

Evolución de la variabilidad espacial de los atributos químicos de un Oxisol con aplicación de insumos a tasa variada

Evolution of the spatial variability of chemical attributes of an Oxisol with variable-rate input application

Enrique Oswin Hahn Villalba^{1,2*}, Luís Ramiro Samaniego Montiel^{1,2}
y Adriana Carolina Arnold Pérez¹

¹ Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, sede Itapúa. Hohenau, Paraguay.

² Consultora Sustentap. Hohenau, Paraguay.

* Autor para correspondencia (ehahn@sustentap.com.py)

Recibido: 13/02/2013; Aceptado: 21/05/2014.

RESUMEN

La corrección de suelo a tasa variada de insumos constituye una técnica para disminuir la variabilidad espacial de propiedades del suelo que necesita ser mayormente investigada. El objetivo de este trabajo fue estudiar la evolución de la variabilidad espacial del suelo con aplicaciones de fertilizantes y cal agrícola a tasa variada. El área experimental se ubica en Alto Verá, Itapúa, Paraguay, en una superficie de 20,26 hectáreas. En 2010 se realizó la primera toma de muestras. Se elaboraron mapas para Fósforo (P), Potasio (K), Aluminio (Al), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg). Posteriormente se generaron recomendaciones de aplicación de Superfosfato Triple con dosis de 0, 60 y 130 kg ha⁻¹, Cloruro de Potasio con dosis de 0, 100 y 180 kg ha⁻¹ y cal agrícola con dosis de 600, 1100 y 1600 kg ha⁻¹. Al final del 2011, luego de tres cultivos en sucesión, para medir la evolución de la fertilidad, fue realizado en los mismos puntos un nuevo muestreo de suelo y un diagnóstico con mapas. Un aspecto importante obtenido con las aplicaciones a tasa variada de P fue que se logró disminuir el coeficiente de variación de la parcela, de 20,7% a 14,6%. La concentración de K se elevó a un nivel "alto" en gran parte de la parcela y se consiguió disminuir la concentración de Al en el suelo y aumentar la concentración de Ca y Mg. Se concluyó que la aplicación de fertilizantes y cal agrícola a tasa variada reduce la variabilidad espacial de P, K, Ca y Mg.

Palabras clave: Agricultura de precisión, fertilidad de suelos, variabilidad espacial.

ABSTRACT

The correction of soil at variable rate is a technique to lower the spatial variability of soil properties that need further investigation. The aim of this work was to study the evolution of the spatial variability of the soil with applications of fertilizer and lime at variable rate. The experimental area is located in Alto Verá, Itapúa, Paraguay, in an area of 20.26 hectares. In 2010 the first soil sampling was realized. Maps were made for Phosphorus (P), Potassium (K), Aluminium (Al), Calcium (Ca) and Magnesium (Mg). Then, recommendations were generated for application of triple superphosphate with dose of 0, 60 and 130 kg ha⁻¹, Potassium Chloride with dose of 0, 100 and 180 kg ha⁻¹ and for agricultural lime dose of 600, 1100 and 1600 kg ha⁻¹. At the end of 2011, after three crops in succession, in the same points a new soil sampling and a diagnosis by maps to measure the evolution of the fertility was realized. An important aspect of the applications of P at variable rate was that the coefficient of variation decreased from 20.7% to 14.6%. The K concentration rose up to a "high" level in much of the plot and Al concentration in the soil decreased while the average concentration of Ca and Mg increased. It was concluded that the application of fertilizer and lime at variable rate reduced the spatial variability of P, K, Ca and Mg.

Key words: Precision Agriculture, soil fertility, spatial variability.

INTRODUCCIÓN

El suelo es naturalmente heterogéneo, su variabilidad horizontal y vertical dependen de los factores de su formación y el manejo que reciben los mismos (Souza et al. 2007). Hahn (2010) verificó que en suelos agrícolas del departamento de Itapúa existe una notoria variabilidad en la concentración del Fósforo (P), con Coeficientes de Variación (CV) altos, entre 30 y 40%; asimismo, la concentración del Potasio (K) también mostró variabilidad, con CV entre 20 y 35%.

