

ESTIMACIÓN ANALÍTICA DE LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO ÓPTIMAS DE UN DISTRIBUIDOR CENTRÍFUGO DE FERTILIZANTE, USANDO EL MÉTODO DEL GRADIENTE SOBRE MÚLTIPLES SEMILLAS

ANALYTICAL ESTIMATION OF OPTIMAL OPERATION VARIABLES OF A CENTRIFUGAL FERTILIZER DISTRIBUTOR, USING THE GRADIENT METHOD ON MULTIPLE SEEDS

Jaime Gómez-Gil^{1*}, Alfonso de-Lózar-Escudero¹, L. Manuel Navas-Gracia², Gonzalo Ruiz-Ruiz²

¹Departamento de Teoría de la Señal, Comunicaciones e Ingeniería Telemática. E.T.S. Ing. de Telecomunicación. Universidad de Valladolid. (jgomez@tel.uva.es). ²Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. E.T.S. de Ingenierías Agrarias Universidad de Valladolid.

RESUMEN

El ajuste óptimo de las variables de funcionamiento de una abonadora con distribuidores centrífugos para obtener un buen coeficiente de variación, es fundamental para una distribución uniforme del fertilizante en el terreno. En este artículo se presenta una aplicación informática para predecir analíticamente el perfil de distribución y el coeficiente de variación de abonadoras agrícolas con distribuidores centrífugos de disco. Esta aplicación además calcula, mediante el método del gradiente sobre múltiples semillas, los valores de las variables de ajuste de la abonadora que ofrecen un mejor coeficiente de variación. Con estos parámetros óptimos de las variables de ajuste de la abonadora se obtienen unos resultados de coeficiente de variación similares a los de las marcas más prestigiosas de equipos de abonado. Se muestra un caso particular con discos pequeños y moderada velocidad de giro con el que se consigue un ancho de trabajo de 22 m, similar a los obtenidos con equipos de abonado que tienen estos distribuidores. El uso de esta aplicación informática en una estación de ensayo de abonadoras permite un ajuste del equipo de abonado, reduciendo el número de ensayos experimentales requeridos. Esto se debe a que se realiza inicialmente una búsqueda de los parámetros óptimos mediante la aplicación desarrollada, y luego un ajuste fino de estos parámetros mediante ensayos experimentales.

Palabras clave: Perfil de distribución, coeficiente de variación, método del gradiente, simulador, optimizador.

INTRODUCCIÓN

El abonado es una de las tareas más importantes que debe realizar el agricultor para aumentar el rendimiento y calidad de los cultivos. Desde un punto de vista agronómico, económico y ambiental es muy importante una adecuada distribución de fertilizante

ABSTRACT

The optimal adjustment of operation variables of a fertilizer machine with centrifugal distributors for obtaining a good variation coefficient is essential for uniform fertilizer distribution on farmland. This article presents a computerized application in order to predict analytically the distribution profile and the variation coefficient of agricultural fertilizer machines with centrifugal disk distributors. Furthermore, this application calculates the values of fertilizer adjustment variables, which offer a better variation coefficient, using the gradient method on multiple seeds. With these optimal parameters of fertilizer adjustment variables, variation coefficient results are obtained, similar to those of the most prestigious trademarks of fertilizing equipment. A particular case is shown with small disks and moderate turn speed with which a work width of 22 m is achieved, similar to the ones obtained with the fertilizing equipment of these distributors. The use of this computerized application in a fertilizer machine test station allows an adjustment of the fertilizing equipment, reducing the number of required experimental trials. This is due to the fact that initially a search for the optimal parameters through developed application has been carried out and then, a fine adjustment of these parameters by means of experimental tests.

Key words: Distribution profile, variation coefficient, gradient method, simulator, optimizer.

