medio de fósforo Bray a la siembra en 2012 fue de 13,7 mg kg⁻¹ (Cuadro 1).

El porcentaje de plantas con síntomas de deficiencia de K (Figura 2 y Cuadro 3) fue mayor en el año 2013. En ambos años el cultivo no presentó síntomas de deficiencia en el tratamiento 240 K₂O; en tanto en 2013 junto al tratamiento 60 K₂O fueron los que mostraron menor sintomatología, mientras que los tratamientos sin fertilización potásica (Control y 0 K₂O) no se diferenciaron entre sí.

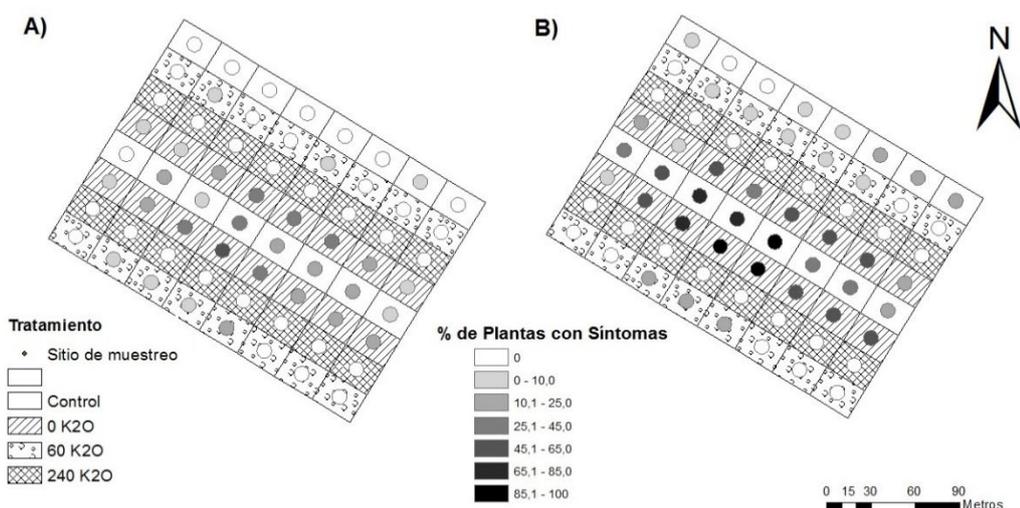


Figura 2. Mapas de porcentaje de plantas con síntomas de deficiencia de potasio en V4 y V5 y tratamientos, en años 2012 (A) y 2013 (B), respectivamente.

En cuanto al crecimiento inicial evaluado al estadio de V4 y V5 (Cuadro 3), existieron diferencias entre tratamientos que se incrementaron en el segundo año. En 2012 solo existieron diferencias en el peso seco por planta entre los tratamientos Control y 240 K₂O, con un peso 16% superior para el último tratamiento. En 2013 los tratamientos con fertilización con K (60 K₂O y

240 K₂O) se diferenciaron de los tratamientos sin K (Control y 0 K₂O) con un peso seco por planta 22% superior.

Cuadro 3. Raíz cuadrada de porcentaje de plantas con síntomas visuales de deficiencia de potasio y producción de materia seca en soja según tratamientos, para años 2012 y 2013, en estadios V4 y V5 respectivamente.

Tratamiento	Año 2012		Año 2013	
	√% Síntomas	MS/Planta (g)	√% Síntomas	MS/Planta (g)
Control	1,6 b	1,13 b	4,8 a	1,44 b
0 K ₂ O	4,4 a	1,18 ab	6,7 a	1,42 b
60 K ₂ O	1,6 b	1,27 ab	1,6 b	1,71 a
240 K ₂ O	0,0 c	1,31 a	0,0 b	1,79 a
P valor	<0,0001	0,01	<0,0001	<0,0001

*MS: Materia seca.

**Letras diferentes indican diferencias significativas en la columna (Test Tukey 0,05).

Los niveles nutricionales de K evaluados en hoja al estadio R2 y R3 (Cuadro 4) fueron significativamente ($P < 0,05$) superiores en los tratamientos 60 K₂O y 240 K₂O en ambos años. A su vez, el nivel nutricional en 2013 fue en promedio 31% inferior al del año 2012.

Cuadro 4. Porcentaje de potasio en hoja de soja según tratamientos para años 2012 y 2013, en estadios R2 y R3, respectivamente.

Tratamiento	% Potasio 2012	% Potasio 2013
Control	1,79 b	1,13 b
0 K ₂ O	1,83 b	1,04 b
60 K ₂ O	2,31 a	1,66 a
240 K ₂ O	2,32 a	1,89 a

P valor	<0,0001	<0,0001
---------	---------	---------

*Letras diferentes indican diferencias significativas en la columna (Test Tukey 0,05).

Se identificaron 5 zonas dentro del área del experimento mediante el procedimiento de agrupamiento a partir del K int a siembra en 2012. Los valores de K int. a siembra de los años 2012 y 2013 se presentan en el Cuadro 5. En la comparación de medias de rendimiento entre tratamientos dentro de cada zona, se excluyó la zona 5 por estar integrada por un reducido número de sitios. En las zonas consideradas, el promedio de K int. en 2012 varió de 0,42 a 0,52 cmol kg⁻¹. En tanto el K int. en 2013 incorporó los efectos de la fertilización realizada y de la extracción del cultivo del año anterior, que se reflejó en variación entre tratamientos en los niveles medidos.

Cuadro 5. Potasio intercambiable (K int.) a la siembra de soja en años 2012 y 2013 según zona identificada mediante procedimiento de agrupación por medias-c difusas y tratamientos.

Zona	N° sitios	K int. 2012*	K int. 2013*			
			Tratamiento			
			Control	0 K ₂ O	60 K ₂ O	240 K ₂ O
1	17	0,42	0,37	0,36	0,41	0,49
2	9	0,49	0,43	0,41	0,46	0,50

3	21	0,46	0,40	0,39	0,45	0,53
4	10	0,52	0,45	0,46	0,49	0,53
5	3	0,33	-	-	0,31	0,36

*K int. en cmol kg⁻¹

No se encontraron diferencias significativas de rendimiento entre tratamientos en ninguna de las zonas en el año 2012 (Cuadro 6). El rendimiento medio fue de 2930, 3052, 2978 y 2880 kg ha⁻¹ para las zonas 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Cuadro 6. Rendimiento en grano de soja (kg ha⁻¹) en año 2012 según tratamiento y zona definida a partir de K int. a siembra 2012.