Prácticas de manejo modernas, como la corrección de suelo a tasa variada de insumos, en respuesta a análisis químicos por grillas de muestreo y localización de insumos con sistema de posicionamiento global, deben ser investigadas en la búsqueda de disminuir la variabilidad espacial y mejorar la fertilidad de los suelos. Mediante la interpretación de los mapas de diagnóstico de nutrientes del suelo, es posible realizar aplicaciones a tasa variada de acuerdo con la concentración de un nutriente en el suelo, las necesidades del cultivo y la expectativa de producción del agricultor.

El término Agricultura de Precisión (AP) se refiere a un conjunto de tecnologías y procedimientos utilizados para que los sistemas de producción agrícolas sean optimizados, teniendo como principal objetivo el gerenciamiento de la variabilidad espacial de la producción y de los factores relacionados a ella (Molin 2000).

Según Malavolta (2007), es fundamental el uso de tecnologías, como la AP, con el fin de proporcionar un aumento en la eficiencia del uso de los fertilizantes, ya que algunos de ellos están con sus reservas en niveles

muy bajos o deficientes. Las aplicaciones a tasa variada de fertilizantes busca colocar en el local correcto (espacio) y en el momento adecuado (tiempo), las cantidades de insumos necesarios (Dobermann y Ping 2004). De esta forma, se busca ubicar los insumos de producción reduciendo los costos, aumentando la productividad y disminuyendo los riesgos de contaminación ambiental. La infertilidad de los suelos ácidos está relacionada a factores como altos tenores de Aluminio intercambiable (Al) y niveles deficientes de Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) principalmente en Oxisoles (Bissani et al. 2004). Hahn (2011) consiguió con la elaboración de mapas de nutrientes del suelo una reducción de costos en el manejo sitio específico (dosis variable) de la aplicación de cal agrícola, en comparación al costo generado por la aplicación de dosis fijas.

Existe escasa información sobre la variabilidad espacial de atributos químicos de suelos manejados bajo siembra directa (SD), y esta información es muy importante para generar recomendaciones de correctivos de suelos y fertilizantes. El objetivo del presente trabajo fue verificar la evolución de la variabilidad espacial de algunos atributos químicos del suelo con la aplicación de fertilizantes y correctivos a tasa variada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área utilizada para el estudio fue una parcela agrícola de 20,26 hectáreas, destinada a la producción comercial de granos y manejada por más de 15 años bajo el sistema de siembra directa, ubicada en el Distrito de Alto Verá, Itapúa, Paraguay (Figura 1) en un oxisol. En el año 2010, durante la entre zafra, se llevó a cabo la primera toma de muestras de suelos en la parcela, que sirvió para el diagnóstico de variabilidad de la fertilidad.

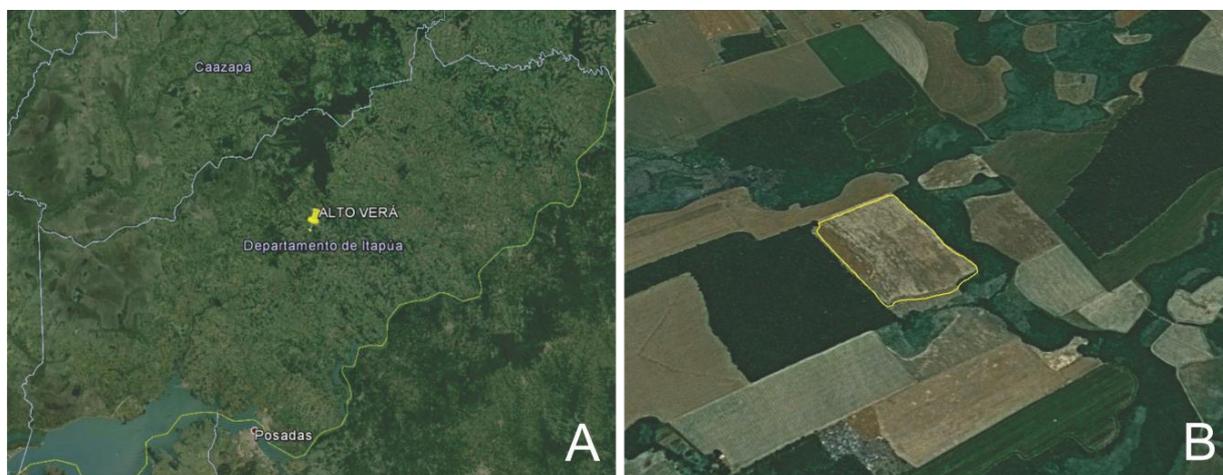


Figura 1. Mapa del departamento de Itapúa, Paraguay (A). Mapa de localización de la parcela en estudio (B).