INTRODUCTION

Fertilizing is one of the most important tasks the farmer has to carry out in order to increase yield and quality of the crop. From an agronomical, economical, and environmental point of view, adequate fertilizer distribution on the farmland is very important, since a smaller dose entails nutrient shortage, and a larger one, environmental problems as well as inadequate plant growth (Tissot *et al.*, 2002). In both cases, the farmer will obtain lesser benefits.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Agosto, 2008. Aprobado: Marzo, 2009

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 497-509, 2009.

en el terreno, ya que una dosis menor conlleva escasez de nutrientes, y una mayor, problemas ambientales así como un crecimiento inadecuado de la planta (Tissot *et al.*, 2002). En ambos casos, el agricultor obtendrá menores beneficios.

Este abonado se realiza habitualmente con abonos químicos en forma de pequeñas partículas o gránulos de fertilizante, y se esparcen con máquinas abonadoras. Los distribuidores de estas máquinas son de diferentes tipos; los más habituales son los centrífugos de dos discos.

Un abonado homogéneo en toda la parcela requiere que el equipo presente un patrón de distribución adecuado durante la distribución de fertilizante. Además, el coeficiente de variación (CV) de la distancia entre pasadas a la que abona el agricultor debe ser pequeño, para una mayor uniformidad en la distribución del fertilizante. El estudio del patrón de distribución casi siempre se hace experimentalmente en estaciones de ensayo, principalmente por los fabricantes de los equipos. Para suplir el uso de las estaciones de ensayo, Grift y Hofstee (2002) y Swisher *et al.* (2002) desarrollaron un método para determinar el patrón de distribución mediante un sensor que podía medir el diámetro y velocidad de las partículas que salían del disco distribuidor.

Se han realizado estudios analíticos del comportamiento del fertilizante en el aparato distribuidor (Olieslagers *et al.*, 1995; Dintwa *et al.*, 2004a; Villette *et al.*, 2005). Con base en dichos estudios, en el presente trabajo se desarrolló una aplicación informática que modela el comportamiento de un distribuidor centrífugo, y puede buscar los parámetros del distribuidor que consigan un mejor CV. Esta búsqueda de los parámetros óptimos se realiza mediante el método del gradiente aplicado sobre múltiples semillas. Primero se presentan las ecuaciones, obtenidas de literatura científica, que modelan el comportamiento del fertilizante dentro y fuera del distribuidor centrífugo. Luego se detalla el método para la búsqueda de los parámetros óptimos de funcionamiento del distribuidor centrífugo. Finalmente se presentan los resultados obtenidos con la herramienta en un distribuidor centrífugo, resultados acordes a los de los equipos de abonado con distribuidores centrífugos de esas características.

MATERIALES Y MÉTODOS

La aplicación de simulación

Se usó el software de desarrollo Labview 7.1 de National Instruments para desarrollar una aplicación informática que simula el movimiento de las partículas de fertilizante en una abonadora centrífuga. Este movimiento comprende desde cuando los gránulos

This fertilizing is usually carried out with chemical fertilizers in form of small fertilizer particles or granules being scattered with fertilizing machines. The distributors of these machines are of different types: the most usual are two-disk centrifuges.

Homogenous fertilizing all over the plot requires that the equipment has an appropriate distribution pattern for fertilizer distribution. Besides, the coefficient of variation (CV) of distance between the passes which the farmer fertilizes must be short in order to achieve greater uniformity in fertilizer distribution. The study of the distribution pattern is almost always made experimentally at test stations, mainly by the manufacturers of the equipment. In order to supply the test stations for use, Grift and Hofstee (2002) and Swisher *et al.*, developed a method for determining the distribution pattern by means of a sensor, which could measure diameter and speed of the particles leaving the distributor disk.

Analytical studies of fertilizer performance in the distributor machine have been conducted (Olieslagers *et al.*, 1995; Dintwa *et al.*, 2004a; Villette *et al.*, 2005). Based on such studies, in the present paper, a computerized application was developed, which models the performance of a centrifugal distributor and may search the distributor parameters achieving a better CV. This search for optimal parameters is conducted using the gradient method applied on multiple seeds. First, the equations obtained from scientific literature, which model the fertilizer performance within and outside the centrifugal distributor, are presented. Then, the method for the search of optimal operation parameters of the centrifugal distributor is detailed. Finally, the results obtained with the tool in a centrifugal distributor are presented, results, according to those of the fertilizing equipment with centrifugal distributors of these characteristics.

