

CALIBRACIÓN ESTÁTICA DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE TASA VARIABLE DE FERTILIZANTE

STATIC CALIBRATION OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF FERTILIZER VARIABLE DOSAGE

José F. Reyes-Aroca^{1*}, David F. Berrios-Araya¹, Rodrigo A. Ortega-Blu²,
Wilson D. Esquivel-Flores¹

¹Departamento de Mecanización y Energía, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción. Vicente Méndez 595, casilla 537, Chillán. Chile. (jreyes@udec.cl) (dberrios@udec.cl) (wesquive@udec.cl). ²Departamento Industrias, Universidad Técnica Federico Santa María. Avenida Santa María 6400, Vitacura, Santiago, Chillán, Chile. (rodrigo.ortega@usm.cl).

RESUMEN

En general las máquinas sembradoras abonadoras se diseñan para un rango de dosificación nominal que puede variar dependiendo del tipo de fertilizante a usar, lo cual requiere su calibración para cada tipo específico de aplicación. En este experimento se implementó y evaluó en laboratorio un sistema de control automático de dosis variable de fertilizante. El sistema se compone de un microcontrolador con pantalla de cristal líquido (LCD), una electroválvula proporcional de control de flujo hidráulico, un motor hidráulico montado sobre el eje dosificador de la máquina sembradora y un sensor de velocidad de rotación del eje dosificador. El software de control de este sistema opera con un mapa de prescripción de dosis de fertilizante, basado en la fertilidad de sitio específico de suelo previamente determinado. El sistema se calibró para dosificaciones de 70 a 130 kg ha⁻¹ para un fertilizante de liberación controlada (FLC) denominado Basacote Starter (BS) de granulometría uniforme, y una dosificación de 190 a 420 kg ha⁻¹ para una mezcla física (MF) de fertilizante (urea al 29 % + fosfato diamónico al 71 %). Las constantes de calibración calculadas fueron 259.6 cm³ rev⁻¹ para FLC y 270.2 cm³ rev⁻¹ para MF las cuales se cargaron al microcomputador para una calibración estática-automática. La calibración automática final indicó que el coeficiente de variación en la dosificación del sistema automático varía de 0.37 % para una dosis objetivo de 70 kg ha⁻¹ con Basacote Starter a 3.74 % para una dosis objetivo de 420 kg ha⁻¹ de MF. Además, el error esperado de dosificación del sistema automático en terreno puede variar de 0.19 kg ha⁻¹ para una dosis objetivo

ABSTRACT

In general, fertilizer seeder machines are designed for a nominal rate range that may vary depending on the type of fertilizer to use, which requires its calibration for each specific type of application. In this experiment a system of automatic control of variable-rate fertilization was implemented and evaluated in the laboratory. The system consists of a microcontroller with liquid crystal display (LCD), a proportional electro-valve of hydraulic flow control, a hydraulic motor mounted on the dispenser shaft of the seeder machine and a speed sensor of rotation of the shaft dispenser. The control software of this system operates with prescription map of fertilizer rate, based on site-specific fertility of soil previously determined. The system was calibrated for rates from 70 to 130 kg ha⁻¹ for a controlled-release fertilizer (FLC) called Basacote Starter (BS) of uniform granulometry, and a rate from 190 to 420 kg ha⁻¹ for a physical mixture (MF) of fertilizer (urea 29 % + diammonium phosphate 71 %). The calibration constants calculated were 259.6 cm³ rev⁻¹ for FLC and 270.2 cm³ rev⁻¹ for MF, which were charged to the microcomputer for a static-automatic calibration. The final automatic calibration indicated that the coefficient of variation in the rate of the automatic system varies from 0.37 % for a target rate of 70 kg ha⁻¹ with Starter Basacote at 3.74 % to a target rate of 420 kg ha⁻¹ in MF. In addition, the expected error of rating of the automatic system in the field can vary from 0.19 kg ha⁻¹ for a target rate of 70 kg ha⁻¹ of Basacote Starter at 29.26 kg ha⁻¹ for a target rate of 420 kg ha⁻¹ of MF.

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: agosto, 2011. Aprobado: noviembre, 2011.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 46: 51-62. 2011.

Key words: variable rate, dispenser, precision agriculture.

de 70 kg ha⁻¹ de Basacote Starter a 29.26 kg ha⁻¹ para una dosis objetivo de 420 kg ha⁻¹ de ME.

Palabras clave: dosis variable, dosificador, agricultura de precisión.

INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión (AP) utiliza tecnologías de la información y comunicación para mejorar los procesos de toma de decisiones que permitan maximizar la producción. La AP consiste en obtener datos georeferenciados de zonas para conocer mejor lo que puede suceder en una zona durante el desarrollo de las labores agrícolas. Los sitios de cultivo pueden presentar variabilidad topográfica, por génesis de suelo, por el tipo de manejo, etc. La AP permite actuar selectivamente respecto a un sitio específico del cultivo en la aplicación de semillas, fertilizantes, control de malezas y plagas en función del análisis de la información recolectada en terreno. Mientras más diferencias de potencial de rendimiento tengan esos sitios, es más probable que el manejo del sitio específico sea exitoso. El uso de la AP puede además contribuir al mejoramiento de la productividad y rendimientos, así como a la disminución del impacto ambiental de la actividad agronómica. Una de las áreas de mayor interés en la AP es el manejo de nutrientes de sitio específico (MNSE) mediante tecnología de aplicación de fertilizantes a tasa variable (TTV), concepto promisorio no incorporado con suficiente rapidez a las prácticas productivas de la agricultura moderna debido a condicionantes económicas, sociales, agronómicas y tecnológicas (Robert, 2002). Existen varios niveles de aplicación del MNSE, sin embargo el punto de partida es la delimitación de zonas de manejo (ZM) o zonas de condiciones uniformes dentro de las explotaciones agrícolas. Se usan varios enfoques para el desarrollo del manejo de zonas de sitio específico: uno se basa en información del suelo (Nolan *et al.*, 2000; Fraisse *et al.*, 2001; Schepers *et al.*, 2004); otro se basa en mapas de rendimiento combinando datos de varias temporadas (Blackmore, 2000; Diker *et al.*, 2004); el tercero integra los dos métodos anteriores combinando información del suelo y mapas de rendimiento (Whelan *et al.*, 2002; Franzen and Nanna, 2002; Hornung *et al.*, 2003). Las distintas capas de información se pueden combinar usando algunos algoritmos basados en conceptos estadísticos, pero no