Las muestras de suelo fueron colectadas en una profundidad de 10 cm, compuesta de diez submuestras, con el auxilio de una pala. Las cuales fueron extraídas de la siguiente forma: una en el centro y las restantes en un radio de 3 metros en forma circular, siguiendo la metodología de muestreo descrita por la Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004) para el sistema de SD manejado con herramientas de AP. Para el muestreo de suelo se realizaron grillas georeferenciadas con el Software CR Campeiro 7.0 (Giotto et al. 2004). Cada grilla estuvo dividida por cuadrículas de una hectárea (100 m x 100 m) y cada cuadrícula representó un punto de muestreo de suelo (Figura 2).

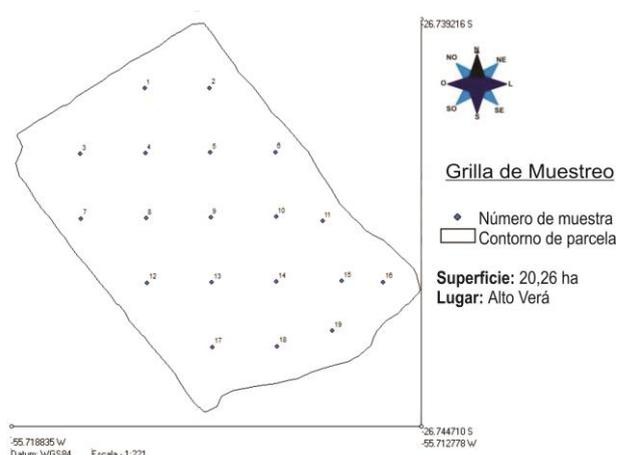


Figura 2. Contorno de la parcela con los puntos de muestreo.

Totalizando así diecinueve muestras colectadas, las cuales fueron almacenadas en bolsitas plásticas, identificadas y enviadas al laboratorio. Se utilizó metodología de análisis laboratorial descrita por Tedesco et al. (1995) con extractores Mehlich-1 (P y K), y cloruro de potasio (Ca, Mg y Al). Los datos obtenidos de los análisis de suelo fueron interpolados y espacializados, utilizando el inverso del cuadrado de la distancia, como soporte para estructurar el modelo digital de los mapas de la parcela usando el sistema computacional Campeiro 7.0 desarrollado para AP. Fueron realizados mapas de fertilidad de suelos para P, K, Al, Ca y Mg. Posteriormente se generaron las recomendaciones de aplicación de Superfosfato Triple (SFT) con dosis de 0, 60 y 130 kg ha⁻¹ y Cloruro de Potasio (KCl) con dosis 0, 100 y 180 kg ha⁻¹ a tasa variada. Para la aplicación de cal agrícola fue realizado el mapa de Saturación de Bases (V) de la parcela, por el cual fue basado la prescripción a tasa variada con dosis de 600, 1100 y 1600 kg ha⁻¹ de Cal Agrícola. Las fertilizaciones fosfatadas, potásica y de cal

agrícola fueron realizadas antes de la implantación del primer cultivo, mediante la utilización de un aplicador centrífugo de arrastre, equipado con un kit para tasa variada.

Al final del año 2011 y luego de tres cultivos en sucesión (trigo/soja/canola), se determinó la evolución de la fertilidad con las aplicaciones a tasa variada de insumos y en los mismos puntos se realizó un nuevo muestreo de suelo y un diagnóstico con mapas. Para la clasificación de P y K en el suelo, se utilizaron los rangos provenientes de los tenores críticos calibrados para suelos manejados bajo SD de la Región Oriental del Paraguay por Hahn (2008), Barreto (2008), Cubilla (2005), Wendling (2005). Ya para la clasificación de Al, Ca y Mg fueron adaptados valores de interpretación de la Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004).

Las recomendaciones de aplicación a tasa variada de SFT y KCl fueron basadas en dosis usadas por el programa "Agricultura de Precisión de la Cooperativa Colonias Unidas". Para el modelo digital de terreno los niveles se expresan en colores, siendo el verde oscuro (nivel muy alto), verde claro (nivel alto), amarillo (nivel medio), naranja (bajo), rojo (muy bajo) y el blanco corresponde a áreas que no llevaron ninguna dosis.

