

Fertilización con potasio en soja: asociación de la respuesta del cultivo con características edáficas y topográficas

Coitiño-López Javier¹, Barbazán Mónica², Ernst Oswaldo¹

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

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

Recibido: 29/2/16 Aceptado: 25/2/16

Resumen

Los objetivos del estudio fueron cuantificar la respuesta 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 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 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. Se encontró 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 en los tratamientos sin K, pero dicha relación no se observó cuando se aplicó 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 la fertilización con mayor exactitud.

Palabras clave: *Glycine max*, Uruguay, limitantes nutricionales, rendimiento

Summary

Potassium Fertilization in Soybean: Association of Crop Response with Edaphic and Topographic Properties

Our objectives were to quantify the soybean crop response to potassium (K) fertilization under variations of soil K supply, and to study the association of this response with other soil and topographic properties. A strip fertilization experiment was evaluated during two years in soybean. In 2012 treatments were established with K rates (0, 60 and 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 rate in the corresponding treatments. A 30 x 22 m regular sampling grid was delineated. Determinations included nutrients in soil, organic matter, texture, soil penetration resistance, electrical conductivity, terrain attributes, foliar K concentration (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 where 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.

Keywords: *Glycine max*, Uruguay, nutritional constraints, yield

Introducción

El potasio (K) es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo vegetal, y es el que se absorbe en mayor cantidad luego del nitrógeno (Tisdale *et al.*, 1993). 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 viera 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, el 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 K int. 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 K int. en torno al valor crítico tentativo; 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 un sector dentro de una chacra comercial, incorporando la variabilidad natural dentro del campo y la generada por aplicación de fertilizante potásico.

Materiales y métodos

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 Riso 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).

Prácticas culturales y tratamientos

El trabajo se realizó en dos cultivos de soja sucesivos. El primer año la soja (Cultivar Nidera 5009) fue sembrada 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 P₂O₅ 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).

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	2,93	9,73	15	27	33
Limo (%)	38	3,80	10,04	22	35	41
Arena (%)	32	2,43	7,57	8	29	35
K 0-15 cm (cmol _c kg ⁻¹)	0,45	0,05	11,36	0,22	0,41	0,51
Na 0-15 cm (cmol _c kg ⁻¹)	0,37	0,06	15,26	0,37	0,32	0,4
Ca 0-15 cm (cmol _c kg ⁻¹)	22,72	2,39	10,53	11,99	21,2	24,52
Mg 0-15 cm (cmol _c kg ⁻¹)	2,65	0,3	11,48	1,29	2,31	3
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