Tratamiento	Zona			
	1	2	3	4
Control	3037	3288	3185	3261
0 K ₂ O	2797	3009	2744	2585
60 K ₂ O	3111	3460	2948	2634
240 K ₂ O	2774	2451	3035	3041
P-valor	0,6465	0,1327	0,7110	0,6331

En 2013 se encontraron diferencias en rendimiento de soja entre tratamientos en las zonas 1, 2 y 3 (Cuadro 7). En todos los casos el mayor rendimiento se registró en el tratamiento 240 K₂O, siendo que este no se diferenció significativamente del 60 K₂O en las tres zonas mencionadas y tampoco del 0 K₂O en la zona 2.

Cuadro 7. Rendimiento en grano de soja (kg ha⁻¹) en año 2013 según tratamiento y zona definida a partir de Kint. a siembra 2012.

Zona	
------	--

Tratamiento	1	2	3	4
Control	2772 b	3165 b	2963 c	3262
0 K ₂ O	3050 b	3391 ab	3174 bc	3459
60 K ₂ O	3391 ab	3340 ab	3511 ab	3590
240 K ₂ O	3795 a	3699 a	3731 a	3626
P-valor	0,0015	0,0219	0,0001	0,5673

*Letras diferentes indican diferencias significativas en la columna (Test Tukey 0,05).

En componentes del rendimiento, en 2012 se encontraron diferencias entre tratamientos en población, peso de grano y cantidad de granos por planta (Cuadro 8).

Cuadro 8. Componentes de rendimiento de soja según tratamientos para año 2012.

Tratamiento	Plantas/m ²	PMG (g)	Granos/planta
Control	54,5 a	169,6 a	39,2 b
0 K ₂ O	51,4 ab	160,3 b	44,0 ab
60 K ₂ O	53,4 a	167,3 ab	38,9 b
240 K ₂ O	45,2 b	165,4 ab	47,9 a
P valor	0,0049	0,0135	0,0046

*Letras diferentes indican diferencias significativas en la columna (Test Tukey 0,05). ** PMG: peso de mil granos.

En 2013, el peso de grano fue el único componente del rendimiento en que existieron diferencias entre tratamientos (Cuadro 9). Los tratamientos en que se logró el mayor peso de grano fueron los que incluyeron fertilización con K, superando en 12% el de los tratamientos sin K agregado. En la cantidad de granos por planta se encontró una tendencia a mayores valores en el tratamiento 240 K₂O.

Cuadro 9. Componentes de rendimiento de soja según tratamientos para año 2013.

Tratamiento	Plantas/m ²	PMG (g)	Granos/planta
Control	44,8 a	159,1 b	44,3
0 K ₂ O	45,5 a	159,1 b	44,3
60 K ₂ O	41,4 a	180,4 a	44,0
240 K ₂ O	45,9 a	177,1 a	51,8
P valor	0,6769	<0,0001	0,0556

*Letras diferentes indican diferencias significativas en la columna (Test Tukey 0,05). ** PMG: peso de mil granos.

3.6. DISCUSIÓN

El mapa interpolado de K int. a siembra de 2013 a partir de los sitios sin fertilización con K muestra una disminución de la disponibilidad del nutriente para toda el área del experimento respecto al año anterior, que tomó un valor medio de 0,06 cmol kg⁻¹. La extracción realizada por el cultivo del año 2012, considerando un rendimiento en grano promedio de 2864 kg ha⁻¹ y la concentración media de K en grano de soja reportada por García y Correndo (2013), puede estimarse en 47 kg de K ha⁻¹. En tanto, la mencionada disminución en los valores de K int. en los sitios sin fertilización con K en 2012, considerando una densidad aparente del suelo de 1,25 g/cm³ y la profundidad de muestreo utilizada, se estima en 44 kg de K/ha. En este contexto, la extracción de K es consistente con las caídas registradas en la capa de 0 a 15 cm, la cual explica un 94% de la remoción realizada. El K se

caracteriza junto al fósforo y nitrógeno por ser los nutrientes con mayor acumulación de las formas disponibles en las capas superficiales del suelo (Jobbágy y Jackson, 2001), desde donde son obtenidas las mayores cantidades absorbidas por los cultivos. El K en los suelos es clasificado en fracciones que difieren en su disponibilidad y de las cuales el K int. es el de mayor importancia para los cultivos (Havlin *et al.* 2005); a su vez se conoce que la mayoría de estas fracciones se interconvierten dinámicamente entre sí por procesos de fijación y liberación (Yawson *et al.*, 2011). Existen múltiples propiedades físicas y químicas del suelo, interacciones suelo-planta y microorganismos del suelo que afectan los procesos de fijación y liberación de K (Zörb *et al.*, 2014). En nuestra situación, en los tratamientos sin fertilización con K, consideramos que fue lento el desplazamiento del equilibrio hacia las fracciones de mayor disponibilidad en respuesta a la extracción realizada por el cultivo. Este comportamiento lo vinculamos a la extensa historia de agricultura continua con bajos agregados de K que presentan estos suelos, lo cual vinculado a la extracción acumulada ha reducido su capacidad de liberación de K desde el K fijado y en estructuras cristalinas, como ha sido descrito para algunos tipos de suelos (Zhan *et al.*, 2014).

La disminución en los niveles de K int. hacia el segundo año de evaluación en los tratamientos sin fertilización con K, fue compensada parcialmente en el tratamiento 60 K₂O y revertida en el tratamiento 240 K₂O (Cuadro 4). En el tratamiento 60 K₂O, con una aplicación de K equivalente a 49 kg ha⁻¹, la disminución registrada en el K int. estaría relacionada a procesos de fijación del K incorporado, dado que los demás procesos que se vinculan a salidas K desde el sistema y/o reducen su disponibilidad, como la lixiviación y pérdidas por erosión (Havlin *et al.*, 2005; Bertol *et al.*, 2003) se considera fueron despreciables a causa del régimen hídrico registrado.

Para una situación donde el valor medio de K int. en suelo a siembra fue de 0,45 cmol kg⁻¹ y las zonas con los menores valores registraron 0,33 y

0,42 cmol kg⁻¹ (Cuadro 5), no hubo respuesta en rendimiento significativa al agregado de K con fósforo no limitante (Año 2012, Cuadro 6). Si bien se cuantificaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en el porcentaje de plantas con síntomas de deficiencia de K al estadio V4, no existieron impactos de relevancia en el estado nutricional de las plantas en etapas tempranas del período reproductivo (Cuadro 4), donde todos los tratamientos tuvieron una concentración en hoja superior al crítico de 1,76% propuesto para ese estadio (Reuter *et al.*, 1997). Esto explica la ausencia de respuesta en rendimiento de soja durante el año 2012 en todas las zonas con aporte diferencial de K identificadas en la chacra. Esta situación se asemeja a lo reportado en otras investigaciones, en que la existencia de efectos positivos de fertilización con K en crecimiento inicial o la manifestación de síntomas tempranos de deficiencia de K no necesariamente se relacionan a efectos en rendimiento (Borges y Mallarino, 2000; Askegaard y Eriksen, 2002). La mayor concentración de K en hoja a inicios de la etapa reproductiva en los tratamientos con fertilización potásica, denotó la existencia de consumo de lujo por el cultivo sin implicancias en el rendimiento.

