

Fertilización potásica de los principales cultivos bajo siembra directa mecanizada en la región oriental del Paraguay

Potassium fertilization in no-till mechanized farming of eastern Paraguay

Higinio Moreno Resquin¹, Héctor Javier Causarano Medina^{1}, Jimmy Walter Rasche Álvarez¹, Ursino Federico Barreto Riquelme² y Francisco Mendoza Duarte³*

¹ Departamento de Suelos y Ordenamiento Territorial, Casa Matriz, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción (FCA-UNA). San Lorenzo, Paraguay.

² Filial Pedro Juan Caballero, FCA-UNA. Pedro Juan Caballero, Paraguay.

³ Filial de San Pedro de Ycuamandyyú, FCA-UNA. San Pedro, Paraguay.

*Autor para correspondencia (hector.causarano@agr.una.py).

Recibido: 23/02/2012; Aceptado: 26/04/2012.

RESUMEN

El uso continuo de los suelos y nuevas variedades con alto potencial de rendimiento hace necesario aplicar fertilización potásica en sistemas agrícolas manejados en siembra directa en la región oriental de Paraguay. Los objetivos de esta investigación fueron evaluar el efecto de la fertilización potásica sobre el rendimiento de trigo, maíz y soja, y determinar el nivel crítico de potasio en el suelo. Se condujeron seis experimentos en fincas de agricultores de Caaguazú, San Pedro y Amambay. El diseño experimental fue bloques completamente al azar con tres repeticiones. Los tratamientos fueron 0, 25, 50, 75 y 100 kg K₂O ha⁻¹, las aplicaciones se realizaron con cloruro de potasio al voleo al momento de la siembra de los cultivos. En el ciclo invernal 2009 se sembró trigo y en el ciclo estival 2009 – 2010 soja y maíz. Los cultivos respondieron a la aplicación de potasio y el grado de respuesta estuvo inversamente relacionado con la concentración de K⁺ intercambiable en la camada del suelo de 0 – 10 cm. El nivel crítico fue 0,17 cmol_c kg⁻¹. En promedio, la dosis de máxima producción fue 63 kg K₂O ha⁻¹. Al agruparse los datos de esta investigación con los de otras investigaciones recientes se estableció el nivel crítico general para potasio en 0,16 cmol_c kg⁻¹. Los resultados contribuyeron para mejorar la recomendación de fertilización potásica en la Región Oriental de Paraguay.

Palabras clave: Nivel crítico, calibración, análisis de potasio.

ABSTRACT

Continued land use and new varieties with high yielding potential creates the need to apply potassium fertilizer in agricultural systems under no-till farming in eastern Paraguay. The objectives of this research were to evaluate the effect of potassium fertilization on the yield of wheat, corn and soybeans, and determine the critical level of potassium in the soil. Six experiments were conducted on-farm in Caaguazú, San Pedro and Amambay. The experimental design was a randomized block with three replications. Treatments consisted of five doses of K₂O (0, 25, 50, 75 and 100 kg ha⁻¹), broadcasted at planting using potassium chloride. Wheat was planted in the winter of 2009 and soybeans and corn in the summer 2009 – 2010. Crops responded to the application of potassium and the degree of response was inversely related to interchangeable K⁺ at the 0 – 10 cm soil depth. The critical K⁺ level was 0.17 cmol_c kg⁻¹. On average, the dose for maximum yield was 63 kg K₂O ha⁻¹. When data from this research was grouped with other recent studies, the critical general level for potassium was 0.16 cmol_c kg⁻¹. The results contributed to improve K fertilization recommendations in eastern Paraguay.

Key words: Critical level, calibration, analysis of potassium.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad del potasio para los cultivos depende del intercambio entre el potasio constituyente de minerales primarios y secundarios y formas más activas de potasio, el ion K^+ en la solución del suelo y el ion K^+ adsorbido en la superficie externa de arcillas y materia orgánica. Esta última fracción se denomina K intercambiable, puede ser fácilmente cuantificada mediante análisis de laboratorio y numerosos estudios han demostrado que tiene relación directa con la producción de cosechas (Russell 1988, Raij 1991, Kirkman et al. 1994, Wendling 2005).

Por mucho tiempo, la fertilización potásica no fue prioridad en cultivos anuales de la Región Oriental de Paraguay, porque los suelos presentaban alta concentración de K^+ intercambiable proveniente de la meteorización del material parental. Fatecha (2004) observó que 75% de las muestras de suelo analizadas entre 1980 y 2002 presentaban niveles de K superior a $0,19 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Sin embargo, el uso continuo del suelo, los altos rendimientos obtenidos en los últimos años y la escasa restitución de potasio, puede hacer que actualmente sea necesaria la fertilización potásica en numerosos suelos. Wendling (2005) y Barreto (2008) constataron falta de respuesta de los cultivos de soja, trigo y maíz a la fertilización potásica en experimentos en suelos arcillosos de Itapúa y Alto Paraná. Sin embargo, suelos con menores tenores de arcilla pueden presentar respuesta a la fertilización potásica. En este contexto, el análisis de suelo es una herramienta útil para estimar la disponibilidad de potasio para las plantas, pero se necesita que la interpretación de los valores del análisis sean adecuados y estén relacionados con el rendimiento de los cultivos, es decir, deben ser calibrados.