MATERIALS AND METHODS

Simulation application

Development software Labview 7.1 of National Instruments was used in order to develop a computerized application simulating the movement of fertilizer particles in a centrifugal fertilizer distribution machine. This movement covers since the moment when the granules fall from the hopper to the distributor disk until its final position on the soil. Starting from the position of the fertilizer on the soil, the distribution profile and the CV obtained with the fertilizer is found. The characteristics of the fertilizing machine (disk radius, disk turn speed, etc.) and fertilizer granulometry must be defined by the user of the program.

The equations on which the simulator is based are indicated below. The calculations conducted by the program in each simulation can be divided into three phases.

caen de la tolva al disco distribuidor, hasta su posición final en el suelo. A partir de la posición del abono en el suelo se halla el perfil de distribución y el CV obtenido con la abonadora. Las características de la abonadora (radio de los discos, velocidad de giro de los discos, etc.) y la granulometría del abono deben ser definidas por el usuario del programa.

A continuación se indican las ecuaciones en que se basa el simulador. Los cálculos que realiza el programa en cada simulación pueden dividirse en tres etapas.

Etap 1. Movimiento de las partículas dentro del disco distribuidor.

Esta etapa comprende desde cuando las partículas caen de la tolva al disco distribuidor por el orificio de alimentación, hasta que abandonan el disco por su borde. Se supone que las aspas sobre el disco recogen los gránulos de abono y estos gránulos, por el efecto centrífugo, se deslizan por las aspas hasta llegar al borde del disco. En este estudio se supone que las aspas son rectas.

El análisis matemático para calcular la trayectoria de los gránulos en el disco distribuidor se basa en el trabajo de Villette *et al.* (2005). En esta etapa hay que obtener la velocidad absoluta de salida de los gránulos v_0 , el ángulo θ_{out} de salida de las partículas, y el ángulo recorrido Φ_u por las mismas mientras estaban en el disco.

La velocidad de salida v_0 de los gránulos por el borde del disco está dada por la ecuación:

$$v_0 = \sqrt{\left(\hat{x}_v \cos \Omega \cos \alpha_{lv}\right)^2 + \left(r_{aspa} \dot{\theta} - \hat{x}_v \cos \Omega \sin \alpha_{lv}\right)^2 + \left(\hat{x}_v \cos \Omega\right)^2} \quad (1)$$

donde, Ω es el ángulo de inclinación del disco con respecto a un plano horizontal; α_{lv} el ángulo de inclinación del aspa con respecto al radio de la circunferencia que constituye el disco; $\dot{\theta}$ la velocidad de giro de los discos (Figura 1).

La velocidad del gránulo a lo largo del aspa $\hat{x}$ se define con la ecuación:

$$\hat{x}_v = \frac{(x_{v0} - K)}{2\delta} (\delta + \mu \cos \Omega)(\delta - \mu \cos \Omega) \dot{\theta} \exp((\delta - \mu \cos \Omega) \dot{\theta} t) \quad (2)$$

donde, x_{v0} es la posición inicial de la partícula en el aspa; μ el coeficiente de rozamiento del gránulo con el disco y el aspa; t el tiempo que tarda el gránulo en salir del disco.

La constante K y el coeficiente δ están dados por:

$$K = \frac{\mu g \cos \Omega + g \sin \Omega - \mu r_p \dot{\theta}^2}{\dot{\theta}^2 \cos \Omega (\cos \Omega - \mu \sin \Omega)} \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\cos^2 \Omega (\mu^2 + 1) - \mu \sin \Omega \cos \Omega} \quad (4)$$

Phase 1. Particle movement within the distributor disk.

This phase covers from the moment when the particles fall from the hopper through the supply opening on the distributor disk until leaving the disk by its rim. It is assumed that the vanes on the disk gather the fertilizer granules, and these glide, by the centrifugal effect, along the vanes until reaching the disk rim. In this study, the vanes are supposed to be straight.