RESULTADOS

La Figura 3-1 muestra que predominó un nivel "medio" para el P, entre 8 y 12 mg dm⁻³ (15,74 hectáreas), con un área de nivel "bajo", entre 4 y 8 mg dm⁻³ (1,36 hectáreas). Con la prescripción realizada y aplicaciones a tasa variada en forma localizada en dosis de 0, 60 y 130 kg ha⁻¹ de SFT (Figura 3-2), se consiguió un aumento mínimo de la fertilidad de P, ya que el nivel "bajo" se redujo a 0,97 hectáreas y se aumentaron los niveles "medios" (16,68 hectáreas) (Figura 3-3).

Un aspecto importante obtenido con las aplicaciones a tasa variada de P fue que se logró disminuir el CV de la parcela, que inicialmente era de 20,7% y al finalizar el estudio en el año 2011 de 14,63%. Reduciendo la heterogeneidad de la concentración del nutriente en la parcela (Tabla 1).

Al diagnosticar el K en el suelo, se identificó nivel bajo del nutriente en 9,4 hectáreas y nivel medio en 10,51 hectáreas (Figura 4-1). Con la prescripción realizada y las aplicaciones a tasa variada en dosis de 0, 100 y 180 kg ha⁻¹ de KCl (Figura 4-2), se elevó el nivel de la fertilidad de

suelos a “alto” en gran parte de la parcela (Figura 4-3).

Los valores mínimo y máximo inicial del tenor de K fueron 0,09 y 0,21 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, y los

valores posteriores a las correcciones con tasa variada fueron de 0,17 y 0,40 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ indicando una alta evolución de la fertilidad en K. El CV disminuyó de 23,52% a 21,93% (Tabla 1).

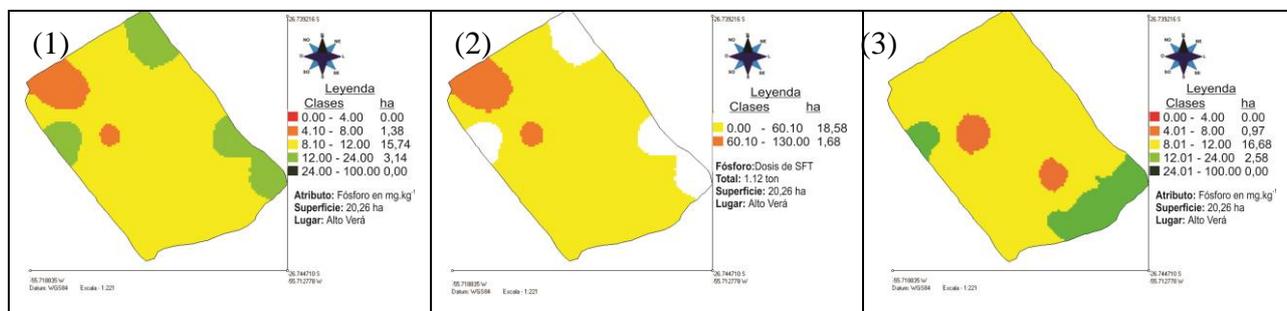


Figura 3. Diagnóstico inicial de P en el suelo al inicio del estudio (1), Mapa de aplicación de SFT (2) y Diagnóstico final de P en el suelo pos aplicación del fertilizante a tasa variada (3). Alto Verá, Itapúa (2010-2011).