INTRODUCTION

Precision agriculture (PA) uses information and communication technologies to improve decision-making processes to maximize production. Precision agriculture consists of obtaining geo-referenced data from areas to better understand what can happen in a region during the development of farming work. Cultivation sites can present topographic variability on soil genesis, type of operation, etc. Precision agriculture can act selectively on a specific site of the crop in the application of seeds, fertilizers, weed and pest control based on the analysis of information collected in the field. While more differences in yield potential have these sites, it is more likely that the site-specific management is successful. The use of PA can also contribute to improve productivity and yield, as well as reducing the environmental impact of the agronomic activity. One area of higher interest in PA is site-specific nutrient management (SSNM) by fertilizer application technology at a variable rate (TTV), a promising concept unincorporated quickly enough into the productive practices of modern agriculture due to economic, social, agronomic and technological constraints (Robert, 2002). There are several levels of application of SSNM; however, the starting point is the delimitation of management zones (ZM) or zones of uniform conditions at the farming holdings. Several approaches are used for the development of site-specific management zones: one is based on soil information (Nolan *et al.*, 2000; Fraisse *et al.*, 2001; Schepers *et al.*, 2004); other is based on yield maps combining data of several seasons (Blackmore, 2000; Diker *et al.*, 2004); the third integrates the above two methods combining information on soil and yield maps (Whelan *et al.*, 2002; Franzen and Nanna, 2002; Hornung *et al.*, 2003). The different layers of information can be combined using some algorithms based on statistical concepts, but there is insufficient information regarding the most efficient method to combine layers of information for the purpose of defining the ZM based on soil fertility properties.

Crop management with variable-rate applications has direct relationship with variability of soil and crop to make decisions on the application of inputs. To apply variable rates there are equipments that allow programming the real-time automatic control of liquid or granule flow applied by the equipment

hay suficiente información respecto al método más eficiente para combinar capas de información con el propósito de definir el ZM con base a propiedades de fertilidad de suelo.

El manejo de cultivo con dosis variable tiene relación directa con la variabilidad del suelo y del cultivo para tomar decisiones en la aplicación de insumos. Para aplicar dosis variables hay equipos que permiten programar el control automático en tiempo real del flujo de líquidos o granulados aplicados por el equipo, para regular y monitorear la aplicación. Dichas tecnologías permiten incorporar varios elementos de automatización, como aditamento complementario en equipos comunes, habilitándolos para el uso de metodologías de tasa variable. Esta aplicación es referenciada geográficamente mediante un sensor GPS con base a un mapa de prescripción previamente elaborado. Estos mapas se construyen de acuerdo con distintas metodologías de modelamiento de dosis recomendada, ya sea basados en mapas de rendimiento o análisis de fertilidad del suelo como lo plantean Ortega *et al.* (2008), Cho *et al.* (2000) y Delin (2005). Ortega y Santibáñez (2007) evaluaron distintos métodos de zonificación en la aplicación variable de fertilizante utilizando el enfoque de fertilidad del suelo. Con el mismo enfoque, Ortega *et al.* (2002) evaluaron la factibilidad técnica de aplicar dosis variable de nitrógeno en cultivo de granos.

Debido a que la calidad de la aplicación variable requiere una rigurosa calibración del equipo usado en esa operación, en la presente investigación se desarrolló una metodología para realizar dicha calibración en una aplicación de dosis variables de fertilizante. La hipótesis fue la factibilidad de implementar una metodología para la calibración estática preliminar de un sistema de aplicación de tasa variable de fertilizante. Los objetivos de esta calibración fueron: 1) medir la dosificación de fertilizante entregada por la máquina y compararla con los datos suministrados por el fabricante; 2) calibrar la máquina en un amplio intervalo de dosificaciones para dos tipos de fertilizante utilizando el sistema de control automático; 3) comparar la tasa de dosificación aplicada automáticamente versus la tasa programada para el cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La implementación y configuración de un sistema de dosificación variable de fertilizante para una máquina sembradora-

to regulate and monitor the application. These technologies can incorporate various elements of automation, as complementary components in common equipments, enabling them to use the variable-rate methodologies. This application is geographically referenced using a GPS sensor based on a previously prepared prescription map. These maps are constructed according to different modeling methodologies for recommended rates, either based on yield maps or soil fertility analysis as suggested by Ortega *et al.* (2008), Cho *et al.* (2000) and Delin (2005). Ortega and Santibáñez (2007) evaluated different zoning methods in the variable application of fertilizer using the approach of soil fertility. With the same approach, Ortega *et al.* (2002) evaluated the technical feasibility of variable rate nitrogen application on grain crops.

Due to the fact that the variable quality of the application requires a rigorous calibration of equipment used in that operation, in this research a methodology to perform this calibration in a variable-rate application of fertilizer was developed. The hypothesis was the feasibility of implementing a methodology for preliminary static calibration of a system of variable rate application of fertilizer. The objectives of this calibration were: 1) measuring the fertilizer rate delivered by the machine and compared it with the data supplied by the manufacturer; 2) calibrate the machine over a wide range of rates for two types of fertilizer using the automatic control system; 3) compare the dosing rate automatically applied versus the programmed rate for the crop.

MATERIALS AND METHODS

The implementation and configuration of a variable rate system of fertilizer for a grain fertilizer seeder, was performed with control and automation components provided by the company AgLeader Technology. The hardware used (Figure 1) were: 1) microcomputer (AgLeader model Insight, Ames, Iowa, USA.), touchscreen, CAN communication port, USB connection and port for Compact Flash card of data files, 2) electro-hydraulic bypass valve of control flow, Raven Industries, model Fast Valve, flow range 0-227.1 L min⁻¹ and maximum pressure of 180 bar; 3) GPS AgLeader, model GPS 1500 and accuracy less than 1 m, which gives the geographical position and speed of the seeder to the system; 4) sensor of shaft rotation speed of application Raven Industries, model 256CPR with an accuracy of 256 pulses per revolution;