The mathematical analysis for calculating granule trajectory on the distributor disk is based on the study by Villette *et al.* (2005). In this phase, the absolute granule exit speed v_0 has to be obtained, the particle exit angle θ_{out} , and the angle Φ_u covered while they were on the disk.

Granule exit speed v_0 by the disk rim is given by equation:

$$v_0 = \sqrt{\left(\hat{x}_v \cos \Omega \cos \alpha_{lv}\right)^2 + \left(r_{aspa} \dot{\theta} - \hat{x}_v \cos \Omega \sin \alpha_{lv}\right)^2 + \left(\hat{x}_v \cos \Omega\right)^2} \quad (1)$$

where, Ω is the angle of disk inclination with respect to a horizontal plane; α_{lv} the vane inclination angle with respect to the circumference radius constituting the disk, $\dot{\theta}$ disk turn speed (Figure 1).

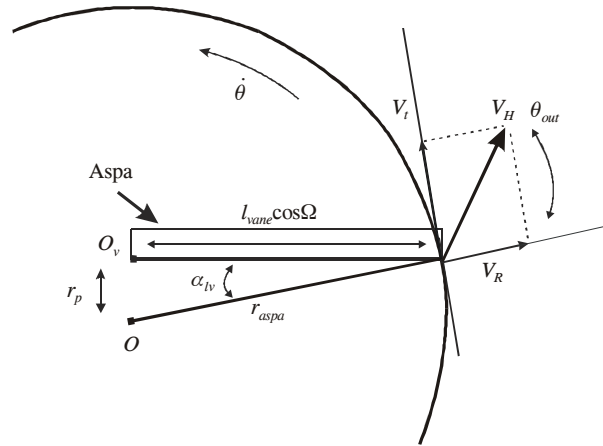


Figura 1. Vista superior del disco giratorio y componentes de la velocidad de salida de la partícula: v_H =componente horizontal de la velocidad de salida; v_T =componente horizontal tangencial de la velocidad de salida; v_R =componente horizontal radial de la velocidad de salida; O , punto de giro del disco; O_v , proyección de O sobre el eje del aspa; α_{lv} , ángulo del aspa; r_{aspa} radio del aspa; θ_{out} ángulo entre el vector velocidad y el vector radio en el extremo del disco; $\dot{\theta}$ velocidad angular del disco; r_p radio del círculo tangente a las aspas.

Figure 1. View from above of disk and speed components of particle: v_H =horizontal component of exit speed; v_T =tangential horizontal component of exit speed; v_R =radial horizontal component of exit speed; O , disk turning point; O_v , projection of O on vane axis; α_{lv} , vane angle; r_{aspa} vane radius; θ_{out} angle between speed vector and radius vector at disk rim; $\dot{\theta}$ disk angular speed; r_p tangent circle radius to vanes.

Para calcular el tiempo t que tarda la partícula en abandonar el disco centrífugo se usa la ecuación (5) que presenta la posición de la partícula respecto del aspa:

$$\hat{x}_v = \frac{(x_{v0} - K)}{2\delta} \left((\delta + \mu \cos \Omega) \exp((\delta - \mu \cos \Omega)\dot{\theta}t) \right) K \quad (5)$$

Sustituyendo $\hat{x}_v$ por l_{vane} en (5), se obtiene el tiempo que permanece el gránulo en el disco. Las ecuaciones (2) y (5) se pueden combinar para obtener:

$$\dot{\hat{x}}_v = (\hat{x}_v - K)(\delta + \mu \cos \Omega)\dot{\theta} \quad (6)$$

La relación entre el radio de la posición del gránulo en el disco r , y la posición de la partícula respecto del aspa $\hat{x}_v$, están dadas por la ecuación:

$$\hat{x}_v = \frac{r}{\cos \Omega} \sqrt{1 - \left(\frac{r_p}{r} \right)^2} \quad (7)$$