No fertilizar con K en una situación en la que el aporte de K del suelo osciló próximo al valor crítico de 0,34 cmol kg⁻¹ propuesto para Uruguay por Barbazán *et al.* (2011), determinó una reducción de los valores de K int. y aproximación al crítico hacia el año siguiente. Esto se manifestó en el cultivo en un incremento en el porcentaje de plantas con síntomas de deficiencia de K en etapas tempranas (V5), determinó deficiencias en el nivel nutricional a inicios de la fase reproductiva y respuesta en rendimiento a la fertilización con K (Cuadros 3,4 y 7). La superioridad en rendimiento del tratamiento 240 K₂O en las zonas 1, 2 y 3 fue producto de incrementos en el peso de grano y la cantidad de granos por planta (Cuadro 9). El rendimiento logrado en el tratamiento 60 K₂O se ubicó en posiciones intermedias, con diferencias significativas con el Control solo en la zona 3. Esta zona es la que presentó a la siembra del cultivo del año 2013 las mayores diferencias en K int. entre el tratamiento 60 K₂O y los tratamientos Control y 0 K₂O. Si bien es posible

considerar que parte de la respuesta observada en los tratamientos 60 K₂O y 240 K₂O se debió al agregado de fósforo, la respuesta a este nutriente no fue significativa en ninguna de las zonas y considerando las guías locales para el manejo de la fertilización con fósforo no se esperaba respuesta significativa en base a los resultados del muestreo en 2012.

3.7. CONCLUSIONES

El K int. del suelo se redujo de manera diferencial entre tratamientos hacia el segundo año de evaluación. La respuesta del cultivo de soja a los tratamientos mostró variación temporal, asociada a esta reducción del K int. La consideración del nivel nutricional de K en hoja en etapas tempranas del período reproductivo fue una buena herramienta diagnóstico de respuestas en rendimiento en grano a la fertilización con K, mientras los síntomas tempranos de deficiencia tuvieron una utilidad variable. Durante el año 2013, la respuesta de rendimiento a los tratamientos fue diferente entre las zonas identificadas en base en K int. a siembra del año anterior.

3.8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al International Plant Nutrition Institute y Canpotex por haber financiado parcialmente la actividad a través del proyecto “Fertilización K y P: estudios de largo plazo”; a Miguel Carballal y Martín Luzardo por aportar el sitio experimental y colaborar en las tareas logísticas; a ISUSA por aportar los fertilizantes; al Profesor Jorge Franco por la colaboración en el análisis estadístico y a la Asociación Uruguaya de Siembra Directa por el apoyo institucional.

La investigación que da origen a los resultados presentados en la presente publicación recibió fondos de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación bajo el código *POS_2011_1_3545*.

3.9. BIBLIOGRAFÍA

- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R.** 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Tomo III: Descripción de las unidades de suelos. Montevideo: MAP. 273 p.
- Askegaard M, Eriksen J, Johnston AE.** 2004. Sustainable management of potassium. En: Schjorring P, Elmholt S, Christensen BT. [Eds.]. Managing soil quality: challenges in modern agriculture. Wallingford: CABI Publishing. pp. 85 – 102.
- Askegaard M, Eriksen J.** 2002. Exchangeable potassium in soil as indicator of potassium status in an organic crop rotation on loamy sand. *Soil Use and Management*, 18(2): 84 - 90.
- Barbazán MM, Bordoli JM, Coitiño J, del Pino A, Hoffman E, Mazzilli S.** 2013. Avances en estudios de potasio en Uruguay. En: Simposio Fertilidad (2013, Rosario, Santa Fe, Argentina). Nutrición de los cultivos para la intensificación productiva sustentable. Acassuso: IPNI. pp 151 - 155.
- Barbazán M, Boutes C, Beux L, Bordoli M, Cano JD, 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 Uruguay*, 15(2): 93 - 99.
- Barbazán M, Ferrando M, Zamalvide J.** 2007. Relevamiento nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 11(1): 22 – 34
- Boutes C, Barbazán MM, Beux L.** 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre Areniscas Cretácicas y transicionales. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 41: 1 – 8.
- Bertol I, Mello EL, Guadagnin JC, Zapparoli ALV, Carrafa MR.** 2003. Nutrient losses by water erosion. *Scientia Agricola*, 60: 581 - 586.
- Bordoli JM, Barbazán MM, Rocha L.** 2012. Soil nutritional survey for soybean production in Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 16(3): 76 – 83.

- Borges R, Mallarino AP.** 2000. Grain yield, early growth, and nutrient uptake of no-till soybean as affected by phosphorus and potassium placement. *Agronomy Journal*, 92(2): 380 - 389.
- Bray RH, Kurtz LT.** 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, 59: 39 - 45.
- Cano JD, 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*, 36: 9 – 12.
- Fageria NK, Barbosa Filho MP, da Costa JGC.** 2001. Potassium-use efficiency in common bean genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 24: 1937 – 1945.
- Fehr WR, Caviness CE, Burmood DT, Pennington JS.** 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine Max (L.) Merrill*. *Crop Science*, 11(6): 929 - 931.
- Fridgen JJ, Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST, Wiebold WJ, Fraisse CW.** 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*, 96: 100 - 108.
- García F, Correndo A.** 2013. Cálculo de requerimientos nutricionales de cultivos extensivos. En línea 17 de octubre de 2015. IPNI Cono Sur. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>
- Havlin JL, Beaton JD, Tisdale SL, Nelson WL.** 2005. *Soil Fertility and Fertilizers, an Introduction to Nutrient Management*. 7a ed. New Jersey: Pearson Education. 515 p.
- Hernández J, Casanova ON, Zamalvide JP.** 1988. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. *Boletín de Investigación*. Montevideo: Facultad de Agronomía, 19: 20 p.
- Isaac RA, Kerber JD.** 1971 Atomic absorption and flame photometry: techniques and uses in soil, plant and water analysis. En: *Instrumental*

methods for analysis of soil and plant tissues. Madison: Soil Science Society of America. pp. 17 - 37.

Jobbágy E, Jackson R. 2001. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 53(1): 51 - 77.

Khattree R, Naik DN. 2000. Multivariate data reduction and discrimination with SAS® software. 1 ed. Cary : SAS Inst. 558p.

Marschner H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2a ed. New York: Academic Press. 889 p.