fertilizadora de cereales, se realizó con componentes de automatización y control proporcionados por la empresa AgLeader Technology. Los elementos de hardware utilizados (Figura 1) fueron los siguientes: 1) microcomputador (AgLeader™ modelo Insight, Ames, Iowa, EE.UU.), con pantalla táctil, puerto de comunicación CAN, conexión USB y puerto para tarjeta Compact Flash de archivos de datos; 2) válvula bypass de control de flujo electro hidráulica, marca Raven Industries, modelo Fast Valve de un rango de caudal de 0-227.1 L min⁻¹ y presión máxima de trabajo de 180 bar; 3) GPS marca AgLeader modelo GPS1500 y exactitud inferior a 1 m, que entrega la posición geográfica y velocidad de la sembradora al sistema; 4) sensor de velocidad de rotación del eje de aplicación marca Raven Industries, modelo 256CPR con una precisión de 256 pulsos por vuelta; 5) motor hidráulico marca Venturi, modelo MOR R 375, rango de potencia 5.0 de 6.5 kW, presión máxima de trabajo de 140 bar y rango de velocidad 0 a 160 rpm. En la Figura 2 se muestran los componentes de hardware del sistema automático que fueron dispuestos tanto en el tractor como en la sembradora.

El microcomputador de control y el sensor GPS se instalaron en el tractor eligiendo un lugar de fácil visión y manejo para el operador. La electroválvula, el motor hidráulico, el sensor de rotación y los conectores eléctricos, se montaron directamente en la sembradora. El software utilizado fue el SMS Advanced desarrollado por la empresa AgLeader, compatible con el microcomputador y los distintos formatos de archivos de sistemas de información geográfica (SIG). Este software permite construir mapas de prescripción de dosis variables para fertilización, además de leer y exportar la información generada por el mapa.

5) hydraulic motor Venturi trademark, model MOR R 375, 5.0 power range from 5.0 to 6.5 kW, maximum pressure 140 bar and range speed from 0 to 160 rpm. Figure 2 shows the hardware components of the automated system that were arranged both on the tractor and the seeder.

The microcomputer of control and the GPS sensor are installed on the tractor choosing an easy viewing and handling for the operator. The electrical valve, the hydraulic motor, the rotation sensor and the electrical connectors were mounted directly in the seeder. The software used was SMS Advanced developed by the company AgLeader compatible with the microcomputer and the different file formats of geographic information systems (GIS). This software allows building prescription maps for variable rate fertilization, as well as to read and export the information generated by the map.

Fertilizer seeder tractor-system

A Baldan no-till seed drill, model SPD 2200, 10 years old was utilized. It was also used a Ford tractor model 6610, year 1987, with power 86 hp at PTO shaft and an output pressure of the remote hydraulic system of 60 bar. The drilling machine consists of two fertilizer dispenser shafts operated by mechanical transmission, one for each transport wheel (left and right). Each section of the dispenser shaft regulates 7 and 8 drop lines of fertilizer, respectively; has a working width of 3.5 m, a width of application of 2.37 m and a line spacing of 15.8 cm. The seeder is designed for a regulation of fertilizer rate by combining of pinions between drive shaft, joint axis and dispenser shaft

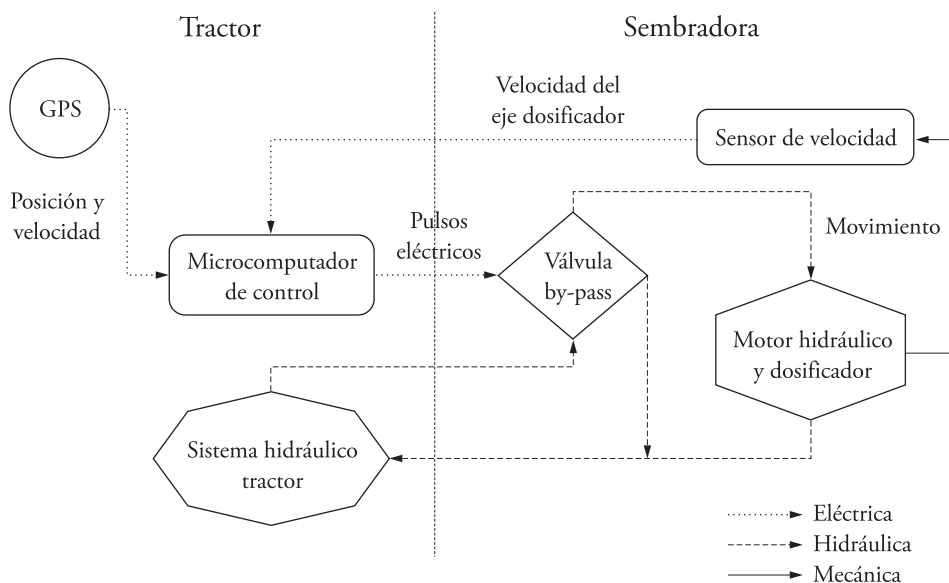


Figura 1. Esquema de funcionamiento del equipo para dosificación variable de fertilizante.
Figure 1. Functioning diagram of the equipment for variable-rate fertilization.

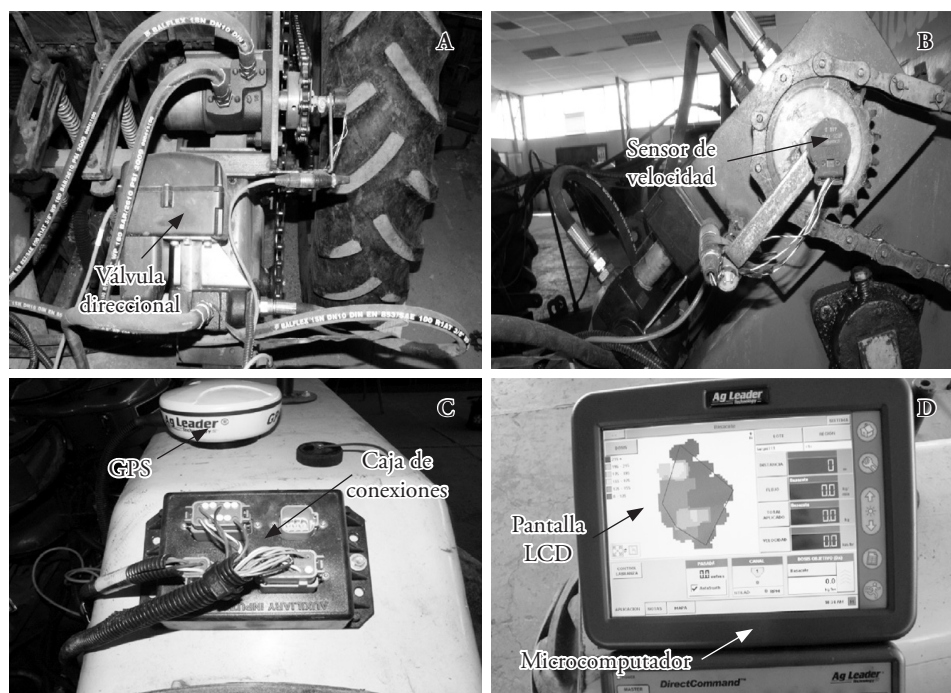


Figura 2. Vista de los componentes (A) válvula direccional, (B) sensor de velocidad y motor hidráulico, (C) GPS y caja de conexiones, (D) microcomputador y pantalla LCD.