El ángulo de salida de la partícula θ_{out} se calcula con la ecuación:

$$\theta_{out} = \arctan \left(\frac{r_{aspa}^2 - (l_{aspa} - K)(\delta - \mu \cos \Omega)r_p \cos \Omega}{(l_{aspa} - K)(\delta - \mu \cos \Omega)l_{aspa} \cos^2 \Omega} \right) \quad (8)$$

Finalmente, Φ_u , el ángulo recorrido por el disco desde que el aspa recoge a la partícula hasta que ésta sale del disco, se halla con la ecuación:

$$\Phi_u = \dot{\theta}t \quad (9)$$

Etapla 2. Movimiento de la partícula por el aire y posición final en el suelo.

Esta etapa comprende desde que el gránulo de abono abandona el disco por su borde hasta que cae al suelo (Figura 2). Puede calcularse de forma aproximada la trayectoria que describe la partícula de fertilizante en el aire, empleando la siguiente aproximación (Timoshenko y Young, 1948):

$$y = g \left(\frac{4\rho_p d}{3\rho_a C_r v_{0r}} \right)^2 \left(\exp \left(\frac{3\rho_a C_r}{4\rho_p d} x_k \right) - \frac{3\rho_a C_r}{4\rho_p d} x_k - 1 \right) \quad (10)$$

donde, y es la altura a de la partícula de fertilizante a lo largo de la trayectoria; x_k la distancia horizontal desde el punto de abandono del disco y la posición final del gránulo en el suelo; g , ρ_a , C_r , ρ_d y ρ_p son constantes definidas en el Apéndice 1. La velocidad inicial de la partícula en el aire, v_{0r} , se define con:

Granule speed along the vane $\hat{x}$ is defined with equation:

$$\dot{\hat{x}}_v = \frac{(x_{v0} - K)}{2\delta} (\delta + \mu \cos \Omega)(\delta - \mu \cos \Omega)\dot{\theta} \exp((\delta - \mu \cos \Omega)\dot{\theta}t) \quad (2)$$

where, x_{v0} is the initial particle position on the vane; μ is the coefficient of granule friction with disk and vane, t the time which the granule takes to leave the disk.

Constant K and coefficient δ are given by:

$$K = \frac{\mu g \cos \Omega + g \sin \Omega - \mu r_p \dot{\theta}^2}{\dot{\theta}^2 \cos \Omega (\cos \Omega - \mu \sin \Omega)} \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\cos^2 \Omega (\mu^2 + 1) - \mu \sin \Omega \cos \Omega} \quad (4)$$

In order to calculate the time t the particle takes to leave the centrifugal disk, equation (5) is used, which presents the particle position with respect to the vane:

$$\hat{x}_v = \frac{(x_{v0} - K)}{2\delta} \left((\delta + \mu \cos \Omega) \exp((\delta - \mu \cos \Omega)\dot{\theta}t) \right) K \quad (5)$$

Replacing $\hat{x}_v$ by l_{vane} in (5), the time the particle remains on the disk is obtained. Equations (2) and (5) may be combined in order to obtain:

$$\dot{\hat{x}}_v = (\hat{x}_v - K)(\delta + \mu \cos \Omega)\dot{\theta} \quad (6)$$

The relation between the radius r of the granule position on the disk, and the particle position with respect to the vane $\hat{x}_v$ is given by equation:

$$\hat{x}_v = \frac{r}{\cos \Omega} \sqrt{1 - \left(\frac{r_p}{r} \right)^2} \quad (7)$$

The angle of the particle exit θ_{out} is calculated with equation:

$$\theta_{out} = \arctan \left(\frac{r_{aspa}^2 - (l_{aspa} - K)(\delta - \mu \cos \Omega)r_p \cos \Omega}{(l_{aspa} - K)(\delta - \mu \cos \Omega)l_{aspa} \cos^2 \Omega} \right) \quad (8)$$