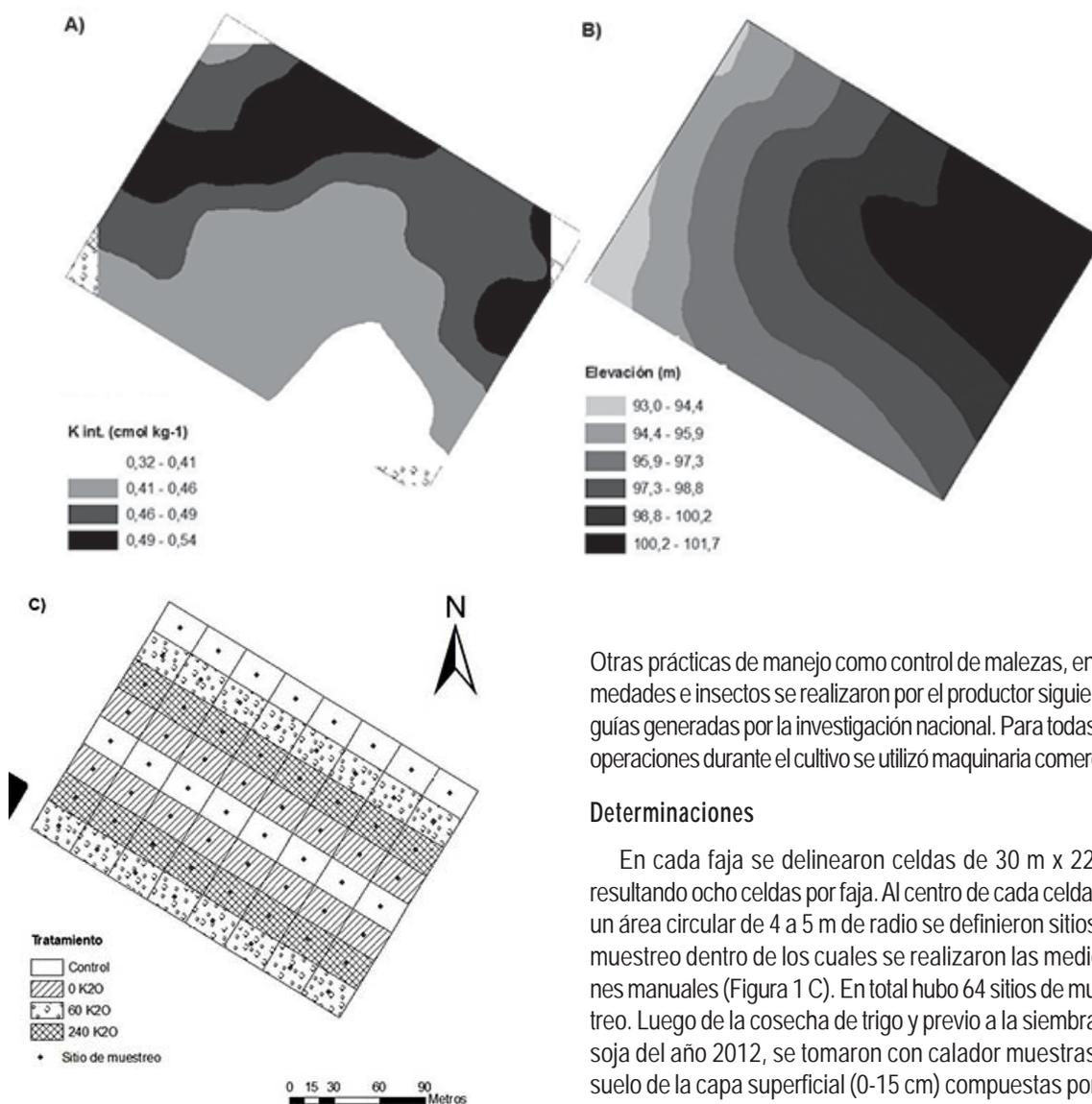


Figura 1. (A) Mapa de potasio intercambiable en suelo de 0-15 cm (K int.) a siembra 2012; (B) Mapa topográfico (C) Diseño experimental y ubicación de sitios de muestreo.

Otras prácticas de manejo como control de malezas, enfermedades e insectos se realizaron por el productor siguiendo guías generadas por la investigación nacional. Para todas las operaciones durante el cultivo se utilizó maquinaria comercial.

Determinaciones

En cada faja se delinearon 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

Cuadro 2. Descripción de tratamientos de fertilización a la siembra de soja en año 2012 y 2013.

Tratamiento	2012		2013	
	Potasio (kg K ₂ O ha ⁻¹)	Fósforo (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Potasio (kg K ₂ O ha ⁻¹)	Fósforo (kg P ₂ O ₅ 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

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 magnesio (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 cuando el cultivo de cobertura se encontraba en proceso de descomposición, 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 para obtener datos correspondientes a la profundidad 0-15 cm. Si bien la asunción implícita de valores de densidad aparentes constantes entre ambas profundidades de muestreo no es real, en esta situación se entiende que es razonable considerando que el K int. promedio fue superior 12 % en la capa 0-7,5 cm frente a 7,5-15 cm y que valores normales de densidad aparente en siembra directa continua son entre 5 y 8 % inferiores en la capa superior respecto a la inferior de la profundidad considerada. 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 se calcularon atributos topográficos. Los atributos primarios del terreno calculados fueron pendiente, aspecto, curvatura del perfil, 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 los superiores en tres desvíos estándar al promedio de rendimiento de cada año, y 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 entre tres y siete datos del monitor, según el sitio, en un radio de 5 m desde el punto central.

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.

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 *glms {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 (p -valor $< 0,05$). 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 simple. 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 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. 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.