Morón A, Quincke A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. En: Jornada Técnica El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos (2010, Mercedes, Uruguay). La Estanzuela: INIA (Serie Actividades de Difusión n° 605). pp 5–9.

Öborn I, Andrist-Rangel Y, Askegaard M, Grant C, Watson C, Edwards A. 2005. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. *Soil Use and Management*, 21(1): 102 – 112.

Pravia V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espaciotemporal en la investigación de cultivos agrícolas, A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis Mag. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.

Reuter DJ, Robinson JB, Dutkiewicz C. 1997. Plant analysis an interpretation manual. Melbourne, Australia: CSIRO. 572p.

Terra J, Melo D, Sawchik J. 2010. Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimiento de cultivos

agrícolas en Uruguay. En: 1a Reunión Técnica Sociedad Uruguaya de las Ciencias del Suelo: Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos, Montevideo. CD-ROM.

White PJ. 2013. Improving potassium acquisition and utilisation by crop plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(3): 305 – 316.

Yawson DO, Kwakye PK, Armah FA, Frimpong KA. 2011. The dynamics of potassium (K) in representative soil series of Ghana. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 6(1): 48 – 55.

Zhan L, Li X, Lu J, Liao Z, Ren T, Cong R. 2014. Potassium fixation and release characteristics of several normal and K-exhausted soils in the middle and lower reaches of the Yangtse river, China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(22): 2921 - 2931.

Zörb C, Senbayram M, Peiter E. 2014. Potassium in agriculture – status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9): 656 - 669.

4. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GLOBALES

La estrategia seguida para atender los objetivos permitió trabajar en un sitio con variación en K int. en valores cercanos al valor crítico tentativo propuesto para la región (Barbazán et al., 2011). A su vez en el área existió variación en propiedades topográficas, físicas y químicas del suelo, las cuales según diversos autores presentan relación al rendimiento en cultivos de secano (Terra et al. 2006, Cox et al. 2003, Kravchenko y Bullock 2000). La metodología de análisis empleada permitió estudiar la respuesta de soja a la fertilización y su relación con variables del suelo y terreno.

Se encontró variabilidad temporal en la respuesta en rendimiento del cultivo de soja a la fertilización. No existió respuesta a la fertilización con P. El K se presenta como un nutriente frente al que se registró una respuesta consistente. La disminución entre años de los niveles de K int. se presenta como la principal característica que explica las diferencias en la respuesta en rendimiento entre años. La reducción en aporte de K desde el suelo se reflejó además en sintomatología temprana de deficiencias, crecimiento inicial de plantas y niveles nutricionales en estado reproductivo.

La magnitud de la disminución en los niveles de K int. entre la siembra de ambos años es considerada importante. El monitoreo de largo plazo de Kint. ha mostrado disminuciones en diversas regiones agrícolas (Tan et al. 2012, Morón y Quincke 2010, Darilek et al. 2009, Malo et al. 2005), incrementando la superficie con valores inferiores a los óptimos. También se han encontrado disminuciones en el K lentamente disponible (Tan et al., 2012). Las reducciones anuales de K int. reportadas en esos estudios son menores a las encontradas en nuestra investigación incluso cuando no fue agregado K como fertilizantes o abonos, y muestran importante variabilidad entre sitios.

Para nuestra situación, si bien se evaluaron diversas variables vinculadas directa o indirectamente a la absorción de K, no se detectó ninguna que permitiera mejorar la interpretación de las respuestas a la

fertilización con K, más allá de la propia disponibilidad del nutriente en suelo al ser medido en muestras secas.

Los resultados obtenidos sugieren que bajo las condiciones en que se realizó el estudio, el valor crítico tentativo de K int. en el suelo para el cultivo de soja sería superior al considerado actualmente a partir del trabajo de Barbazán et al. (2011). La generación de información adicional vinculada a la dinámica de K en los suelos y la respuesta de los cultivos a su agregado para las condiciones productivas de Uruguay, permitiría el estudio de las respuestas en forma independiente por cultivos y tipos de suelo. El trabajo de Barbazán et al. (2011) consideró principalmente experimentos realizados en cereales de invierno y maíz, los que presentan menores requerimientos fisiológicos de K y generalmente adquieren mejor el K que la mayoría de las eudicotiledóneas, entre las que se encuentran las leguminosas (White, 2013). De hecho, en otras regiones las respuestas a la fertilización se han estudiado en forma diferencial por cultivo y suelos (Barbagelata y Mallarino 2013, Brennan y Bell 2013), determinando diferencias entre ellos para algunos de los casos.

La aplicación de fertilizantes con K tuvo relación con la presencia de síntomas visuales tempranos de deficiencia al nutriente en ambos años, pero esta variable no fue útil en la predicción de respuestas en rendimiento a la fertilización en ambos cultivos. En cambio, el nivel nutricional de K en hoja en estadios reproductivos tempranos fue efectivo como herramienta diagnóstica de la existencia de respuestas en rendimiento en base a los niveles de referencia disponibles a nivel internacional.

Fue posible identificar, en base al K int. zonas dentro del campo con diferente capacidad de responder a la fertilización con K. Estas zonas poseen una utilidad descriptiva, dado que con la información disponible previamente al trabajo no serían utilizadas para la definición de manejos diferenciales en esquemas de agricultura de precisión. La construcción de un

mapa consistente de la distribución espacial del K int. sería de gran utilidad en esquemas de definición de ambientes productivos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Tomo III: Descripción de las unidades de suelos. Montevideo: MAP. 273 p.
- Ashley M, Grant M, Grabov A. 2006. Plant responses to potassium deficiencies: a role for potassium transport proteins. *Journal of Experimental Botany*, 57(2): 425 -436.
- Askegaard M, Eriksen J, Johnston AE. 2004. Sustainable management of potassium. En: Schjorring P, Elmholt S, Christensen BT, editors. *Managing soil quality: challenges in modern agriculture*. Wallingford: CABI Publishing. 85 – 102.
- Askegaard M, Eriksen J, Olesen JE. 2003. Exchangeable potassium and potassium balances in organic crop rotations on coarse sand. *Soil Use and Management*, 19: 96 – 103.
- Askegaard M, Eriksen J. 2002. Exchangeable potassium in soil as indicator of potassium status in an organic crop rotation on loamy sand. *Soil Use and Management*, 18(2): 84 - 90.
- Baligar VC. 1985. Potassium uptake by plants, as characterized by root density, species and K/Rb ratio. *Plant and Soil*, 85(1): 43 - 53.
- Barbagelata PA, Mallarino AP. 2013. Field correlation of potassium soil test methods based on dried and field-moist soil samples for corn and soybean. *Soil Science Society of America Journal*, 77(1): 318 - 327.
- Barbagelata PA. 2006. Evaluation of Potassium Soil Tests and Methods for Mapping Soil Fertility Properties in Iowa Corn and Soybean Fields. Tesis Ph.D. Ames, IA, USA. Iowa State University. 111 p.
- Barbazán MM, Bordoli JM, Coitiño J, del Pino A, Hoffman E, Mazzilli S. 2013. Avances en estudios de potasio en Uruguay. En: *Simposio Fertilidad*