Las recomendaciones de fertilización química para trigo, soja y maíz que se emplean actualmente en Paraguay, fueron elaboradas en la década del 90, para sistemas de producción que empleaban aradas y rastreadas en la preparación de los suelos; o están basadas en recomendaciones utilizadas en los estados de Paraná, San Pablo, Minas Gerais o Rio Grande del Sur, Brasil (Barreto, 2008). Es necesario que estas recomendaciones se adecuen a las condiciones de clima y suelo y al sistema de siembra directa empleado actualmente en Paraguay. Para el efecto, se deben realizar trabajos de calibración de análisis de suelos y generar mayor información sobre dosis adecuadas de fertilizantes químicos, de manera a aumentar la productividad y disminuir costos de producción e impactos ambientales negativos.

Durante los años 2003–2006, la Cámara Paraguaya de Exportadores de Cereales y Oleaginosas (CAPECO) y la Universidad Federal de Santa María (UFESM), Brasil, cooperaron en un proyecto de investigación que buscaba

calibrar métodos de análisis de suelos y adecuar las recomendaciones de fertilización de nitrógeno, fósforo y potasio para trigo, soja y maíz cultivados en siembra directa. En el marco de esta cooperación, se condujeron cinco experimentos en fincas de agricultores en los Departamentos de Alto Paraná, Itapúa, Amambay y Misiones (Wendling 2005, Barreto 2008).

Durante los años 2009 y 2010, investigadores de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA/UNA), con el apoyo financiero del Instituto de Biotecnología Agrícola (INBIO), condujeron experimentos similares a los de CAPECO – UFESM en seis fincas de agricultores en los Departamentos de Caaguazú, San Pedro y Amambay, donde se cultiva aproximadamente el 26 % del trigo, 19 % de la soja y 18 % del maíz producidos en Paraguay. Éste artículo se elaboró en base a las experiencias adquiridas y los datos levantados durante la investigación, que tuvo como objetivos: i) evaluar el efecto de la fertilización potásica sobre el rendimiento de trigo, maíz y soja, y ii) determinar el nivel crítico de potasio en el suelo, de manera a fortalecer la base de datos sobre calibración de análisis de suelo y recomendaciones de fertilización potásica en la Región Oriental del Paraguay.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio abarcó tres departamentos de la Región Oriental del Paraguay. En el departamento de Caaguazú se instalaron dos experimentos, uno en el distrito de Coronel Oviedo, y el otro en la compañía Torin, distrito de J. Eulogio Estigarribia (Campo 9). En el departamento de San Pedro se instalaron dos experimentos en fincas de agricultores, uno de ellos en el sitio conocido como Bolas Kua y otro en Villa Jardín, ambos en el Distrito Itacurubi del Rosario. También se instalaron dos experimentos en el departamento de Amambay, ambos en el Distrito de Pedro Juan Caballero, uno en la localidad denominada Yvype y otro en la denominada Chiriguelo. Los seis experimentos se instalaron durante el mes de mayo de 2009.

El clima de los sitios experimentales es sub tropical húmedo, meso térmico, con veranos cálidos e inviernos con heladas ocasionales. Existe mayor cantidad de lluvias en primavera y verano que en otoño invierno, donde no se tiene una estación seca definida. Las lluvias disminuyen durante los meses de otoño, siendo julio el mes con menor registro de lluvias. La precipitación media anual varía entre 1300 mm al oeste y 1900 mm en el este, con un promedio anual de 1700 mm. La temperatura media del aire varía entre 18 y 28 °C, con temperaturas mínimas

medias de 15 °C y una máxima media de 30 °C (Abate 2000).

En Caaguazú y San Pedro, los suelos son Alfisoles derivados de arenisca y en el departamento de Amambay Oxisoles derivados de basalto (López et al. 1995). En Caaguazú, un experimento se condujo en suelo con textura superficial franco arenosa, y otro en suelo con textura franco arcillo arenosa. En San Pedro, ambos experimentos se condujeron en suelos con textura superficial arenosa y en Amambay en suelos con textura superficial franco arcillo arenosa.

En la **Tabla 1** se presenta un resumen con los cultivares de trigo, maíz y soja, y número de años bajo siembra directa en los sitios experimentales.

Tabla 1. Cultivares de trigo, maíz y soja, y número de años bajo siembra directa en los sitios experimentales.

Localidad	Trigo	Maíz	Soja	N° años en Siembra Directa
Cnel. Oviedo	Codetec 104	Hibrido GARRA	Nueva Mercedes 70 R (NM70R)	1
Campo 9	Codetec 104	Hibrido GARRA	Nueva Mercedes 70 R (NM70R)	10
Villa Jardín	IAN 15	-	-	20
Bolas Kua	IAN 15	-	-	20
Yvypé	IAPAR 78	BR 106	Súper precoz guapa	10
Chiriguelo	IAPAR 78	BR 106	Súper precoz guapa	10

El delineamiento experimental fue de bloques completamente al azar con tres repeticiones. Las unidades experimentales tenían 5 m x 6 m, los tratamientos consistieron de cinco dosis de K₂O (0, 25, 50, 75 y 100 kg ha⁻¹), utilizando como fuente el cloruro de potasio. Las dosis se aplicaron antes de la siembra de cada cultivo, distribuyendo al voleo sobre las parcelas experimentales.