Finally, Φ_u , the angle covered by the disk from the vane gathering the particle until it leaves the disk, is found with equation:

$$\Phi_u = \dot{\theta}t \quad (9)$$

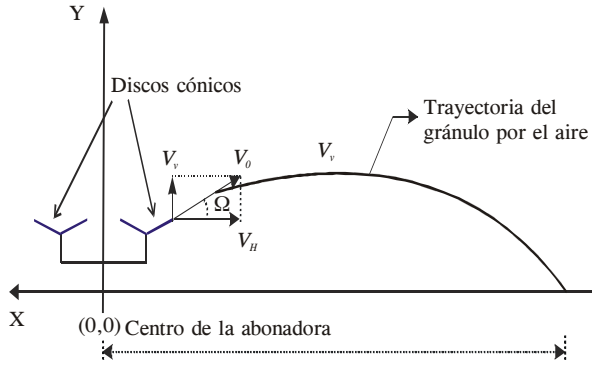


Figura 2. Trayectoria de la partícula en el aire.
Figure 2. Particle trajectory in the air.

$$\begin{aligned} v_{0r} &= v_0 - v_{m0} \\ v_{m0} &= V_m \cos(\pi - (\phi_0 + \phi_u + \theta_{out})) \end{aligned} \quad (11)$$

donde, V_m es la velocidad del tractor; ϕ_0 el ángulo inicial del gránulo tomando como referencia 0° la dirección de avance del tractor; ϕ_u el ángulo recorrido por el ángulo recorrido por el disco desde que el aspa recoge a la partícula hasta que ésta sale del disco; θ_{out} es el ángulo entre el vector velocidad y el vector radio en el extremo del disco.

Las coordenadas cartesianas de la posición final del gránulo en el suelo, x_{tot} y z_{tot} , se obtienen mediante trigonometría:

$$\begin{aligned} x_{tot} &= x_f + x_1 \mp \frac{A_d}{2} \\ z_{tot} &= z_f + z_1 \end{aligned} \quad (12)$$

Con el signo $\mp$ para los discos izquierdo (-) o derecho (+); A_d es la distancia entre los centros de los discos; x_f y z_f son las coordenadas de la posición de la partícula cuando abandona el disco. Dentro de estas ecuaciones, x_1 y z_1 se definen con:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_k \cos \theta_{out} \cos(\Phi_0 + \Phi_u) + x_k \sin \theta_{out} \cos\left(\Phi_0 + \Phi_u \pm \frac{\pi}{2}\right) \\ z_1 &= x_k \cos \theta_{out} \sin(\Phi_0 + \Phi_u) + x_k \sin \theta_{out} \sin\left(\Phi_0 + \Phi_u \pm \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

con $\pm$ para cada sentido de giro en el de las agujas del reloj (+) o en el contrario (-).

Etapa 3. Obtención de coeficientes.

El perfil de distribución de una abonadora es la masa de fertilizante que hay en una franja perpendicular a su trayectoria. Para obtener este perfil el programa divide el eje horizontal en intervalos de 1 m y determina la masa total de abono en cada intervalo; con

Phase 2: Particle movement in the air and final position on the soil.

This phase covers the trajectory since the fertilizer granule leaves the disk by its rim until it falls to the soil (Figure 2). The trajectory which the fertilizer particle describes in the air may be calculated approximately employing the following equation (Timoshenko and Young, 1948):

$$y = g \left(\frac{4\rho_p d}{3\rho_a C_r v_{0r}} \right)^2 \left(\exp \left(\frac{3\rho_a C_r}{4\rho_p d} x_k \right) - \frac{3\rho_a C_r}{4\rho_p d} x_k - 1 \right) \quad (10)$$

where, y is fertilizer particle height along the trajectory; x_k is the horizontal distance from the exit point of the disk and the final granule position on the soil; g , ρ_a , C_r , ρ_d and ρ_p are constants defined in Appendix 1. Initial particle speed in the air, v_{0r} , is defined with:

$$\begin{aligned} v_{0r} &= v_0 - v_{m0} \\ v_{m0} &= V_m \cos(\pi - (\phi_0 + \phi_u + \theta_{out})) \end{aligned} \quad (11)$$

where, V_m is the tractor speed; ϕ_0 is the initial granule angle, taking 0° tractor advance direction as reference; ϕ_u the angle covered by the angle covered by the disk, since the vane gathers the particle until it comes off the disk; θ_{out} is the angle between the disk vector and the radius vector at the disk rim.