- (2013, Rosario, Santa Fe, Argentina). Nutrición de los cultivos para la intensificación productiva sustentable. Acassuso: IPNI. pp 151 - 155.
- Barbazán M, Bautes C, Beux L, Bordoli M, Cano JD, 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 Uruguay*, 15(2): 93 - 99.
- Barbazán M, Ferrando M, Zamalvide J. 2007. Relevamiento nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 11(1): 22 – 34
- Bautes C, Barbazán MM, Beux L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre Areniscas Cretácias y transicionales. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 41: 1 – 8.
- Bedrossian S, Singh B. 2004. Potassium adsorption characteristics and potassium forms in some New South Wales soils in relation to early senescence in cotton. *Soil Research*, 42(7): 747 - 753.
- Bell MJ, Moody PW, Harch GR, Compton B, Want PS. 2009. Fate of potassium fertilisers applied to clay soils under rainfed grain cropping in south-east Queensland, Australia. *Soil Research*, 47(1): 60 - 73.
- Bengtsson H, Öborn I, Jonsson S, Nilsson I, Andersson A. 2003. Field balances of some mineral nutrients and trace elements in organic and conventional dairy farming—a case study at Öjebyn, Sweden. *European Journal of Agronomy*, 20(1–2): 101 - 116.
- Bertol I, Mello EL, Guadagnin JC, Zapparoli ALV, Carrafa MR. 2003. Nutrient losses by water erosion. *Scientia Agricola*, 60: 581 - 586.
- Bishop TFA, Lark RM .2006. The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale. *Geoderma* 133, 87 – 106.
- Bolland MDA, Cox WJ, Codling BJ. 2002. Soil and tissue tests to predict pasture yield responses to applications of potassium fertiliser in high-

- rainfall areas of south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42(2): 149 - 164.
- Bonilla C, Terra JA, Gutiérrez L, Roel A. 2015. Cosechando los beneficios de la agricultura de precisión en un cultivo de arroz en Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. 19(1): 112 – 121.
- Bordoli JM, Barbazán MM, Rocha L. 2012. Soil nutritional survey for soybean production in Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 16(3): 76 – 83.
- Borges R, Mallarino AP. 2000. Grain yield, early growth, and nutrient uptake of no-till soybean as affected by phosphorus and potassium placement. *Agronomy Journal*, 92(2): 380 - 389.
- Botella MA, Martínez V, Pardines J, Cerdá A. 1997. Salinity induced potassium deficiency in maize plants. *Journal of Plant Physiology*, 150(1–2): 200 - 205.
- Bray RH, Kurtz LT. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, 59: 39 - 45.
- Brennan RF, Bell MJ. 2013. Soil potassium—crop response calibration relationships and criteria for field crops grown in Australia. *Crop and Pasture Science*, 64(5): 514 - 522.
- Cambardella CA, Karlen DL. 1999. Spatial Analysis of Soil Fertility Parameters. *Precision Agriculture*, 1(1): 5 - 14.
- Cano JD, 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*, 36: 9 – 12.
- Clover MW, Mallarino AP. 2013. Corn and soybean tissue potassium content responses to potassium fertilization and relationships with grain yield. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2): 630-642.
- Coitiño J, Mazzoni P, Cadenazzi M, Ernst O. 2013. Fósforo, potasio y azufre en trigo: Levantando restricciones al rendimiento entre zonas de

- productividad. 85 En: Simposio Fertilidad (2011, Rosario, Santa Fe, Argentina). La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción. Acassuso: IPNI. pp 171-173.
- Cox MS, Gerard P, Wardlaw M, Abshire M. 2003. Variability of selected soil properties and their relationships with soybean yield. *Soil Science Society of America Journal*, 67(4): 1296 – 1302.
- Darilek JL, Huang B, Wang Z, Qi Y, Zhao Y, Sun W, Gu Z, Shi X. 2009. Changes in soil fertility parameters and the environmental effects in a rapidly developing region of China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129(1–3): 286 - 292.
- Ding Y, Luo W, Xu G. 2006. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Annals of Applied Biology*, 149(2): 111 - 123.
- Dobermann A, Cassman KG, Mamaril CP, Sheehy JE. 1998. Management of phosphorus, potassium, and sulfur in intensive, irrigated lowland rice. *Field Crops Research*, 56(1–2): 113 - 138.
- Fageria NK, Barbosa Filho MP, da Costa JGC. 2001. Potassium-use efficiency in common bean genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 24: 1937 – 1945.
- Fehr WR, Caviness CE, Burmood DT, Pennington JS. 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine Max (L.) Merrill*. *Crop Science*, 11(6): 929 - 931.
- Fridgen JJ, Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST, Wiebold WJ, Fraisse CW. 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*, 96: 100 - 108.
- García F, Correndo A. 2013. Cálculo de requerimientos nutricionales de cultivos extensivos. En línea 17 de octubre de 2015. IPNI Cono Sur. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>

- García-Lamothe A, Quincke A. 2012. El potasio en la producción de cultivos de invierno. En: Jornada Cultivos de Invierno (2012, Mercedes, Uruguay). La Estanzuela: INIA. (Serie Actividades de Difusión no. 677). pp 9-14.
- García-Lamothe A, Quincke A, Pereyra S, Díaz de Ackermann M. 2009. Respuesta a cloruro de potasio (KCl) en trigo y cebada. En: Jornada de Cultivos de Invierno (2009, Mercedes, Uruguay). La Estanzuela: INIA. (Serie Actividades de Difusión no. 566). pp 13-18.
- Gee G, Or D. 2002. Particle-Size Analysis. En: Dane JH, Topp GC. [Eds.]. Methods of soil analysis: Part 4: Physical methods. Madison: Soil Science Society of America. pp. 812 - 815.
- Green TR, Salas JD, Martinez A, Erskine R. 2007. Relating crop yield to topographic attributes using Spatial Analysis Neural Networks and regression. *Geoderma*, 139(1–2): 23 – 37.
- Hafsi C, Debez A, Abdelly C. 2014. Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades. *Acta Physiologiae Plantarum*, 36(5): 1055 – 1070.
- Hassan R. 2002. Potassium status of soils in India. *Better Crops International*, 16: 3 – 5.
- Havlin JL, Beaton JD, Tisdale SL, Nelson WL. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers, an Introduction to Nutrient Management*. 7a ed. New Jersey: Pearson Education. 515 p.
- Hernández J, Casanova ON, Zamalvide JP. 1988. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. *Boletín de Investigación*. Montevideo: Facultad de Agronomía, 19: 20 p.
- Isaac RA, Kerber JD. 1971 Atomic absorption and flame photometry: techniques and uses in soil, plant and water analysis. En: *Instrumental methods for analysis of soil and plant tissues*. Madison: Soil Science Society of America. pp. 17 - 37.