Figure 2. View of the components (A) directional valve, (B) speed sensor and hydraulic motor, (C) GPS and junction box, (D) microcomputer and LCD screen.

Sistema tractor-sembradora fertilizadora

Se usó una máquina sembradora cero labranza marca Baldan, modelo SPD 2200 con una antigüedad de 10 años. Además se utilizó un tractor Ford modelo 6610 año 1987, con potencia de 86 Hp al eje toma de potencia y una presión de salida del sistema hidráulico remoto de 60 bar. La máquina sembradora consta de dos ejes dosificadores de fertilizante manejadas por transmisión mecánica, uno por cada rueda de transporte (izquierda y derecha). Cada sección del eje dosificador regula 7 y 8 líneas de bajada de fertilizante respectivamente; posee un ancho de trabajo de 3.5 m, un ancho de aplicación de 2.37 m y una separación entre líneas de 15.8 cm. La sembradora está diseñada para una regulación de dosis de fertilizante mediante combinación de piñones entre eje motriz, eje solidario y eje dosificador, permitiendo una regulación entre 50 a 947 kg ha⁻¹ de fertilizante según la combinación empleada. Por las características del tractor y para simplificar la configuración hidráulica del sistema, fue necesario implementar un circuito auxiliar, que consistió en tomar presión hidráulica de la línea que alimenta uno de los cilindros elevadores de discos de la sembradora, directamente a la válvula reguladora de flujo hidráulico. Esta válvula posee una entrada, una salida regulada y una descarga del exceso de aceite. El aceite de salida regulada de la válvula entrega la potencia necesaria al motor hidráulico para

allowing a regulation between 50 to 947 kg ha⁻¹ of fertilizer depending on the combination used. Given the characteristics of the tractor and to simplify the hydraulic configuration of the system it was necessary to implement an auxiliary circuit, which was to take hydraulic pressure of the line that feeds one of the lifting cylinders of discs of the seeder directly to the hydraulic flow control valve. This valve has an inlet, a regulated outlet and a discharge of oil excess. The oil of regulated outlet of the valve delivers the required power to the hydraulic motor for its movement, while the discharge of excess is the return that goes directly to the return circuit of the seeder. During the work the GPS indicates the position and speed of sowing to the control microcomputer, simultaneously the rotational speed sensor indicates the speed of the dispenser shaft; data that the microcomputer translate into instantaneous dosage/rate, which compares in real time with the target dosage/rate indicated by the prescription map and thus automatically controls the speed of the hydraulic motor attached to one of the two dispensing shafts previously connected by a welded joint.

Manual static calibration

To determine the actual rate of the dispenser shaft laboratory tests were performed with transparent plastic bags placed in each

su movimiento, mientras que la descarga del exceso constituye el retorno que va directamente al circuito de retorno de la sembradora. Durante la labor el GPS indica la posición y la velocidad de siembra al microcomputador de control, simultáneamente el sensor de velocidad de rotación indica la velocidad de giro del eje dosificador; datos que el microcomputador traduce en dosis instantánea, la cual compara en tiempo real con la dosis objetivo que indica el mapa de prescripción y de esta manera controla automáticamente la velocidad del motor hidráulico unido a uno de los dos ejes dosificadores previamente conectados mediante una unión soldada.

Calibración estática manual

Para conocer la dosificación real del eje dosificador se realizaron ensayos en laboratorio con bolsas plásticas transparentes situadas en cada bajada de fertilizante eligiendo una combinación de piñones indicada por el fabricante, correspondiente a dosificaciones de 63.92, 99.88 y 200.45 kg ha⁻¹ para Basacote Starter y 192.4, 300.3 y 432.5 kg ha⁻¹ para Mezcla Física (MF), con una velocidad de siembra simulada de 8 km h⁻¹ mediante un cilindro de tracción accionado por un motor reductor eléctrico y empleando 10 vueltas de la rueda de transporte cuyo perímetro es 3.9 m. Se realizaron tres pruebas por ensayo para trabajar con el promedio de ellas. El contenido de las bolsas se pesó con una balanza Soehnle (0.2 g precisión). A partir de la experiencia mencionada, la dosis de fertilizante se calculó con la ecuación:

$$D_E = \left(\frac{M a}{P n A_a} \right) 10000 \quad (1)$$

donde, D_E es la dosis estimada de fertilizante en kg ha⁻¹; M es la media aritmética del peso de las muestras en kg; a es el número de bajadas de fertilizante; P es el perímetro de la rueda motriz en m; n es el número de vueltas de la rueda motriz en revoluciones; A_a es el ancho de aplicación de la sembradora en m. El peso teórico en kg de fertilizante por revolución del eje dosificador para la máquina sembradora utilizada se calculó como:

$$K = \left(\frac{D_r}{R_t N} \right) \quad (2)$$

donde, K son los kg de fertilizante por revolución del eje dosificador (kg rev⁻¹) indicados por el fabricante; D_r es la dosis teórica de fertilizante indicada por el fabricante en kg ha⁻¹; R_t es la relación de transmisión entre la rueda de transporte de la

drop of fertilizer by choosing a combination of pinons indicated by the manufacturer, corresponding to rates of 63.92, 99.88 and 200.45 kg ha⁻¹ for Basacote Starter and 192.4, 300.3 and 432.5 kg ha⁻¹ for Physical Mixture (MF) with a simulated sowing speed of 8 km h⁻¹ by a drive traction cylinder powered by an electric gear motor and using 10 turns of the transport wheel whose perimeter is 3.9 m. There were three tests per trial to work with the average of them. The content of the bags was weighed with a scale Soehnle (0.2 g precision). From the experience above, the fertilizer rate was calculated with the equation:

$$D_E = \left(\frac{M a}{P n A_a} \right) 10000 \quad (1)$$

where D_E is the estimated rate of fertilizer in kg ha⁻¹; M is the arithmetic mean of the sample weight in kg; a is the number of fertilizer drops; P is the perimeter of the powering wheel in m; n is the number of turns of the powering wheel in revolutions; A_a is the width of application of the seeder in m. The theoretical weight in kg of fertilizer per revolution of the dispenser shaft for the seeder was calculated as:

$$K = \left(\frac{D_r}{R_t N} \right) \quad (2)$$

where K are the kg of fertilizer per revolution of the dispenser shaft (kg rev⁻¹) specified by the manufacturer; D_r is the theoretical rate of fertilizer recommended by the manufacturer in kg ha⁻¹; R_t is the relationship of transmission between the wheel of transport of the seeder and the fertilizer dispenser shaft whose values are given in Table 1 and Table 2; N is the number of turns of the transport wheel per hectare in rev ha⁻¹. The number of turns of the wheel of transport per hectare N was calculated with the equation:

$$N = \left(\frac{10000}{A_a P} \right) \quad (3)$$

where A_a is the width of application of the seeder in m and P is the perimeter of the powering wheel in m. From the results obtained from equation (1) the actual amount of fertilizer by revolution of the dispenser shaft for the prescribed rates for both Basacote Starter and MF was determined by the expression:

$$K_a = \left(\frac{D_E P A_a}{10000 R_t} \right) \quad (4)$$

sembradora y el eje dosificador de fertilizante cuyos valores se indican en Cuadro 1 y Cuadro 2; N es el número de vueltas de la rueda de transporte por hectárea en rev ha^{-1} . El número de vueltas de rueda de transporte por hectárea N se calculó con la ecuación:

$$N = \left(\frac{10000}{A_a P} \right) \quad (3)$$

donde, A_a es el ancho de aplicación de la sembradora en m y P es el perímetro de la rueda motriz en m. A partir de los resultados obtenidos de la ecuación (1) la cantidad de fertilizante real por revolución el eje dosificador para las dosis prescritas para Basacote Starter y MF se determinó mediante la expresión:

$$K_a = \left(\frac{D_E P A_a}{10000 R_t} \right) \quad (4)$$

donde la dosificación real K_a se expresa en kg rev^{-1} . Una vez generados los valores de K_a se realizó un ajuste lineal, para estimar un valor representativo K_{aa} de dosificación de la máquina en los rangos de dosificación analizados. Para este propósito se aplicó el método de mínimos cuadrados a la ecuación:

$$K_{aa} = aD_E + b \quad (5)$$

donde D_E es la dosis por hectárea calculada en kg ha^{-1} ; K_{aa} es la dosificación ajustada en kg rev^{-1} , de la sembradora; a es la pendiente de la recta de ajuste; b es la intercepción de la recta de ajuste. Las ecuaciones de mínimos cuadrados son:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n K_{ai} &= nb + a \sum_{i=1}^n D_{Ei} \\ \sum_{i=1}^n K_{ai} D_{Ei} &= b \sum_{i=1}^n D_{Ei} + a \sum_{i=1}^n D_{Ei}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

donde D_{Ei} es el i -ésimo término de D_E y K_{ai} es el i -ésimo término de K_a .

Calibración estática automática

El sistema de dosificación automática comandado por el microcomputador se usó para realizar una calibración final de dosificación variable para los dos tipos de fertilizante usados en la calibración estática manual: 1) fertilizante compuesto granular de liberación controlada, Basacote Starter, con densidad aparente promedio 958 kg m^{-3} ; 2) una mezcla de ferti-

where the actual rate K_a is expressed in kg rev^{-1} . Once K_a values are generated it proceeded to perform a linear fit to estimate a representative value K_{aa} of the rate of the machine in the ranges of rates analyzed. For this purpose the least squares method was applied to the equation:

$$K_{aa} = aD_E + b \quad (5)$$

where D_E is the calculated rate per hectare in kg ha^{-1} ; K_{aa} is the rate adjusted in kg rev^{-1} , of the seeder; a is the slope of the line of fit; b is the intercept of the line of fit. The least squares equations are:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n K_{ai} &= nb + a \sum_{i=1}^n D_{Ei} \\ \sum_{i=1}^n K_{ai} D_{Ei} &= b \sum_{i=1}^n D_{Ei} + a \sum_{i=1}^n D_{Ei}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

where D_{Ei} is the i^{th} term of D_E and K_{ai} is the i^{th} term of K_a .

Automatic static calibration

The automatic rate system commanded by the microcomputer was used for a final calibration of variable rate for the two types of fertilizer used in the manual static calibration: 1) granular compound fertilizer of controlled release, Basacote Starter, with an average bulk density 958 kg m^{-3} ; 2) a mixture of fertilizers, MF (urea 29 % + diammonium phosphate 71 %), with an average bulk density 862 kg m^{-3} . Sample taking and measurements were made with polyethylene containers fixed in each drop of fertilizer of the seeder. There were five replicates for three rates (70, 100 and 130 kg ha^{-1}) of Basacote Starter and the same determinations for three rates of MF (190, 350 and 420 kg ha^{-1}). In this calibration the computer module of calibration was used which is part of the software SMS Advanced of AgLeader. This application allows simulating the rate, application speed and parameters of the seeder, as well as the total delivery of fertilizer to use in the calibration as reference. In this case the system was configured for a total delivery of fertilizer of 3000 g in each replicate. With the results of this calibration it was carried out analysis of standard deviation (SD) and coefficient of variation (CV), *i.e.* the ratio between SD and the arithmetic mean for the tests with Basacote Starter and MF.