The Cartesian coordinates of the final granule position on the soil, x_{tot} and z_{to} , are obtained by means of trigonometry.

$$\begin{aligned} x_{tot} &= x_f + x_1 \mp \frac{A_d}{2} \\ z_{tot} &= z_f + z_1 \end{aligned} \quad (12)$$

With the sign $\mp$ for left disks (-) or right disks (+); A_d is the distance between disk centers; x_f and z_f are the coordinates of particle position when leaving the disk. Within these equations, x_1 and z_1 are defined with:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_k \cos \theta_{out} \cos(\Phi_0 + \Phi_u) + x_k \sin \theta_{out} \cos\left(\Phi_0 + \Phi_u \pm \frac{\pi}{2}\right) \\ z_1 &= x_k \cos \theta_{out} \sin(\Phi_0 + \Phi_u) + x_k \sin \theta_{out} \sin\left(\Phi_0 + \Phi_u \pm \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

with $\pm$ for each turn sense of the hands of the clock (+), or contrary to it (-).

Phase 3: Obtaining of coefficients.

The fertilizer distribution profile is the fertilizer mass existing in a strip perpendicular to its trajectory. In order to obtain this profile, the program divides the horizontal axis into intervals of 1 m

esas masas construye una gráfica obteniendo el perfil de distribución.

El CV de la densidad de fertilizante en el terreno, denominado simplemente como CV en el ámbito de la distribución de fertilizante, se obtiene con el perfil de distribución, y mide la uniformidad en la distribución de fertilizante para cada valor de separación entre pasadas; esta uniformidad es mayor cuanto menor es este coeficiente. En su cálculo para cada posible distancia entre pasadas, el programa superpone el perfil de distribución y determina la varianza del perfil de distribución combinado. Se calcula el CV para esa distancia con las fórmulas:

$$C_{\text{var}} = \frac{\sigma}{\bar{X}} 100, \text{ donde } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=N-1} \left(X \left[i - \frac{N}{2} \right] - \bar{X}[n] \right)^2}{N}} \quad (14)$$

donde, N es el ancho de trabajo de la abonadora; $X[i]$ la masa de partículas que hay en cada metro una vez realizadas todas las pasadas; $\bar{X}[n]$ la masa de partículas por metro del perfil combinado.

La aplicación de optimización

Las mejores variables de la abonadora se buscan mediante varias simulaciones donde se modifican los valores de las variables que se optimizarán. Los valores iniciales de dichas variables se denominan semillas. La aplicación desarrollada puede realizar una simulación y lanzar nuevas simulaciones con nuevos parámetros obtenidos en función de los datos provenientes de simulaciones anteriores. El usuario debe indicar al programa las variables para optimizar, su intervalo de variación, y el criterio de optimización, ya que se pueden optimizar de una a varias variables. Los parámetros de las nuevas optimizaciones se buscan con el método del gradiente y los siguientes pasos:

- 1) Se genera aleatoriamente un valor inicial para cada variable que se optimizará. Se denomina semilla al conjunto de estos valores.
- 2) Se modifican ligeramente los valores de las variables de la semilla inicial sumando y restando unos pasos, y se obtiene un grupo formado por el conjunto de valores de la semilla, así como los conjuntos de valores próximos a la semilla.
- 3) Se calculan con el simulador los CV correspondientes a cada conjunto de valores.
- 4) Con el criterio de optimización se comparan los coeficientes para encontrar el conjunto de valores con el mejor CV, de acuerdo con el criterio de optimización fijado.
- 5) El proceso se repetirá partiendo de esos nuevos valores.