- Jungk A, Claassen N. 1986. Availability of phosphate and potassium as the result of interactions between root and soil in the rhizosphere. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 149 (4): 411 – 427
- Jobbágy E, Jackson R. 2001. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 53(1): 51 - 77.
- Kaspar T, Pulido D, Fenton T, Colvin T, Karlen D, Jaynes D, Meek D. 2004. Relationship of corn and soybean yield to soil and terrain properties. *Agronomy Journal*, 96(3): 700 - 709.
- Khan SA, Mulvaney RL, Ellsworth TR. 2014. The potassium paradox: Implications for soil fertility, crop production and human health. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 29(1): 3 - 27.
- Khattree R, Naik DN. 2000. Multivariate data reduction and discrimination with SAS® software. 1 ed. Cary : SAS Inst. 558p.
- Kitchen N, Sudduth K, Fridgen J, Robert PC, Rust RH, Larson WE. 2000. Influence of claypan soil topsoil thickness and fertility factors on corn and soybean yield. *International Conference on Precision Agriculture (5th, 2000, Bloomington, Minnesota)*. Proceedings. Bloomington, Minnesota: American Society of Agronomy. pp 1 - 16.
- Kopittke PM, Menzies NW. 2007. A Review of the Use of the Basic Cation Saturation Ratio and the 'Ideal' Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2): 259 – 265.
- Kravchenko AN, Thelen KD, Bullock DG, Miller NR. 2003. Relationship among crop grain yield, topography, and soil electrical conductivity studied with cross-correlograms. *Agronomy Journal*, 95(5): 1132 - 1139.
- Kravchenko AN, Bullock D.G. 2000. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92(1): 75 - 83.

- Lark R, Wheeler H. 2003. A method to investigate within-field variation of the response of combinable crops to an input. *Agronomy Journal*, 95: 1093 - 1104.
- Lauzon JD, O'Halloran IP, Fallow DJ, von Bertoldi AP, Aspinall D. 2005. Spatial Variability Of Soil Test Phosphorus, Potassium, And Ph Of Ontario Soils. *Agronomy Journal*, 97(2): 524 - 532.
- Lipiec J, Stępniewski W. 1995. Effects of Soil Compaction and Tillage Systems on Uptake and Losses of Nutrients. *Soil and Tillage Research*, 35(95): 37 – 52.
- Mallarino AP, Clover MW, Oltmans RR. 2011. Identification of reasons for high temporal soil-test potassium variation. En: North Central Extension Industry Soil Fertility Conference (41°, 2011, Des Moines, Iowa). Proceedings. Brookings, South Dakota: International Plant Nutrition Institute. pp 65 – 73.
- Mallarino AP, Wittry DJ, Barbagelata PA. 2002. Iowa soil-test calibration research update: Potassium and the Mehlich-3 ICP phosphorus test. En: North Central Extension Industry Soil Fertility Conference (2002, Des Moines, Iowa). Proceedings. Des Moines, Iowa: Iowa University. pp 29 – 39.
- Malo DD, Schumacher TE, Doolittle JJ. 2005. Long-term cultivation impacts on selected soil properties in the northern Great Plains. *Soil and Tillage Research*, 81(2): 277 - 291.
- Marschner H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2a ed. New York: Academic Press. 889 p.
- McLean EO, Hartwig RC, Eckert DJ, Triplett GB. 1983. Basic cation saturation ratios as a basis for fertilizing and liming agronomic crops. II. Field Studies. *Agronomy Journal*, 75(4): 635 - 639.
- Moore ID, Gessler PE, Nielsen GA, Peterson GA. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science*, 57: 443 - 452.

- Morón A, Quincke A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. En: Jornada Técnica El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos (2010, Mercedes, Uruguay). La Estanzuela: INIA (Serie Actividades de Difusión n° 605). pp 5–9.
- Mulla DJ, McBratney AB. 2002. Soil Spatial Variability. En: Warrick AW. [Ed.]. Soil physics companion. Boca Raton: CRS Press. 343 - 373.
- Nuñez A. 2015. Dinámica del potasio en suelos agrícolas del litoral oeste de Uruguay. Tesis Mag. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 99 p.
- Öborn I, Andrist-Rangel Y, Askegaard M, Grant C, Watson C, Edwards A. 2005. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. *Soil Use and Management*, 21(1): 102 – 112.
- Ohno T, Grunes DL. 1985. Potassium-magnesium interactions affecting nutrient uptake by wheat forage." *Soil Science Society of America Journal*, 49(3): 685 - 690.
- Oltmans RR, Mallarino AP. 2015. Potassium uptake by corn and soybean, recycling to soil, and impact on soil test potassium. *Soil Science Society of America Journal*, 79(1): 314 – 327.
- Oosterhuis D, Loka D, Kawakami E, Pettigrew W. 2014. The physiology of potassium in crop production. *Advances in Agronomy*, 126: 203 – 233.
- Oudri N, Castro JL, Doti R, Carbonell de AS. 1976. Guía para fertilización de cultivos. Montevideo: MAP/CIAAB/DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger. Dirección de Suelos y Fertilizantes). 47p.
- Panten K, Bramley RGV, Lark RM, Bishop TFA. 2010. Enhancing the value of field experimentation through whole-of-block designs. *Precision Agriculture*, 11: 198 – 213.

- Parent AC, Bélanger MC, Parent LE, Santerre R, Viau AA, Anctil F, Bolinder MA, Tremblay C. 2008. Soil properties and landscape factors affecting maize yield under wet spring conditions in eastern Canada. *Biosystems Engineering*, 99(1): 134 - 144.
- Pettigrew WT. 2008. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiologia Plantarum*, 133: 670 – 681.
- Piepho HP, Richter C, Spilke J, Hartung K, Kunick A, Thöle H. 2011. Statistical aspects of onfarm experimentation. *Crop and Pasture Science*, 62, 721 – 735.
- Plant RE. 2007. Comparison of means of spatial data in unreplicated trials. *Agronomy Journal*, 99: 481 – 484.
- Plant RE. 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30: 9 - 29.
- Pravia V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espaciotemporal en la investigación de cultivos agrícolas, A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis Mag. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.
- Qi Z, Spalding EP. 2004. Protection of plasma membrane K⁺ transport by the salt overly sensitive1 Na⁺-H⁺ antiporter during salinity stress. *Plant Physiology*. 136 (1): 2548 - 2555.
- Rengel Z, Damon PM. 2008. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. *Physiologia Plantarum*, 133(4): 624 - 636.
- Reuter DJ, Robinson JB, Dutkiewicz C. 1997. Plant analysis an interpretation manual. Melbourne, Australia: CSIRO. 572p