RESULTS AND DISCUSSION

Tables 1 and 2 show the results obtained by the manual calibration of the seeder, for Basacote Starter

zantes, MF (urea al 29 % + fosfato diamónico al 71 %), con densidad aparente promedio 862 kg m⁻³. La toma de muestras y mediciones se hicieron con contenedores de polietileno sujetos en cada bajada de fertilizante de la máquina sembradora. Hubo cinco repeticiones para tres dosificaciones (70, 100 y 130 kg ha⁻¹) de Basacote Starter y las mismas determinaciones para tres dosificaciones de MF (190, 350 y 420 kg ha⁻¹). En dicha calibración se usó el módulo computacional de calibración que forma parte del software SMS Advanced de AgLeader. Esta aplicación permite simular la dosis, velocidad de aplicación y parámetros de la máquina sembradora, así como la entrega total de fertilizante a usar en la calibración como referencia. En este caso se configuró el sistema para una entrega total de fertilizante de 3000 g en cada repetición. Con los resultados de esta calibración se realizó análisis de desviación estándar (DE) y coeficiente de variación (CV) es decir el cociente entre la DE y la media aritmética para las pruebas realizadas con Basacote Starter y MF.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los Cuadros 1 y 2 se muestra los resultados obtenidos mediante la calibración manual de la sembradora, para Basacote Starter y MF. Para cada dosis recomendada se indica el valor de la relación de transmisión de la sembradora R_t , la dosis indicada por el fabricante D_p , la media del peso recolectado en el ensayo de calibración manual M , la dosis calculada mediante la calibración manual D_E , la diferencia entre la dosis real y aquella indicada por el fabricante $D_E - D_p$, la constante de calibración K indicada por el

and MF. For each recommended rate the value of the transmission ratio of the seeder R_t is indicated, the rate recommended by the manufacturer D_p , the measurement of the weight recollected in the trial of manual calibration M , the rate estimated by manual calibration D_E , the difference between real rate and that recommended by the manufacturer $D_E - D_p$, the constant of calibration K indicated by the manufacturer, the constant of K_a calibration determined experimentally and the constant of calibration K_{aa} fitted as mean representative from the experimentally estimated rate.

Tables 1 and 2 allow visualizing important differences between the rate recommended by the manufacturer and the experimentally determined rate ($D_E - D_p$), differences that can vary from 15.0 kg ha⁻¹ for a rate of 63.9 kg ha⁻¹ indicated by the manufacturer if used Basacote Starter, and a maximum difference of 51.4 kg ha⁻¹ for a rate of 432.5 kg ha⁻¹ recommended by the manufacturer when using MF. Figure 3 shows that both the constant of experimental calibration K_a and the fitted constant K_{aa} follow a decreasing trend with the increase of the rate required per hectare and also that the representative constants of calibration of both fertilizers in the intervals of rates analyzed are different, as indicated by the values shown in Table 3. The negative slope in the trend lines showing the tests could be due to a dynamic or skating effect which occurs when increasing the rate, and therefore

Cuadro 1. Resultados de calibración manual de la sembradora para Basacote Starter.

Table 1. Manual calibration results of the seeder for Basacote Starter.

R_t	D_p (kg ha ⁻¹)	M (kg)	D_E (kg ha ⁻¹)	$D_E - D_p$ (kg ha ⁻¹)	K (kg rev ⁻¹)	K_a (kg rev ⁻¹)	K_{aa} (kg rev ⁻¹)
0.288	63.9	0.049	78.9	15.0	0.205	0.253	0.251
0.450	99.9	0.073	118.7	18.8	0.205	0.244	0.246
0.902	200.5	0.140	227.1	26.7	0.205	0.233	0.232

Cuadro 2. Resultados de calibración manual de la sembradora para Mezcla Física.

Table 2. Manual calibration results of the seeder for Physical Mixture.

R_t	D_p (kg ha ⁻¹)	M (kg)	D_E (kg ha ⁻¹)	$D_E - D_p$ (kg ha ⁻¹)	K (kg rev ⁻¹)	K_a (kg rev ⁻¹)	K_{aa} (kg rev ⁻¹)
0.867	192.4	0.138	224.0	31.5	0.205	0.239	0.237
1.354	300.3	0.208	337.6	37.2	0.205	0.230	0.233
1.950	432.5	0.298	483.9	51.4	0.205	0.229	0.228

fabricante, la constante de calibración K_a determinada experimentalmente y la constante de calibración K_{aa} ajustada como media representativa a partir de la dosis calculada experimentalmente.

Los Cuadros 1 y 2 permiten visualizar diferencias importantes entre la dosis indicada por el fabricante y la dosis determinada experimentalmente ($D_E - D_D$), diferencias que pueden variar desde 15.0 kg ha^{-1} para una dosis de 63.9 kg ha^{-1} indicada por el fabricante si se usa Basacote Starter, y una diferencia máxima de 51.4 kg ha^{-1} para una dosis de 432.5 kg ha^{-1} indicada por el fabricante si se usa MF. La Figura 3 muestra que tanto la constante de calibración experimental K_a como la constante ajustada K_{aa} siguen una tendencia decreciente con el aumento de la dosis requerida por hectárea y además que las constantes de calibración representativas de ambos fertilizantes en los intervalos de dosis analizados son diferentes, como lo indican los valores mostrados en el Cuadro 3. La inclinación negativa en las líneas de tendencia que presentan las pruebas podría deberse a un efecto dinámico o de patinaje que ocurre al aumentar las dosis, y por ende las revoluciones del eje dosificador. Las diferencias entre ambas correlaciones podría deberse a que un fertilizante es de una composición compuesta y homogénea mientras que el otro es una mezcla de dos compuestos distintos con diferente granulometría, lo que permite deducir la necesidad de realizar calibraciones específicas para cada tipo de fertilizante si se pretende obtener una alta precisión en labores de fertilización de tasa variable.

En los intervalos de dosificación analizados de 70 a 130 kg ha^{-1} para Basacote Starter y de 190 a 420 kg ha^{-1} para la MF, las ecuaciones de

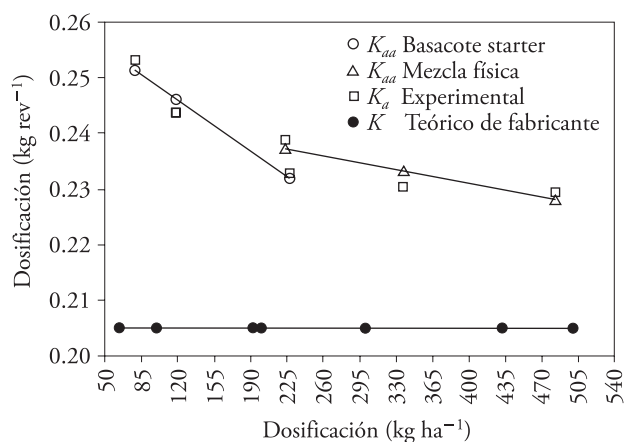


Figura 3. Dosificación de la máquina sembradora. K : valor indicado por fabricante, K_a : valor experimental, K_{aa} : valor estimado mediante ajuste lineal.