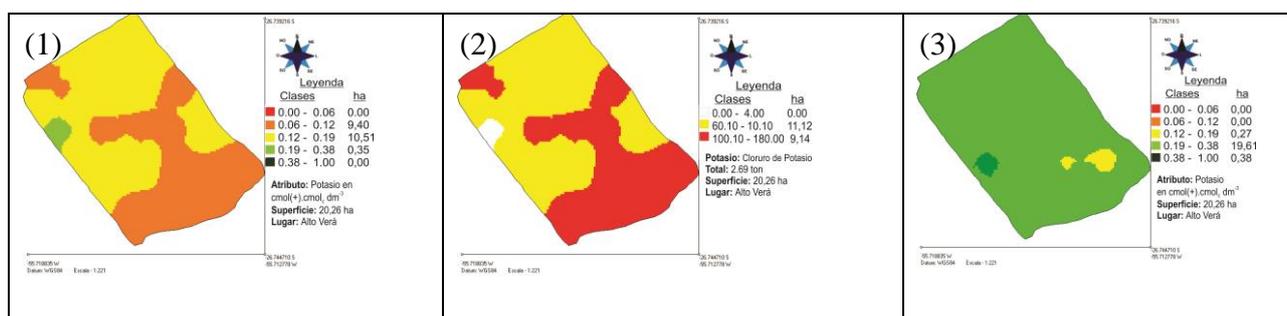


Figura 4. Diagnóstico inicial de K en el suelo al inicio del estudio (1), Mapa de aplicación de KCl a tasa variada (2) y Diagnóstico final de K en el suelo pos aplicación del fertilizante a tasa variada (3). Alto Verá, Itapúa (2010-2011).

Tabla 1. Indicadores de la evolución de la variabilidad espacial en P disponible y K intercambiable con aplicación de fertilizantes a tasa variada. Alto Verá, Itapúa (2010-2011).

Fósforo en el Suelo	2010	2011	Potasio en el Suelo	2010	2011
Puntos de muestreo	19	19	Puntos de muestreo	19	19
Media (mg dm^{-3})	10,70	10,10	Media ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	0,13	0,27
Desvío Padrón (mg dm^{-3})	2,20	2,17	Desvío Padrón ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	0,03	0,06
Valor Mínimo (mg dm^{-3})	5,75	6,16	Valor Mínimo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	0,09	0,17
Valor Máximo (mg dm^{-3})	14,25	14,11	Valor Máximo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	0,21	0,40
CV (%)	20,70	14,63	CV (%)	23,52	21,93

La aplicación de Cal agrícola se encuentra representada en la Figura 5 (A) con un mapa de dosis variable de 600 (verde), 1100 (amarillo) y 1600 (rojo) kg ha^{-1} . El CV no tuvo variación pos aplicación de Cal a tasa variada (Tabla 2). Con la Cal Agrícola aplicada se aumentó de 3,41 a 9,28 hectáreas el nivel “muy bajo” de Al en el suelo observado en (B1) y (B2) de la Figura 5. También se

redujo el CV de Ca en 2,6% y del Mg en 10,3%. Para Ca y Mg fueron observados aumento de la superficie de nivel “alto” de fertilidad (C2) y (D2).

Con el uso de tasa variada de cal agrícola se consiguió disminuir la media de Al en el suelo y aumentar la media de Ca y Mg en la parcela estudiada (Tabla 2).

Tabla 2. Indicadores de la evolución de la variabilidad espacial de Al, Ca y Mg con aplicación de Cal Agrícola a tasa variada. Alto Verá, Itapúa (2010-2011).

Atributos Estadísticos	Aluminio		Calcio		Magnesio	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011
Puntos de muestreo	19	19	19	19	19	19
Media (cmol _c dm ⁻³)	0,30	0,27	4,46	4,83	1,62	2,10
Desvío Padrón (cmol _c dm ⁻³)	0,07	0,13	0,66	0,58	0,39	0,29
Valor Mínimo (cmol _c dm ⁻³)	0,20	0,10	3,45	3,89	1,02	1,57
Valor Máximo (cmol _c dm ⁻³)	0,41	0,37	5,91	6,53	2,60	2,96
CV (%)	22,2	22,5	14,7	12,1	24,3	14,0