Resultados

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 (R3 - R5). 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 (R3 - R5) fueron 151 mm.

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 en grano 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	3097 a
0 K ₂ O	2786	3147 a
60 K ₂ O	2922	3378 b
240 K ₂ O	2816	3708 c

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 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. Los tratamientos en que se fertilizó con K (60 K₂O y

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

Efecto	P-Valor
Elevación	< 0,01
Coordenada Y	< 0,01
K int. 0-15 2012	0,15
Coordenada Y * K int. 0-15 cm 2012	0,19
Bloque	< 0,01
Tratamiento	< 0,01

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.

Variación de K en suelo

El valor promedio de K int. 0-15 cm en los tratamientos sin fertilización con K, fue de 0,46 cmol_c kg⁻¹ en 2012 y 0,40 cmol_c 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_c 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 0-7,5 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. En la capa más profunda evaluada, de 7,5-15 cm, todos los tratamientos registraron disminuciones en el K int.

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

Cuadro 6. Variación en el potasio intercambiable en suelo (cmol_c kg⁻¹) a la siembra de soja entre los años 2012 y 2013 según tratamiento. Letras diferentes en la fila indican diferencias significativas según 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	<0,01
7,5-15 cm	- 0,04 a	- 0,04 a	- 0,04 a	- 0,02 a	0,01

soja para el año 2013 solamente se detectaron regresiones significativas de la forma lineal y con 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 < 0,01) y de 0 a 15 cm (P valor < 0,01) (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 (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 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). Pero

no fue posible interpretar estos resultados por sí 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.

No se registraron interacciones significativas de los tratamientos con Na y Ca intercambiables, P Bray 1, fracciones granulométricas, resistencia a la penetración en ninguna de las profundidades relevadas, CE directa, CEa, ni con atributos primarios y secundarios del terreno.

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 < 0,01) 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 < 0,01). Las regresiones siguieron similar comportamiento que los residuos de rendimiento y K int. 0 a 15 cm a siembra 2013 (Figura 2).