Figure 3. Rates of seeder. K : value indicated by manufacturer, K_a : experimental value, K_{aa} : value estimated by linear fit.

the revolutions of the dispenser shaft. The differences between both correlations could be due to the fact that one fertilizer is made up of a compound and homogenous composition while the other is a mixture of two different compounds with different granulometry, allowing infer the need to perform specific calibration for each type of fertilizer if they are to achieve high accuracy in tasks of variable-rate fertilization.

In the analyzed rates intervals from 70 to 130 kg ha^{-1} for Basacote Starter and from 190 to 420 kg ha^{-1} for the MF, the equations of the lines of fit to determine an average value representative of the constant K_{aa} were $K_{aa} = 0.2617 - 0.00013012$

Cuadro 3. Constantes de calibración de la sembradora calculadas mediante ajuste de mínimos cuadrados.

Table 3. Calibration constants from the seeder estimated by fit of least-squares.

Dosis (kg ha ⁻¹)	K_{aa} Basacote Starter (kg rev ⁻¹)	Dosis (kg ha ⁻¹)	K_{aa} Mezcla Física (kg rev ⁻¹)
70	0.253	190	0.237
100	0.249	350	0.233
130	0.245	420	0.228
Media	0.249		0.233
Calibración (cm ³ rev ⁻¹)	259.6		270.2

la rectas de ajuste para determinar un valor medio representativo de la constante K_{aa} fueron $K_{aa}=0.2617-0.00013012 D_E$ para Basacote Starter y $K_{aa}=0.2450877-0.0000350573 D_E$ para MF, con coeficientes de determinación R^2 de 0.973 para Basacote Starter y 0.943 para MF. En el Cuadro 4 se muestran los resultados de la calibración final de la sembradora usando el sistema de dosificación automática comandado por el microcomputador, programado para una entrega de fertilizante de 3000 g para cada una de las dosis simuladas con ambos fertilizantes. El valor ingresado al microcomputador expresado en $\text{cm}^3 \text{rev}^{-1}$ corresponde al cociente entre la media representativa de K_{aa} y la densidad del producto. Estos valores calculados para cada fertilizante corresponden a $259.6 \text{ cm}^3 \text{rev}^{-1}$ para Basacote y $270.2 \text{ cm}^3 \text{rev}^{-1}$ para MF. Los resultados estadísticos del Cuadro 4 muestran una baja variabilidad entre repeticiones reflejada en valores de coeficiente de variación que fluctúan entre un mínimo de 0.37 % para una dosificación de 70 kg ha^{-1} con Basacote Starter, y un máximo de 3.74 % para una dosificación de 420 kg ha^{-1} con MF. En la Figura 4 se muestra el error medio esperado en la dosis por hectárea, calculado con la diferencia relativa entre la dosis de referencia (3000 g) y la media de la dosis real obtenida de cinco repeticiones (Cuadro 4). Los valores de error esperado indican que en general el sistema permite una buena aproximación a los valores deseados en el rango analizado. Así, con Basacote Starter el error de aplicación esperado varía entre 0.19 kg ha^{-1} para una dosis programada de 70 kg ha^{-1} y 5.85 kg ha^{-1} para una dosis programada de 130 kg ha^{-1} ; mientras que con MF el error esperado varía entre 0.44 kg ha^{-1} para una dosis programada de 190 kg ha^{-1} y 29.26 kg ha^{-1} para una dosis programada de 420 kg ha^{-1} . El error medio esperado

S_D for Basacote Starter and $K_{aa}=0.2450877-0.0000350573 S_D$ for MF, with coefficients of determination R^2 of 0.973 for Basacote Starter and 0.943 for MF. Table 4 shows the results of the final calibration of the seeder using the system of automatic rate commanded by the microcomputer, programmed for a fertilizer delivery of 3000 g per each of the simulated rates with both fertilizers. The value entered into the microcomputer expressed in $\text{cm}^3 \text{rev}^{-1}$ corresponds to the ratio between the mean representative of K_{aa} and density of the product. These calculated values for each fertilizer corresponded to $259.6 \text{ cm}^3 \text{rev}^{-1}$ for Basacote and $270.2 \text{ cm}^3 \text{rev}^{-1}$ for MF. The statistical results in Table 4 show a low variability between replicates reflected in values of coefficient of variation ranging from a minimum of 0.37 % for a dosage of 70 kg ha^{-1} with Basacote Starter, and a maximum of

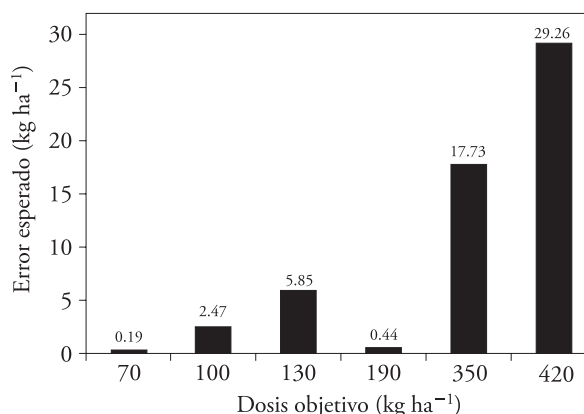


Figura 4. Error medio esperado de dosificación del sistema automático para distintas dosis objetivo de Basacote Starter y Mezcla Física.

Figure 4. Expected mean error of the automatic rate system for the different target dosage of Basacote Starter and Physical Mixture.

Cuadro 4. Resultados estadísticos de la calibración automática para tres dosis y cinco repeticiones de Basacote Starter y Mezcla Física.

Table 4. Statistical results of the automatic calibration for three rates and five repetitions of Basacote Starter and Physical Mixture.