Los experimentos fueron conducidos en áreas manejadas en el sistema de siembra directa, donde se cultiva trigo en el ciclo invernal y soja en el ciclo estival, excepto en Coronel Oviedo donde el cultivo anterior fue sorgo. Las siembras se realizaron en las épocas recomendadas para cada región, con el principal objetivo de obtener máxima producción del cultivo. Primeramente fue sembrado trigo el ciclo de invierno de 2009 y luego soja y maíz en el ciclo estival del mismo año.

Antes de la siembra del trigo, toda el área experimental se fertilizó con 60 y 80 kg ha⁻¹ de nitrógeno y P₂O₅, respectivamente, utilizando urea y superfosfato triple. Sobre ésta base se aplicaron dosis crecientes de potasio. Posteriormente, en el ciclo de verano, sobre la misma superficie experimental se sembró soja y maíz, y se

aplicaron las mismas dosis de K₂O. Ambos cultivos recibieron 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ en forma de superfosfato triple, y el maíz recibió además 180 kg ha⁻¹ de N en forma de urea aplicado en forma parcelada, 30 kg ha⁻¹ a la siembra y el restante a los 35 días después de la emergencia.

Antes de la instalación de los experimentos, se extrajeron muestras compuestas de los suelos a una profundidad de 0 a 10 cm y las mismas fueron remitidas para un análisis de rutina en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción.

Para la determinación de potasio, se pesó 4 g de suelo tamizado y secado al aire y se lo transfirió a un tubo de plástico de 50 mL, posteriormente se le agregó 40 mL de una solución de acetato de amonio (C₂H₇NO₂) 1M a pH 7 y se agitó durante 45 minutos a 100 oscilaciones por minuto. Luego las muestras se centrifugaron a 2000 revoluciones por minuto durante 2 minutos. Con ayuda de una pipeta se extrajo 1 mL del sobrenadante, se lo transfirió a un tubo de ensayo de 10 mL y se agregó 9 mL de agua destilada. Por último, se determinó la concentración de potasio en un espectrofotómetro de absorción atómica, a 766,5nm de longitud de onda (Soil Survey Staff, 1996).

El control de insectos, enfermedades y malezas se realizó siguiendo las recomendaciones técnicas para cada cultivo, con el objetivo que los mismos puedan expresar su potencial productivo.

Para la evaluación de rendimiento de grano, se cosecharon en forma manual tres metros lineales de las tres hileras centrales de cada unidad experimental y cada cultivo. Quedando establecida de esta manera el área útil de cada unidad experimental en 1,53 m² para trigo, 3,6 m² para soja y 7,2 m² para maíz. La cosecha de trigo fue realizada en el mes de setiembre de 2009 y las cosechas de maíz y soja en la primera quincena de marzo del 2010. Luego de la cosecha, las muestras fueron desgranadas, limpiadas, secadas al aire y pesadas con una balanza digital de dos decimales. Los rendimientos de grano fueron expresados al trece por ciento de humedad de grano.

En cuanto al análisis estadístico, se aplicaron funciones lineales o polinomiales de segundo grado, para expresar la relación entre las dosis de fertilización potásica y el rendimiento de los cultivos, y la función de Mitscherlich para expresar la relación entre la concentración de potasio en el suelo y el rendimiento relativo de los cultivos.

El rendimiento relativo (RR) fue calculado dividiendo rendimientos obtenidos de la parcela testigo por el

rendimiento máximo obtenido, como puede apreciarse en la siguiente ecuación:

$$RR (\%) = \frac{\text{Rendimiento de la parcela testigo}}{\text{Rendimiento máximo en el experimento}} \times 100 \quad (1)$$

En la ecuación (1), el rendimiento de la parcela testigo corresponde al intercepto en la ecuación de regresión entre las dosis de potasio aplicado y el rendimiento del cultivo. El valor de rendimiento máximo se calculó de diferentes maneras según fuere la respuesta del cultivo a la aplicación del fertilizante. En el caso de respuesta lineal positiva, el rendimiento máximo correspondió al valor estimado por la ecuación de regresión en el máximo de la dosis de potasio aplicado; en caso de respuesta negativa, el rendimiento máximo correspondió al intercepto en la ecuación de regresión. En el caso de respuesta polinomial de segundo grado, se utilizó la técnica de la derivación para determinar el valor de X cuando Y alcanza el punto máximo, luego se reemplazó el valor de X en la función polinomial para determinar el rendimiento máximo.

La función de Mitscherlich tiene la siguiente forma:

$$y = A (1 - 10^{-bx}) \quad (2)$$

Donde "y" representa el rendimiento relativo, "b" es el coeficiente de eficiencia, y "x" es la concentración de potasio en el suelo expresada en $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$.

A partir de la función de Mitscherlich ajustada a los datos se determinó el nivel crítico de potasio en el suelo, que se definió como la proyección del 90% del rendimiento relativo sobre la abscisa, y corresponde a la concentración por debajo de la cual existe una alta probabilidad de respuesta a la fertilización.

Una vez calculado el nivel crítico se establecieron las clases de fertilidad a partir del rendimiento relativo (Raij et al. 1991) o a partir de concentraciones de potasio en el suelo. En este trabajo los límites de las clases de fertilidad se establecieron a partir del rendimiento relativo. El 90% del rendimiento relativo estableció el nivel crítico sobre la abscisa; éste valor dividido por tres permitió establecer fajas equidistantes para las clases "muy baja", "baja" y "media". La clase "alta" se encuentra comprendida entre el nivel crítico y el nivel crítico multiplicado por dos. A partir del límite superior de la clase "alta" inicia la clase "muy alta".