- Römheld V, Kirkby EA. 2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant and Soil*, 335(1-2): 155 – 180.
- Sardi K, Fulop P. 1994. Relationship between soil potassium level and potassium uptake of corn affected by soil moisture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 25(9-10): 1735 - 1746.
- Sardi K, Csitari G. 1998. Potassium fixation of different soil types and nutrient levels. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29(11-14): 1843 - 1850.
- Seiffert S, Kaselowsky J, Jungk A, Claassen N. 1995. Observed and calculated potassium uptake by maize as affected by soil water content and bulk density. *Agronomy Journal*, 87(6): 1070-1077.
- Smil V. 1999. Crop residues: agriculture's largest harvest. *Bioscience*, 49: 299 – 308.
- Spalding EP, Hirsch RE, Lewis DR, Qi Z, Sussman MR, Lewis BD. 1999. Potassium uptake supporting plant growth in the absence of AKT1 channel activity: inhibition by ammonium and stimulation by sodium. *The Journal of General Physiology*, 113(6): 909 - 918.
- Sparks D. 1987. Potassium dynamics in soils. En: Stewart BA [Ed.]. *Advances in Soil Science*. New York, Springer. 6: 1 - 63.
- Sparks DL, Huang PM. 1985. Physical chemistry of soil potassium. En: Munson RD [Ed.]. *Potassium in agriculture*. Madison, American Society of Agronomy. pp. 201 – 76.
- Spear SN, Edwards DG, Asher CJ. 1978. Response of cassava, sunflower, and maize to potassium concentration in solution III. Interactions between potassium, calcium, and magnesium. *Field Crops Research*, 1(0): 375 - 389.
- Sudduth KA, Kitchen NR, Wiebold WJ, Batchelor WD, Bollero GA, Bullock DG, Clay DE, Palm HL, Pierce FJ, Schuler RT, Thelen KD. 2005.

- Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3): 263 - 283.
- Tan, D., J. Jin, L. Jiang, S. Huang, Z. Liu. 2012. Potassium assessment of grain producing soils in North China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 148(0): 65-71.
- Terra J, Melo D, Sawchik J. 2010. Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimiento de cultivos agrícolas en Uruguay. En: 1a Reunión Técnica Sociedad Uruguaya de las Ciencias del Suelo: Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Montevideo: Uruguay ISTRO. CD-ROM.
- Terra J, Shaw J, Reeves D, Raper R, van Saten E, Schwab E, Mask P. 2006. Soil management and landscape variability affects field-scale cotton productivity. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 98 – 107.
- Thöle H, Richter C, Ehlert D. 2013. Strategy of statistical model selection for precision farming on-farm experiments. *Precision Agriculture*, 14: 434 - 449.
- Uribe E, Cox F. 1988. Soil properties affecting the availability of potassium in highly weathered soils. *Soil Science Society of America Journal*, 52: 148 - 152.
- Walkley A, Black IA. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29 – 38.
- Wang M, Zheng Q, Shen Q, Guo S. 2013. The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, 14: 7370 - 7390.
- Webster R, Oliver MA. 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*, segunda ed. Chichester: Wiley. 332p.

- Wedepohl KH. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1217 – 32.
- White PJ. 2013. Improving Potassium Acquisition and Utilisation by Crop Plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(3): 305 – 316.
- Wilson JP, Gallant JC. 2000. Digital Terrain Analysis. En: Wilson JP, Gallant JC. [Eds.]. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Chichester: Wiley. pp. 1 - 27.
- Winzeler HE, Owens PR, Joern BC, Camberato JJ, Lee BD, Anderson DE, Smith DR. 2008. Potassium fertility and terrain attributes in a fragiudalf drainage catena. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5): 1311 - 1320.
- Wolkowski RP. 1990. Relationship between wheel-traffic-induced soil compaction, nutrient availability, and crop growth: A Review. *Journal of Production Agriculture*, 3(4): 460 - 469.
- Wong MTF, Edwards NK, Barrow NJ. 2000. Accessibility of subsoil potassium to wheat grown on duplex soils in the south-west of Western Australia. *Soil Research*, 38(3): 745 - 751.
- Yang XE, Liu JX, Wang WM, Ye ZQ, Luo AC. 2004. Potassium internal use efficiency relative to growth vigor, potassium distribution, and carbohydrate allocation in rice genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 27: 837 – 852
- Yawson DO, Kwakye PK, Armah FA, Frimpong KA. 2011. The dynamics of potassium (K) in representative soil series of Ghana. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 6(1):48 – 55
- Zhan L, Li X, Lu J, Liao Z, Ren T, Cong R. 2014. Potassium fixation and release characteristics of several normal and K-exhausted soils in the middle and lower reaches of the Yangtse river, China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(22): 2921 - 2931.

Zörb C, Senbayram M, Peiter E. 2014. Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9): 656 - 669.

6. ANEXOS

Cuadro 1. Estadística descriptiva de variables de suelo y terreno para todos los sitios de muestreo. CE 7 cm: conductividad eléctrica directa a 7 cm de profundidad; CE 40 cm: conductividad eléctrica directa a 40 cm de profundidad; CEa-s: conductividad eléctrica aparente en superficie; CEa-p: conductividad eléctrica aparente en profundidad; RP 4-8: resistencia a la penetración 4 a 8 cm; RP 24-28: resistencia a la penetración 24 a 28 cm; RP 28-32: resistencia a la penetración 28 a 32 cm; SPI: Índice de poder de escorrentía; TWI: Índice topográfico de humedad; LS: Índice de capacidad de transporte de sedimentos; DE: desvío estándar; CV: coeficiente de variación; P(15): percentil 15%; P(85): percentil 85%.