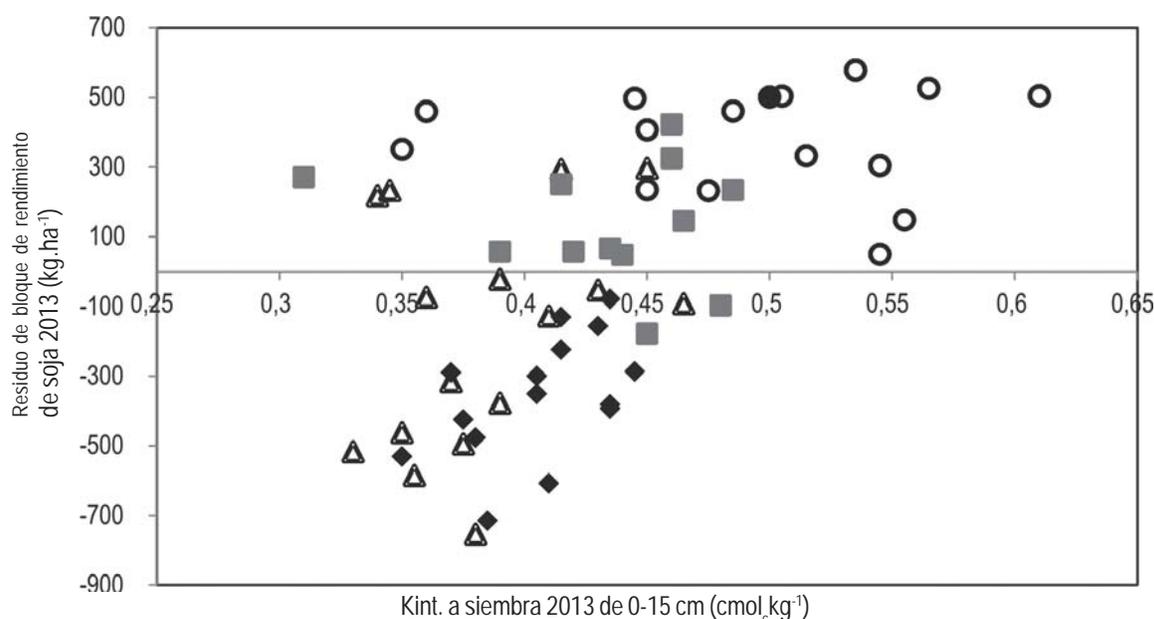


Figura 2. Residuos de bloque de rendimiento de soja del año 2013 según potasio intercambiable (Kint.) en suelo a la siembra del mismo año en la capa de 0-15 cm y tratamientos (Rombos: Control; Triángulos: 0 K₂O; Cuadrados: 60 K₂O; Círculos: 240 K₂O). Regresiones: Tratamiento Control: $y = 5711x - 2655$; Tratamiento 0 K₂O: $y = 2949x - 1311$.

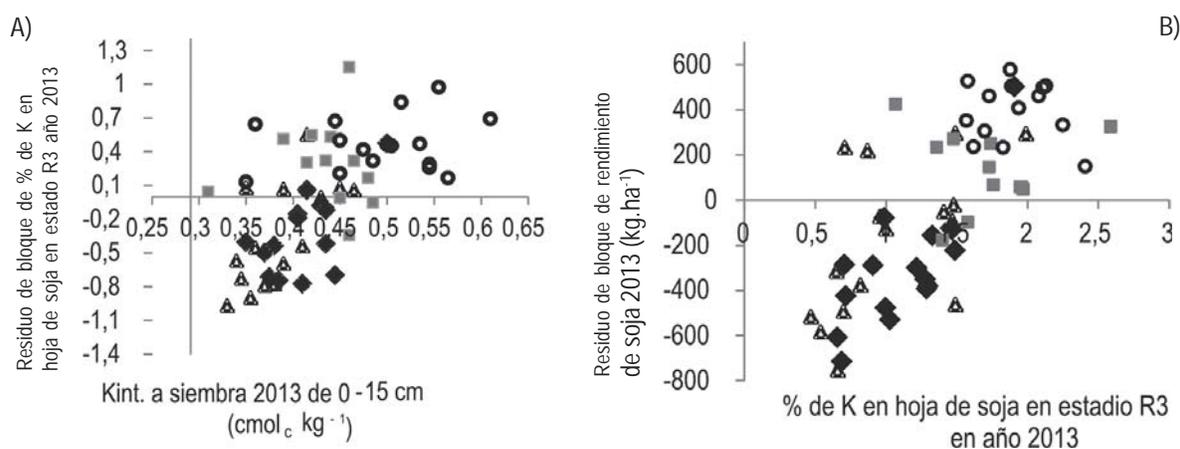


Figura 3. A) Residuos de bloque de % de potasio (K) en hoja de soja en estadio R3 en año 2013 según potasio intercambiable (Kint.) en suelo a la siembra del mismo año en la capa de 0-15 cm y tratamientos (Rombos: 0K₂O; Triángulos: 0 K₂O; Cuadrados: 60 K₂O; Círculos: 240 K₂O). Regresiones: Tratamiento 0K₂O: $y = 5,75x - 2,67$; Tratamiento 0 K₂O: $y = 7,38x - 3,22$. 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: $y = 594,83x - 972,57$; Tratamiento 0 KCl: $y = 430,85x - 627,21$.

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 de 0-7,5 cm 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_c kg⁻¹ (Barbazán *et al.*, 2013). El incremento de 0,05 cmol_c kg⁻¹ registrado como promedio de 0-15 cm en nuestro estudio en el tratamiento 240 K₂O es considerado muy reducido, lo cual denota características de un suelo

que tendría importante capacidad de fijación. En esta situación la retención de K en el cultivo de cobertura al momento de la siembra de soja se supone fue reducida, como consecuencia de las elevadas precipitaciones durante el barbecho y de que el mismo se encontraba en descomposición. Al calcular un balance aparente de K para el tratamiento 240 K₂O, asumiendo como inexistentes las pérdidas por erosión y lixiviado, da un saldo positivo de 153 kg de K ha⁻¹, en tanto al considerar únicamente la capa de suelo de 0-7,5 cm, el cambio de K int. entre la siembra de ambos cultivos corresponde a un incremento de K de 40 kg ha⁻¹, lo que refuerza la interpretación de que se dio una importante fijación del nutriente.