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respuesta de los cultivos a la fertilización potásica

En el departamento de Caaguazú, el mayor rendimiento de trigo se alcanzó en Coronel Oviedo (2.305 kg ha^{-1}) con la aplicación de $66 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ (Figura 1). En Campo 9 se

produjo el acame de plantas de trigo en momento próximo a la cosecha, lo que pudo influir en el rendimiento obtenido. Sin la aplicación de potasio, la producción de trigo fue 1.725 kg ha^{-1} en Campo 9 y 2.044 kg ha^{-1} en Coronel Oviedo. Los coeficientes de determinación (R^2) indican buen ajuste del modelo polinomial a los promedios de rendimiento.

En Villa Jardín (San Pedro) no hubo respuesta a la aplicación de potasio, pero los rendimientos fueron altos, en la parcela donde no se aplicó potasio se registró 3.937 kg ha^{-1} . En Bolas Kua, el mayor rendimiento (2.043 kg ha^{-1}) se alcanzó con la aplicación de $59 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, el coeficiente de determinación (R^2) fue 0,62 indicando dispersión de los datos con respecto al modelo polinomial de segundo grado. La diferencia de respuesta en el rendimiento del cultivo a la aplicación de fertilizante potásico, puede obedecer a que el cultivo anterior al trigo en Villa Jardín fue soja, mientras que en Bolas Kua fue maíz. En un experimento similar en el departamento de Itapúa, Barreto (2008) encontró que la productividad del trigo sobre rastrojos de maíz fue de alrededor de 800 kg ha^{-1} menor que cuando fue sembrado sobre rastrojos de soja.

En el departamento de Amambay, el mayor rendimiento de grano se alcanzó en Chirihuelo (2.181 kg ha^{-1}) con la aplicación de $60 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$. Sin la aplicación de potasio, la producción de trigo fue 1.706 kg ha^{-1} en Chirihuelo y 1.554 kg ha^{-1} en Yvype. Los coeficientes de determinación (R^2) indican buen ajuste del modelo polinomial a los promedios de rendimiento.

En la Figura 2 se presenta la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización potásica. El rendimiento de granos de maíz en la parcela donde no se aplicó potasio en Cnel. Oviedo fue 4.120 kg ha^{-1} y en Campo 9 fue 3.569 kg ha^{-1} . La falta de respuesta a potasio se puede atribuir a los niveles elevados de potasio en el suelo, $0,26$ y $0,39 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ en Cnel. Oviedo y Campo 9, respectivamente. Sfredo (2008) tampoco encontró respuesta a la aplicación de potasio en un experimento realizado en el estado de Paraná, Brasil, cuando en el suelo se encontraban concentraciones de K^+ mayores a $0,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

En Chirihuelo, el rendimiento del maíz en la parcela que no recibió fertilización potásica fue 6.229 kg ha^{-1} , la producción máxima fue de 7.221 kg ha^{-1} de maíz y la misma se alcanzó con la aplicación de $57 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, el coeficiente de determinación (R^2) fue 0,10 indicando alta dispersión de los datos con respecto al modelo de ajuste.

En Yvype hubo una respuesta lineal a la aplicación de dosis crecientes de potasio, aumentando la producción en 12 kg de maíz por cada kilogramo de K_2O aplicado, el rendimiento de la parcela que no recibió fertilización potásica fue 6.664 kg ha^{-1} .