Variable	Media	DE	CV	Rango	P(15)	P(85)
CE 7 cm (mS cm ⁻¹)	629	69	11,0	368	583	696
CE 40 cm (mS cm ⁻¹)	1391	103	7,4	619	1303	1489
CEa-s (mS m ⁻¹)	59,71	2,92	4,89	16,31	57,31	62,23
CEa-p (mS m ⁻¹)	79,25	3,35	4,23	13,16	75,62	83,63
RP 4-8 cm (kPa)	996,7	171,4	17,2	709	809,9	1193
RP 20-24 cm (kPa)	1290,4	159,4	12,35	679,5	1116	1471,9
RP 28-32 cm (kPa)	1295	172	13,29	788	1107	1462
Elevación (m)	98,25	2,08	2,11	7,8	95,7	100,8
Pendiente (°)	2,4	0,85	35,27	3,64	1,3	3,2
Aspecto	257,9	37,7	14,5	160,4	219,3	299,3
Curvatura del perfil	0,03	0,12	377,2 9	0,61	-0,09	0,15
Curvatura del plano	-0,02	0,2	1186, 7	1,01	-0,15	0,14
Área de cuenca (m ² m ⁻¹)	23,45	41,42	176,6 1	192,42	3,39	22,23
SPI	0,89	1,6	180,1 1	9,32	0,1	1,13
TWI	5,2	0,86	16,45	3,85	4,3	5,99
LS	0,26	0,21	78,43	1,12	0,07	0,44

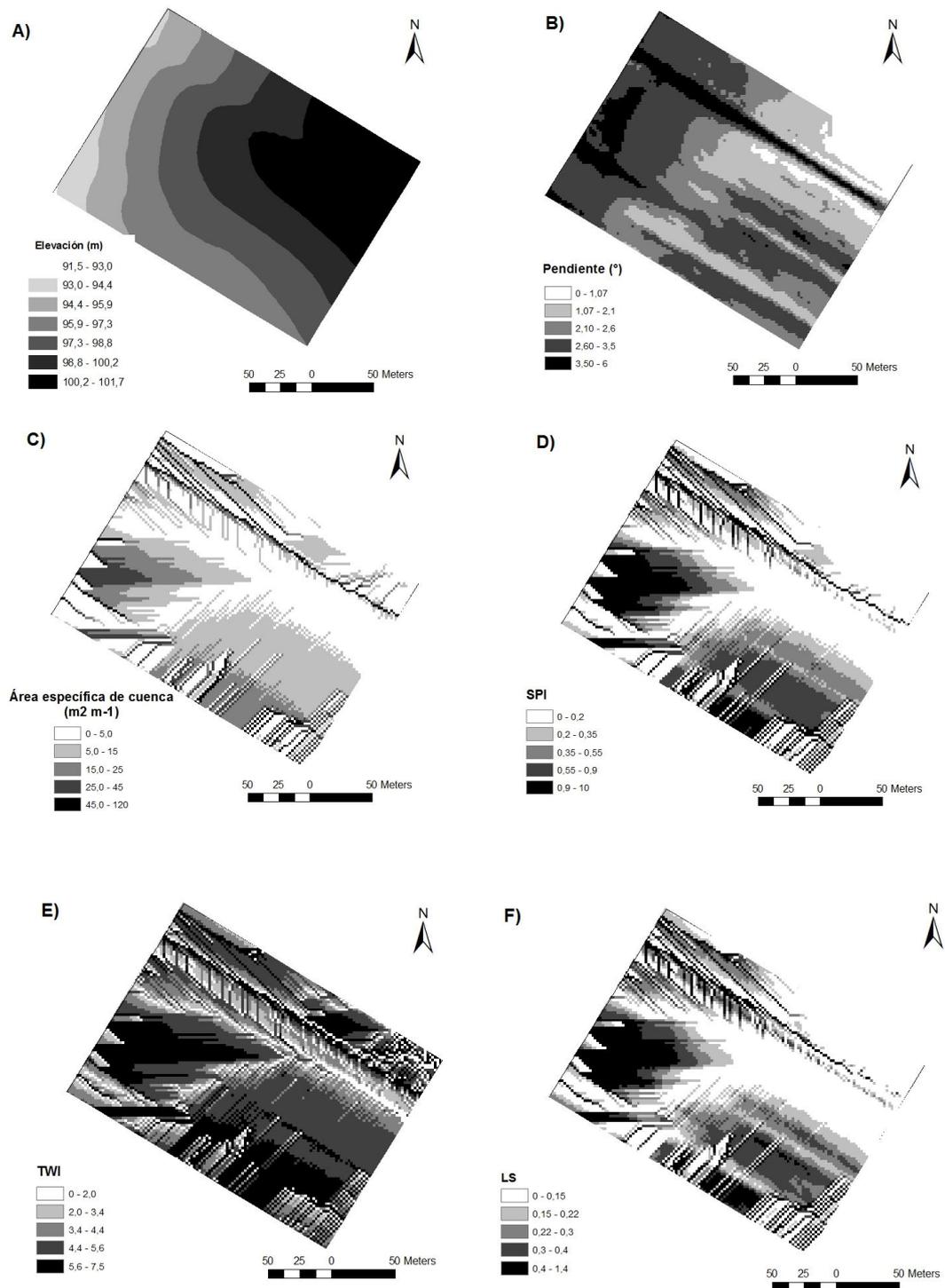


Figura 1: Mapas interpolados de Elevación (A), Pendiente (B), Área específica de cuenca (C), Stream Power Index (SPI) (D), Topographic Wetness Index (TWI) (E), y Factor LS (F) del área del experimento.

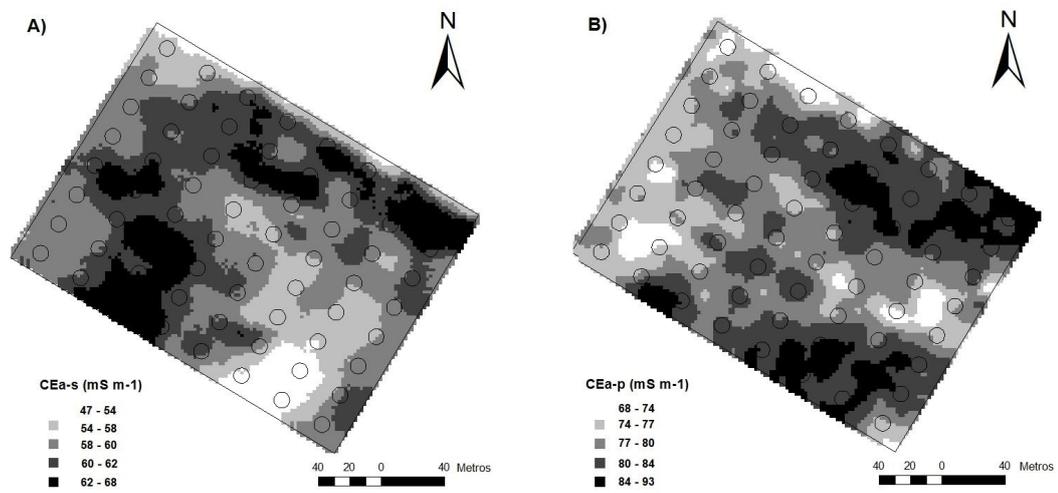


Figura 2. Mapas interpolados de conductividad eléctrica aparente en superficie (CEa-s) (A) y en profundidad (CEa-p) (B) en el área del experimento.