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. Esta relación entre rendimiento y el K int. de 0 a 15 cm fue resultado de lo sucedido en la capa de 0 a 7,5 cm, pero se realizó el análisis para el promedio de 0 a 15 cm por las ventajas en la interpretación. La respuesta en rendimiento se dio hasta valores de K int. en suelo promedio de 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. Si bien los valores pueden estar sobrestimados por considerar que la densidad aparente de ambas capas es igual, el valor de K int. en la capa 0 a

7,5 cm del año de inicio fue en promedio 12 % superior al K int. de 7,5 a 15 cm. Por tanto, sería necesaria una reducción de la densidad aparente de la capa superior de entre 6 y 8 % con relación a la de la capa 7-15 cm para modificar la segunda cifra significativa del valor estimado en este trabajo. El mismo se ubica en el límite entre los rangos «Óptimo» y «Alto» identificados por Mallarino *et al.* (2002) para suelos de Iowa (Estados Unidos), niveles en los que frecuentemente se reportan incrementos en rendimiento de hasta el 20 % por fertilizar con K.

De todas las variables edáficas y topográficas relevantes, la única que presentó una interacción consistente con la respuesta a la fertilización fue el K int. en suelo en las profundidades 0 a 7,5 cm y 0 a 15 cm. A su vez, la interacción significativa registrada con el K int. promedio de 0 a 15 cm sería resultado de lo sucedido en la capa de 0 a 7,5 cm, dado que el K int. de 7,5 a 15 cm no mostró relación con la respuesta en rendimiento a la fertilización en ninguno de los tratamientos. 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 (1985), indican que en situaciones de agregado de K reciente, el secado de muestras podría promover la fijación del K, resultando valores de K int. 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 lo explica la mejora en el nivel nutricional evaluado en R3. Los tratamientos donde 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 de suficiencia de entre 1,76 y 2,0 % 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 correlaciones con 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.

Conclusiones

Existió respuesta positiva en rendimiento en grano de soja a la fertilización con K en valores de K int. en el suelo promedio de 0 a 15 cm superiores al nivel crítico tentativo definido para la región. No se identificaron características edáficas ni topográficas que permitieran mejorar la interpretación del valor de análisis del K int. en el suelo y predecir con mayor probabilidad la respuesta a fertilización potásica en soja.

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, a la Asociación Uruguaya de Siembra Directa por el apoyo institucional; y a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por contribuir con la financiación del estudio.

Bibliografía

- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Tomo I. Clasificación de suelos. Montevideo: MAP. 96p.
- 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, Coitino J, del Pino A, Hoffman E, Mazzilli S. 2013. Avances en estudios de potasio en Uruguay. En: Nutrición de los cultivos para la intensificación productiva sustentable; 2013; Rosario, Santa Fe, Argentina. AcaSuso: 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.
- 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.
- 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 5th International Conference on Precision Agriculture*; 16 - 19 Julio, 2000; Bloomington, Minnesota, Estados Unidos. Bloomington: 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.
- Lipiec J, Stepniewski 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: *Proceedings of the 41 North Central Extension Industry: Soil Fertility Conference*; 16 - 17 Julio. 2011; Des Moines, Iowa, Estados Unidos. Des Moines: 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 Proceedings*; Des Moines, Iowa, Estados Unidos. Des Moines: International Plant Nutrition Institute. pp. 29 - 39.
- McLean EO, Watson ME. 1985. Soil measurements of plant-available potassium. En: Munson RC. [Ed.]. *Potassium in agriculture*. Madison: ASA, CSSA, SSSA. pp. 277 - 308.
- 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: CSIRO. 572p.
- 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.
- 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.
- 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. *Advances in Soil Science*, 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: 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.
- Tisdale SJ, Nelson WL, Beaton JD.** 1993. Soil fertility and fertilizers. Nueva York : Macmillan Publishing. 634p.
- 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 Degjareff 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. 2a 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.