	Basacote Starter			Mezcla Física		
	70	100	130	190	350	420
Dosis (kg ha^{-1})	70	100	130	190	350	420
Dosis de prueba (g)	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Media (g)	2992	2926	2865	2993	2848	2791
Desviación estándar (g)	11.2	37.2	67.2	40.6	74.5	102.8
CV %	0.374	1.279	2.369	1.359	2.644	3.738

aumenta en términos absolutos al aumentar la dosis programada en el sistema automático y este aumento es más significativo para la MF. Esto significa que la constante real de dosificación de la sembradora (en kg ha^{-1}) fue dependiente de la velocidad del eje dosificador de la máquina sembradora, como se observa en la Figura 3. Tal comportamiento indica que se produce mayor patinaje del eje dosificador respecto del fertilizante, al aumentar su velocidad de rotación.

CONCLUSIONES

El sistema automático de aplicación de dosis variable de fertilizante implementado operó exitosamente en una sembradora de granos de cero labranza, permitiendo realizar una calibración estática para dos tipos de fertilizante: Basacote Starter y Mezcla Física. La máquina sembradora mostró diferencias de dosificación importantes entre los valores experimentales y los indicados por el fabricante; estos últimos fueron inferiores a los reales obtenidos mediante la calibración estática experimental. La constante real de dosificación de la sembradora (en kg ha^{-1}) fue dependiente de la velocidad del eje dosificador de la máquina sembradora, probablemente debido al efecto dinámico de patinaje del eje dosificador al aumentar su velocidad de rotación. A partir de los valores de dosificación obtenidos mediante calibración estática, fue posible calcular valores medios de dosificación por hectárea de la sembradora para ambos fertilizantes en rangos de dosificación representativos de aquellos utilizados en la siembra de granos.

LITERATURA CITADA

- Blackmore, S., 2000. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Comput. Electron. Agric.* 26: 37-51.
- Cho, S. I., I. S. Kang, and H. Choi. 2000. Determination of variable rate fertilizing amount in small size field for precision fertilizing. *Ksam* 25(3): 241-250.
- Delin, S. 2005. Within-field variations in grain protein content-relationships to yield and soil nitrogen and consistency in maps between years. *Precision Agric.* 5: 565-577.
- Diker, K., D. F. Heermann, and M. K. Brodahl. 2004. Frequency analysis of yield for delineating yield response zones. *Precision Agric.* 5, 435-444.
- Fraisse, C. W., K. A. Sudduth, and N. R. Kitchen. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Trans. ASAE* 44: 155-166.

3.74 % for a dosage of 420 kg ha^{-1} with MF. Figure 4 shows the mean error expected in the dose per hectare, calculated with the relative difference between the dose of reference (3000 g) and the mean of the actual rate obtained from five replicates (Table 4). The expected error values indicate that in general the system allows for a good approximation to the desired values in the range analyzed. Thus, with Basacote Starter the expected application error varies between 0.19 kg ha^{-1} for a programmed rate of 70 kg ha^{-1} and 5.85 kg ha^{-1} for a programmed rate of 130 kg ha^{-1} ; while with MF the error expected varies between 0.44 kg ha^{-1} for a programmed rate of 190 kg ha^{-1} and 29.26 kg ha^{-1} for a programmed rate of 420 kg ha^{-1} . The average error expected increases in absolute terms when increasing the rate programmed into the automatic system and this increase is more significant for MF. This means that the real constant of rate of the seeder (in kg ha^{-1}) was dependent on the speed of dispenser shaft of the speed seeder, as shown in Figure 3. Such behavior indicates that there is more skating of the dispenser shaft in respect to the fertilizer, when increasing its rotational speed.

CONCLUSIONS

The implementation of an automatic system of variable-rate fertilizer application operated successfully in a no-till grain drill, allowing a static calibration for two types of fertilizer: Basacote Starter and Mezcla Física. The seeding machine showed differences of important rate between the experimental values and those indicated by the manufacturer; these latter were lower than the real ones obtained through experimental static calibration. The real constant of rate of the seeder (in kg ha^{-1}) was dependent on the dispenser shaft speed of the seeder, probably due to the dynamic effect of skating of the dispenser shaft when increasing its speed of rotation. From the values of dosage obtained by static calibration, it was possible calculate mean values of rates per hectare of the seeder for both fertilizers in ranges of rate representative of those used in the grain seeding.

—End of the English version—



- Franzen, D. W., and T. N. Nanna. 2002. Management zone delineation methods. *In*: Robert, R. H. Rust, and W. E. Larson (eds). Proceedings of the Sixth International Conference on Precision Agriculture and Other Resource Management. (CD). ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, USA.
- Hornung, A., R. Khosla, R. Reich, and D. G. Westfall. 2003. Evaluation of site-specific management zones: grain yield and nitrogen use efficiency. *In*: Stafford, J. V., and A. Werner (eds). Proceedings of the Fourth European Conference on Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, pp: 297-302.
- Nolan, S C., T. W. Goddard, G. Lohstraeter, and G. M. Coen. 2000. Assessing management units on rolling topography. *In*: Robert, P. C., R. H. Rust, and W. E. Larson (eds). Proceedings of the Fifth International Conference on Precision and Other Resource Management. (CD). ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, USA.
- Robert, P. C. 2002. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant Soil* 247: 143-149.
- Schepers, A. R., J. F. Shanahan, M. A. Liebig, J. S. Schepers, S. H. Johnson, and A. Luchiari Jr. 2004. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agron. J.* 96, 195-203.
- Ortega, R. A., J. A. Ortega, and W. Foster. 2002. Technical-Economical Feasibility of Site-Specific Nitrogen Management in Traditional Crops in Chile. Proceedings of the 6th Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management. (CD). Minneapolis, Minnesota.
- Ortega, R. A., and O. Santibáñez. 2007. Agronomic evaluation of three zoning methods based on soil fertility in corn crops (*Zea mays* L.). *Computers and Electronics in Agric.* 58 (1): 49-59.
- Ortega, R. A., R. E. Muñoz, L. E. Acosta, and J. S. Riquelme. 2008. Optimization model for variable rate application in extensive crops in Chile. Proceedings of the 9th International Conference on Precision Agriculture. (CD). (ICPA), Denver, CO, USA.
- Whelan, B. M., J. Cupitt, and A. B. McBratney. 2002. Practical definition and interpretation of potential management zones in Australian dryland cropping. *In*: Robert, P. C., R. H. Rust, and W. E. Larson. (eds). Proceedings of the Sixth International Conference on Precision Agriculture and Other Resource Management. (CD). Madison, WI, USA.