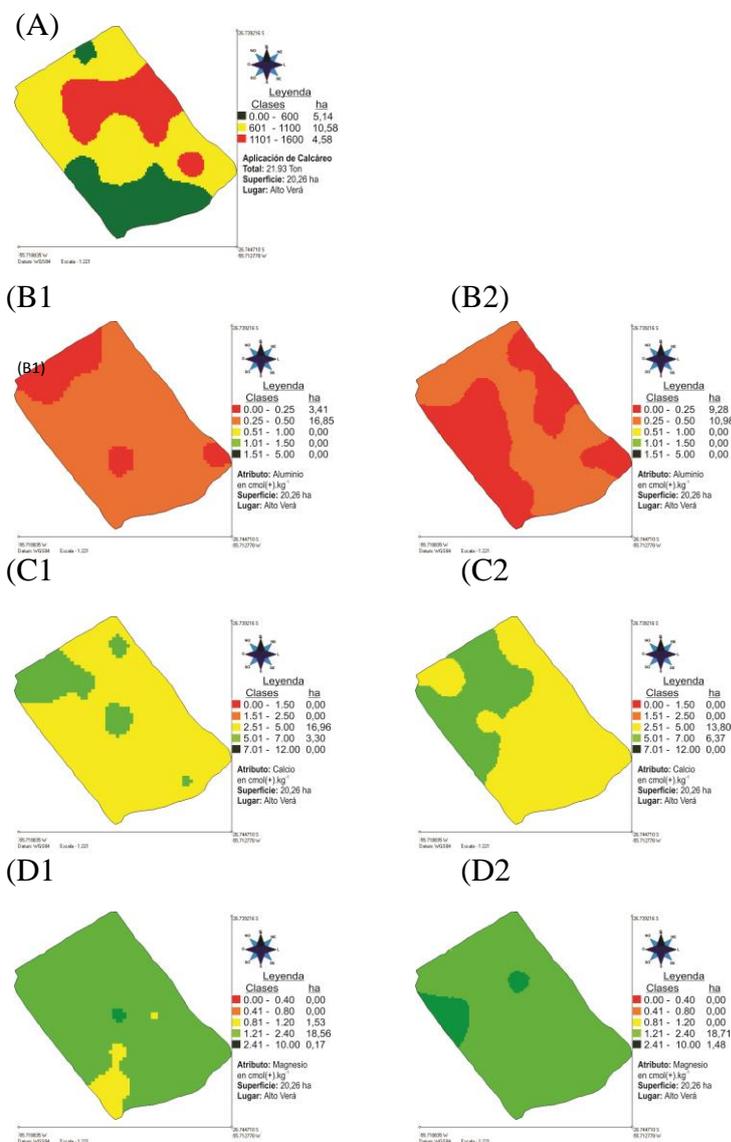


Figura 5. Aplicación de Tasa Variada de Cal Agrícola (A), Diagnóstico inicial pre tasa variada (B1) y final pos tasa variada de Al (B2) en cmol_c dm⁻³. Diagnóstico inicial (C1) y final de Ca (C2) y diagnóstico inicial (D1) y final de Mg (D2). Alto Verá, Itapúa (2010-2011).

DISCUSIÓN

El P y el K son los atributos del suelo que presentan una mayor variabilidad (Pontelli 2006; Machado et al. 2007). Para Schlindwein y Anghinoni (2000), el CV observado para el P es causado por factores naturales de formación de los suelos, como su baja concentración natural en los Oxisoles y consecuentemente un alto poder tampón que, aliado a su dinámica de baja movilidad, pueden resultar en una alta variabilidad. Amado et al. (2009) encontraron en el Sur del Brasil mayores dificultades para obtener una alta fertilidad en P cuando comparadas al K en sus parcelas trabajadas. Para obtener una fertilidad alta de P en la mayoría de las situaciones se necesitaron hasta 3 aplicaciones a tasa variada, sin embargo para el K por lo general con una aplicación a tasa variada se obtuvieron niveles altos del nutriente en el suelo. Samaniego (2011) en un estudio con duración de cuatro años en áreas trabajadas con herramientas de AP, obtuvo una disminución de los valores de CV en P de 27,55% que se encontraban inicialmente, a 20,59%. Ya para el K la reducción fue más notoria, siendo que el CV disminuyó de 25,05% a 14,06%.

Realizando una comparación de la variación de los CV de los años 2010 y 2011 en los nutrientes P y K, se comprueba que hubo una gran reducción en las amplitudes de los CV, siendo evidenciada la eficiencia de la utilización de aplicaciones a tasa variada de fertilizantes. También se consiguió elevar las concentraciones de P y K a los niveles “medio” y “alto” respectivamente, así como, disminuir la amplitud de los valores de CV.

Bissani et al. (2004) explican la importancia de disminuir los niveles de Al en el suelo para evitar problemas de desarrollo radicular e inhibición de absorción por las raíces de nutrientes esenciales como P, Ca y Mg. También verifican que en Oxisoles la aplicación de calcáreo para disminuir la acidez debe ser una constante para obtener disponibilidad alta de Ca y Mg y altas productividades, principalmente en leguminosas.

CONCLUSIONES

La aplicación de correctivos a tasa variada redujo la variabilidad existente en P y K de la parcela en estudio. Se verificó un poder tampón o buffer mayor para el P que para el K con las dosis aplicadas y se alcanzó una alta fertilidad de K en las zonas que inicialmente presentaban deficiencia del nutriente.