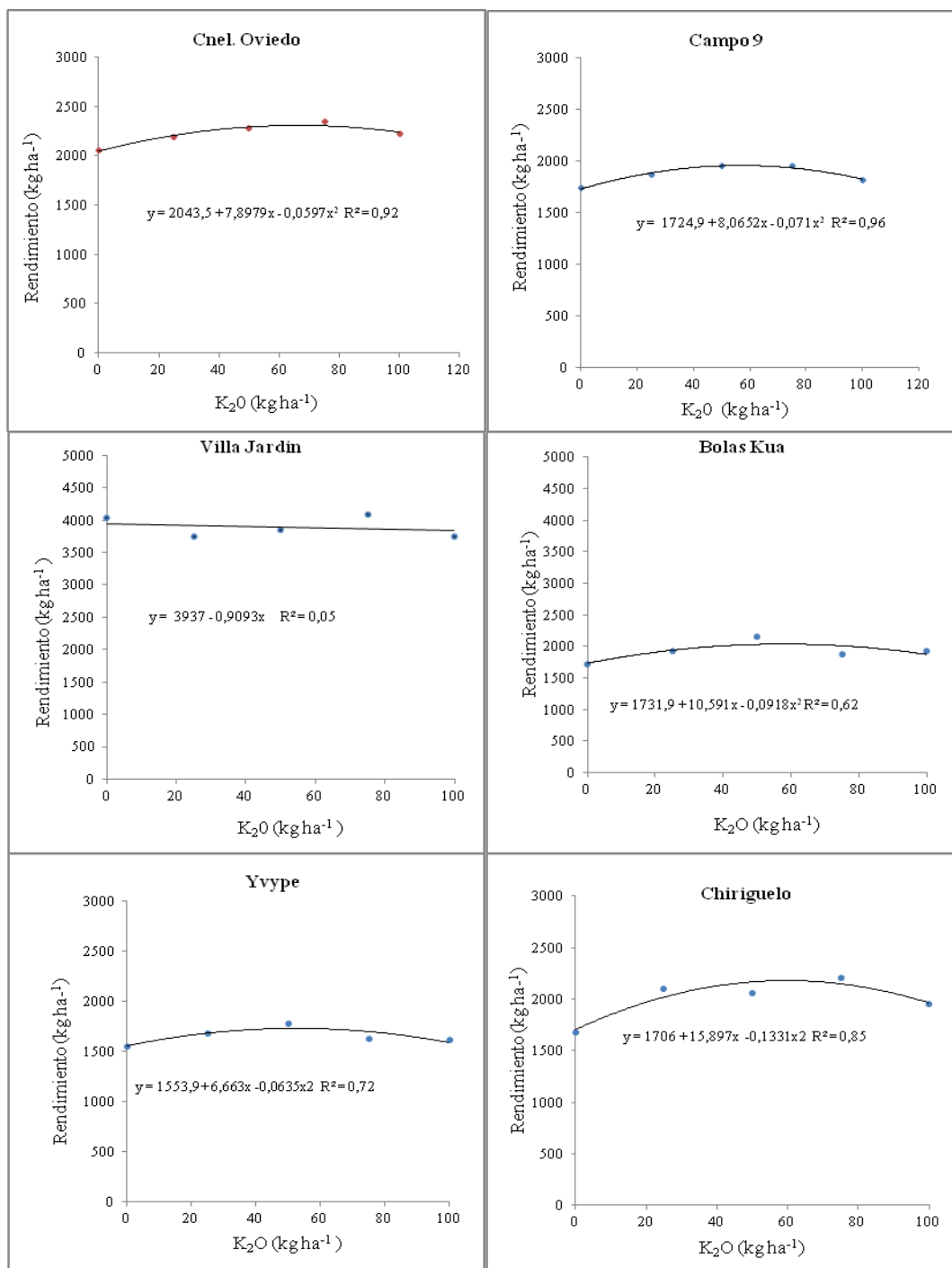


Figura 1. Producción de granos de trigo en función a las dosis de potasio aplicado al suelo en las localidades de Campo 9 y Coronel Oviedo (Caaguazú), Villa Jardín y Bolas Kua (San Pedro) y Yvype y Chiriguelo (Amambay).

En general, las bajas respuestas del cultivo de maíz a la aplicación de fertilización potásica fueron similares a los resultados obtenidos por Wendling (2005) y Barreto (2008), en experimentos sobre sistema de siembra directa. La relativa baja respuesta fue atribuida a altos niveles de potasio en los suelos.

En la **Figura 3** se presenta la respuesta del cultivo de soja a la fertilización potásica. En el departamento de

Caaguazú se observa que no hubo respuesta a la aplicación de potasio en Coronel Oviedo pero ocurrió lo contrario en Campo 9. En Coronel Oviedo, los rendimientos fueron muy bajos y esto se debió a que el cultivo sufrió un ataque severo de chinches. En Campo 9, el rendimiento de granos de soja en la parcela que no recibió fertilización potásica fue 2.779 kg ha⁻¹, el rendimiento máximo fue 3.137 kg ha⁻¹ con la aplicación de 94 kg K₂O ha⁻¹.