La tasa variada de Cal Agrícola aplicada generó una reducción de la variabilidad espacial en Ca y Mg. Se disminuyeron los niveles de Al y se incrementaron los niveles de Ca y Mg en la parcela analizada por sitio específico.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Biotecnología Agrícola (INBIO) por el financiamiento de este proyecto de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amado, T; Hahn, E; Teixeira, T; Samaniego, R. 2009. Situación actual de la agricultura de precisión en el Sur del Brasil. *In* Primer Simposio Paraguayo de Manejo y Conservación de Suelos. Memoria. Obligado, PY. p. 71-74.
- Barreto, UF. 2008. *Recomendações de fertilização fosfatada e potássica para as principais culturas de graos sob sistema plantio direto no Paraguai*. Teses de Doctorado em Engenharia Agrícola. Santa María, BR, Universidade Federal de Santa Maria. 223 p.
- Bissani, CA; Gianello, C; Tedesco, MJ; Camargo, FAO. 2004. *Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas*. Porto Alegre, Gênese. 328 p.
- Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. 2004. *Manual de recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. Porto Alegre, SBCS-Núcleo Regional Sul. 394 p.
- Cubilla, MM. 2005. *Calibração visando recomendação de fertilização fosfatada para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai*. Dissertação de Mestrado em Ciências do Solo. Santa María, BR, Universidade Federal de Santa Maria. 160 p.
- Dobermann, A; Ping, JL. 2004. *Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps*. *Agronomy Journal* Madison 96(1):285-297.
- Giotto, E, Robaina, AD, Sulzbach, L. 2004. *A Agricultura de Precisão com o Sistema CR-Campeiro 5*. Santa María, Universidade Federal de Santa Maria. 330. p.

- Hahn, E. 2011. Avances en manejo sitio específico en el Paraguay: informaciones agronómicas, International Plant Nutrition Institute (IPNI). ConoSur 4:1-6.
- Hahn, E. 2010. Interpretación y diagnóstico de niveles de fertilidad de suelos agrícolas sobre siembra directa en la zona de influencia de la Cooperativa Colonias Unidas (Paraguay), International Plant Nutrition Institute (IPNI). ConoSur 1:5-8.
- Hahn, E. 2008. Recomendação de Nitrogênio, Fósforo e Potássio para girassol sob sistema plantio direto no Paraguai. Dissertação de Mestrado em Ciências do Solo, Santa María, BR. Universidade Federal de Santa Maria. 82 p.
- Machado, LO; Lana, AMQ; Lana, RMQ; Guimarães, EC; Ferreira, CV. 2007. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa 31:591-599.
- Malavolta, TE. 2007. A agricultura diante da escassez do fósforo. Revista Fórum São Paulo 56:161-172.
- Molin, JP. 2000. Geração e interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão. In Borém, A; Giúdice, MP; Queiroz, DM; Mantovani, EC; Ferreira, LR; Valle, FXR; Gomide, RL. Agricultura de precisão. Visoça, BR, Universidade Federal de Visoça. p. 237-257.
- Pontelli, CB. 2006. Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade as culturas utilizando as ferramentas de agricultura de precisão. Dissertação de Mestrado em Ciências do Solo. Santa María, BR, Universidade Federal de Santa Maria. 112 p.
- Samaniego LR. 2011. Balanço e evolução temporal de teores de fósforo e potássio no solo em áreas manejadas com agricultura de precisão. Dissertação de Mestrado em Ciências do Solo. Santa María, BR, Universidade Federal de Santa Maria. 127 p.
- Schindwein, JA; Anghinoni, I. 2000. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. Revista Ciência Rural Santa María 30:611-617.
- Souza, ZM; Barbieri, DM; Marques Júnior, J; Pereira, GT; Campos, MCC. 2007. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo na aplicação de insumos para cultura da cana-de-açúcar. Revista Ciência e Agrotecnologia Minas Gerais 31:371-377.
- Tedesco, MJ; Gianello, C; Bissani, CA; Bohenen, H; Volkweiss, SJ. 1995. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 174 p.
- Wendling, A. 2005. Recomendação de nitrogênio e potássio para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. Dissertação de Mestrado em Ciências do Solo. Santa María, BR, Universidade Federal de Santa Maria. 160 p.