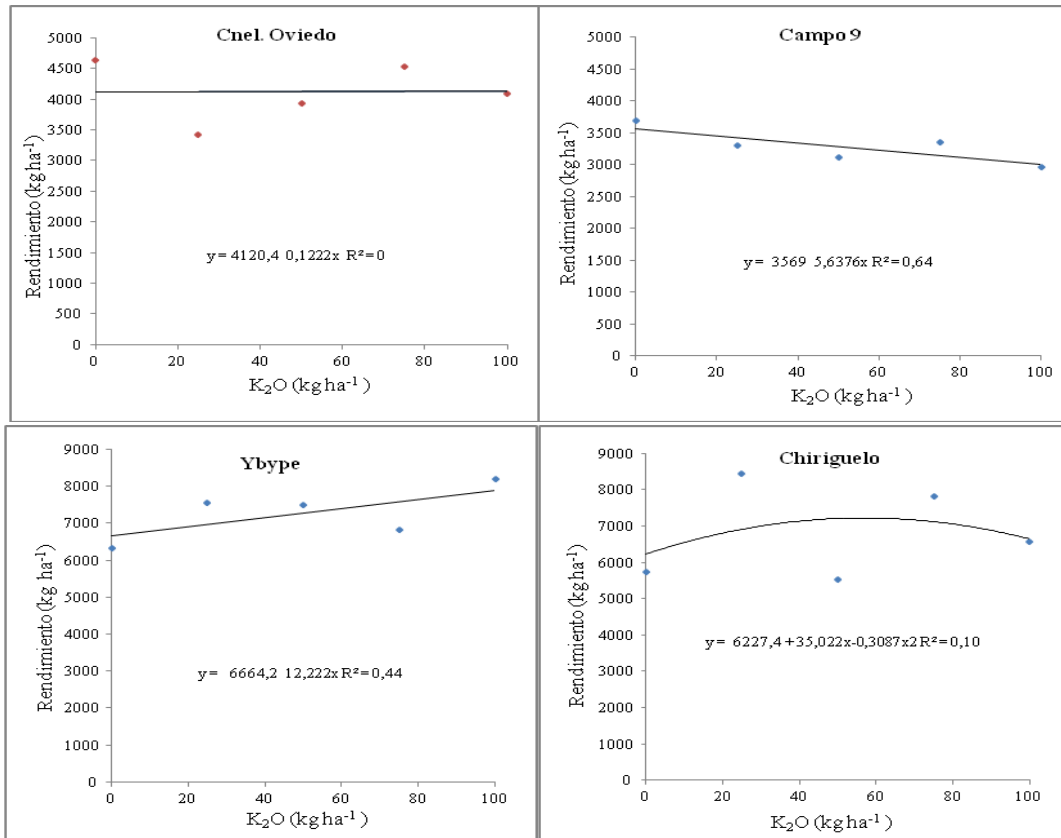


Figura 2. Producción de granos de maíz en función a las dosis de potasio aplicado al suelo en las localidades de Campo 9 y Coronel Oviedo (Caaguazú) y Yype y Chirihuelo (Amambay).

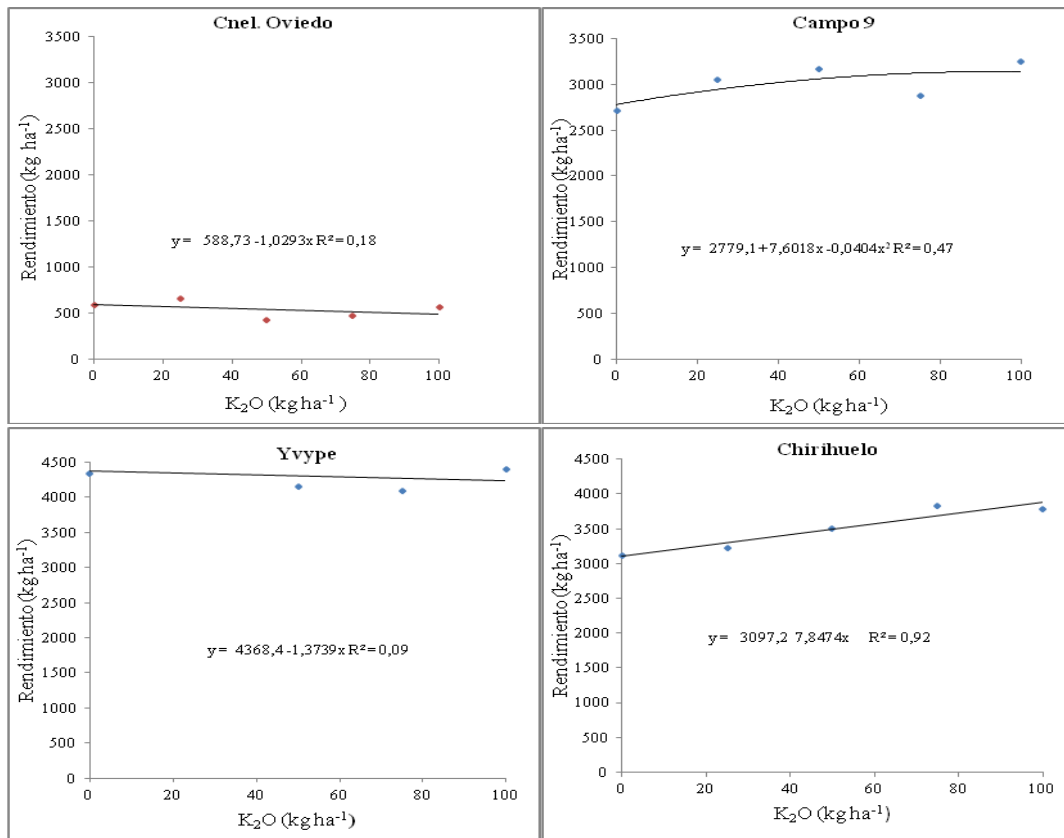


Figura 3. Producción de granos de soja en función a las dosis de potasio aplicado al suelo en las localidades de Campo 9 y Coronel Oviedo (Caaguazú) y Yype y Chirihuelo (Amambay).

En el departamento de Amambay se observa una respuesta lineal en Chirihuelo, aumentando el rendimiento de la soja en 8 kg ha^{-1} por cada kilogramo de K_2O agregado, el rendimiento de la parcela que no recibió fertilización potásica fue 3.097 kg ha^{-1} , el coeficiente de determinación (R^2) indica poca dispersión de las medias de rendimiento con respecto a la función lineal. No hubo respuesta a la aplicación de fertilización potásica en Yvyte.

Determinación del nivel crítico de potasio

La **Figura 4** muestra la relación entre el rendimiento relativo de los cultivos y el K^+ intercambiable en el suelo. La ecuación de Mitscherlich fue la que mejor se ajustó a los resultados experimentales; esta ecuación fue descrita por Raij (1991). Se observa el nivel crítico de potasio en el suelo, definido como la concentración por debajo de la cual existe una alta probabilidad de respuesta a la fertilización. El nivel crítico fue calculado en $0,17 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Cuando menor sea la concentración de K^+ en el suelo en relación al nivel crítico establecido, mayor será la probabilidad de respuesta del cultivo a la fertilización.

Independientemente a la clase textural, en trabajos de calibración realizados en Paraguay, para varios cultivos donde los suelos fueron laboreados, se encontró que el nivel crítico para potasio fue de $0,12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Fatecha 1999). Por otro lado, Wendling (2005) y Barreto (2008), en estudios de calibración de análisis de suelo para potasio, en cultivos de trigo, soja y maíz cultivados en sistema de siembra directa en los Departamentos de Misiones, Itapúa, Alto Paraná y Amambay, calcularon un nivel crítico de 75 mg dm^{-3} , lo que equivale aproximadamente a $0,16 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (considerando densidad aparente igual a 1.200 kg m^{-3}), muy similar al nivel crítico calculado en éste artículo para los Departamentos de Caaguazú, San Pedro y Amambay.

Determinación de clases de fertilidad

La determinación de clases de fertilidad (Tabla 2) permite definir la estrategia de fertilización potásica. Cuando la fertilidad del suelo es alta se puede aplicar una dosis de potasio que reponga la extracción por cosechas; cuando la fertilidad es media se puede aplicar una dosis que mantenga los niveles actuales en el suelo, es decir, reponer la extracción por cosechas y las pérdidas que ocurren durante el ciclo del cultivo; y cuando la fertilidad del suelo es baja o muy baja, es necesario aplicar una mayor dosis de potasio.

Integración de los datos de ésta investigación con los de Wendling (2005) y Barreto (2008)

La **Figura 5** integra los datos de la Figura 4 con los de Wendling (2005) y Barreto (2008). Para el efecto, se

calcularon las concentraciones de potasio en el suelo de manera a expresarlas en mg dm^{-3} , considerando una densidad aparente de 1.260 kg m^{-3} para los suelos de Cnel. Oviedo y 1.090 kg m^{-3} para los demás; estas densidades fueron determinadas en laboratorio en muestras de tierra fina seca al aire.

En la investigación de Wendling (2005) y Barreto (2008), el nivel crítico de K en el suelo fue 75 mg dm^{-3} , el coeficiente "b" de la ecuación de Mitscherlich fue 0,0139 y el coeficiente de determinación (R^2) fue 0,77. Como se observa en la **Figura 5**, al integrar los datos de las tres investigaciones, el nivel crítico de K en el suelo fue muy similar ($73,5 \text{ mg dm}^{-3}$), el coeficiente "b" de la ecuación de Mitscherlich fue 0,0136 y el coeficiente de determinación (R^2) fue 0,70. Es decir, los datos levantados durante la experimentación realizada en Caaguazú, San Pedro y Amambay contribuyeron a fortalecer la base de datos de calibración de K y aportan mayor evidencia que el nivel crítico de potasio en suelos bajo siembra directa se encuentra alrededor de 75 mg dm^{-3} , o su equivalente: $0,16 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Es importante señalar que en las investigaciones de Wendling (2005) y Barreto (2008) se extrajo el K intercambiable con la solución Mehlich-1 y se determinó su concentración con un fotómetro de llamas; sin embargo, en ésta investigación se extrajo K intercambiable con acetato de amonio 1 M a pH 7 y se determinó su concentración con un espectrofotómetro de absorción atómica.

Al comparar los extractantes acetato de amonio y Mehlich 1, Ramírez et al. (1989) encontraron que ambos son igualmente eficientes para la predicción de los requerimientos de K para el sorgo, aunque con Mehlich 1 el nivel crítico fue ligeramente más bajo ($0,02 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) que con Acetato de amonio.

Tabla 2. Clases de fertilidad de potasio en el suelo, extraído por el método de acetato de amonio 1M pH 7, en suelos de Caaguazú, San Pedro y Amambay.

Clase de Fertilidad	Concentración de K en el suelo ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)
Muy Baja	$\leq 0,06$
Baja	0,07 – 0,12
Media	0,13 – 0,17
Alta	0,18 – 0,34
Muy Alta	$>0,34$

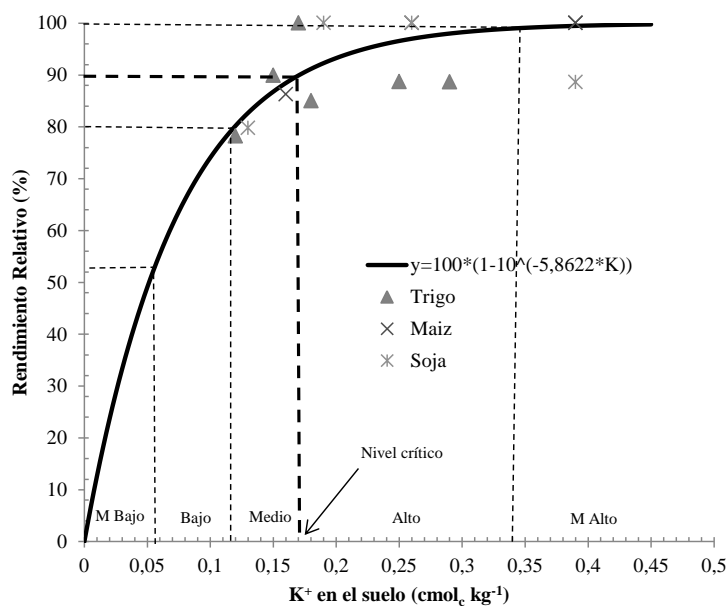


Figura 4. Relación entre el Rendimiento Relativo de trigo, maíz y soja con la concentración de potasio intercambiable (extraído con acetato de amonio 1M a pH 7) en la camada superficial del suelo (0 –10 cm).

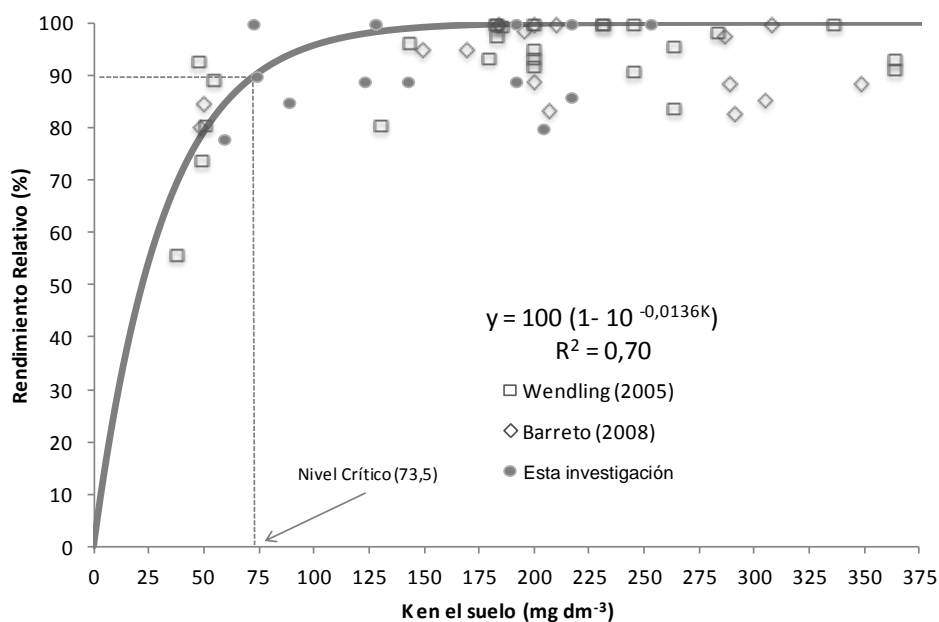


Figura 5. Relación entre el rendimiento relativo de trigo, soja y maíz, y la concentración de potasio en la camada superficial del suelo (0 – 10 cm). Departamentos de Alto Paraná, Itapúa, Amambay, Misiones y Caaguazú.

CONCLUSIONES

Las mayores respuestas ocurren en el cultivo de trigo, seguido del maíz y la soja. El grado de respuesta a la fertilización potásica está inversamente relacionado con la concentración de potasio en el suelo.

El nivel crítico, definido como la concentración de potasio en el suelo por debajo de la cual la probabilidad de respuesta a la aplicación de fertilizantes aumenta, es $0,16 cmol_c kg^{-1}$.

Las clases de fertilidad de potasio en el suelo, para los departamentos de Caaguazú, San Pedro y Amambay, se establecen como sigue: muy baja: $\leq 0,06 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; baja: $0,07 - 0,12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; media: $0,13 - 0,17 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; alta: $0,18 - 0,34 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y muy alta: $>0,34 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

AGRADECIMIENTO

Al Instituto de Biotecnología Agrícola (INBIO) por el financiamiento que hizo posible esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Abate, J. 2000. La situación ambiental del Paraguay (en línea). Asunción, PY. Consultado 24 may. 2011. Disponible en www.paraguay.com.py/htm.
- Barreto, U.F. 2008. Recomendações de fertilização fosfatada e potássica para as principais culturas de grãos sob sistema plantio directo no Paraguai. Tesis de Doctorado. Santa Maria, BR, Universidade Federal de Santa Maria.
- Fatecha, A.1999. Guía para la fertilización de cultivos anuales y perennes de la región oriental del Paraguay. Caacupé, PY, IAN. (Boletín técnico; n° 1).
- Fatecha, D.A. 2004. Clasificación de la fertilidad, acidez activa (pH) y necesidad de cal agrícola de los suelos de la región oriental del Paraguay. Tesis de graduación. San Lorenzo, PY, FCA-UNA.
- Kirkman, J.H., A. Basker, A. Surapaneni y A.N. MacGregor. 1994. Potassium in the soils of New Zealand- A review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 37:2, 207-227.
- López, O.; Gonzalez, E; Llamas, P.A; Molinas, A.S; Franco, E.S.; García, S; Ríos, E.O. 1995. Mapa de Reconocimiento de Suelos de la Región Oriental. Paraguay, Banco Mundial. DMA.Esc.1500.000. color
- Raj, B.1991. Fertilidade de solo e educação. São Paulo, BR: Ceres, Potafos 343 p.
- Ramírez, R; Rodríguez, T.; Millán, A.; Hernández, C; Guzmán, E.; Tenías, J. 1989. Relación entre el requerimiento de fertilizante potásico por el sorgo y el potasio asimilable del suelo. *Agronomía Tropical*. 39 (1-3): 179-193.
- Russell, E.W. 1988. Russell's soil conditions and plant growth. 11a ed. Ed. A. Wild. Longman Group, Reino Unido. 991 p.
- Sfredo G.J. 2008. Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral (en línea). Londrina BR. EMBRAPA. Consultado 24 de may. 2011. Disponible en http://livraria.sct.embrapa.br/liv_ressumos/pdf/000828220.pdf.
- Soil Survey Staff. 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual, USDA-NRCS, Soil Survey Investigations Report N° 42. National Soil Survey Center, Lincoln, NE. EUA.
- Wendling, A. 2005. Recomendação de nitrogênio e potássio para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. Santa Maria, BR. Tesis de Maestría, Universidade Federal de Santa Maria. 124 p.