El programa continúa ejecutándose hasta un momento donde todas las modificaciones con pequeños aumentos de las variables a optimizar, producen un peor CV; así habrá un máximo local del CV. Dado que el proceso se repite con nuevas semillas, es muy alta la probabilidad de obtener el mejor CV o CV óptimo.

and determines the total fertilizer mass in each interval; with these masses, a graph is constructed obtaining the distribution profile.

The CV of fertilizer density in the land, simply named CV in the fertilizer distribution area, is acquired with the distribution profile, and measures the uniformity in fertilizer distribution for each separation value between rows; this uniformity is the greater, the smaller the coefficient is. In its calculation for each possible distance between rows, the program sums the distribution profiles of all passes and determines the variance of the combined distribution profile. The CV for this distance is calculated with the formulas:

$$C_{\text{var}} = \frac{\sigma}{\bar{X}} 100, \text{ donde } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=N-1} \left(X \left[i - \frac{N}{2} \right] - \bar{X}[n] \right)^2}{N}} \quad (14)$$

where, N is the work width of the fertilizer machine; $X[i]$ is the particle mass in each meter, once all the rows are finished; $\bar{X}[n]$ the particle mass per meter of combined profile.

Application of optimization

The best variables of the fertilizing machine are searched by means of various simulations where the variable values to be optimized are modified. The initial values of such variables are called seeds. The developed application may conduct a simulation and launch new simulations with new parameters obtained according to the data coming from previous simulations. The user has to indicate the variables to optimize the program, its variation interval, and the optimization criterion, since it is possible to optimize from one to several variables. The parameters of the new optimizations are searched using the gradient method and taking the following steps:

- 1) Randomly an initial value is generated for each variable that will be optimized. The set of these initial values is called seeds.
- 2) Initial seed variable values are slightly modified, adding and subtracting some steps, and a group formed by the set of seed values is obtained, as well as the sets of values nearest to the seed.
- 3) The CV corresponding to each set of values is calculated with the simulator.
- 4) Based on the optimization criterion, the coefficients for finding the set of values with the best CV are compared according to the fixed optimization criterion.
- 5) The process will be repeated starting from these new values.

The program continues being executed until the moment when all the modifications with small increments of the variables to optimize produce worse CV, thus there will be a local maximum of CV. Since the process is repeated with new seeds, the probability of obtaining better, or the best CV is very high.

The optimization criteria serve to define how to select the best CV, together with an optimization limit chosen by the user. The

Los criterios de optimización sirven para definir cómo elegir al mejor CV, junto con un límite de optimización elegido por el usuario. La aplicación busca en cada CV la máxima distancia entre pasadas que cumple el criterio y puede encontrar:

- 1) El último valor del CV que sea inferior al límite de optimización.
- 2) El primer valor del CV que sea superior al límite de optimización.
- 3) El último grupo de cinco valores consecutivos del CV que sean inferiores al límite de optimización.
- 4) El primer grupo de cinco valores consecutivos del CV con un elemento superior al límite de optimización.

Un problema del optimizador es que sólo encuentra máximos locales debido a que la aplicación informática busca el mejor CV comparando valores próximos entre sí, y por tanto los máximos que encontrará serán máximos locales. En la Figura 3 se muestra que hay máximos locales en una optimización donde se varían únicamente dos variables: el ángulo de las aspas y la velocidad angular a la que giran los discos.

La solución a este problema es realizar varias búsquedas con muchas semillas para aumentar la probabilidad de encontrar un máximo absoluto. Realizar búsquedas con varias semillas, aunque sin una certeza absoluta de llegar al máximo absoluto, aumenta considerablemente la probabilidad de llegar a éste, o se llegará a un máximo local con un buen CV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Planteamiento

Un ensayo realizado con la aplicación informática consistió en optimizar un equipo de abonado con características similares a modelos de bajo coste que están en el mercado y con discos pequeños y revoluciones de giro bajas-medias. El modelo a optimizar posee las siguientes características:

- 1) La abonadora posee dos discos distribuidores con centros separados 0.7 m.
- 2) El radio de cada disco es 0.3 m.
- 3) La velocidad de rotación de los discos es $26.67 \text{ p rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (800 rpm).
- 4) El ángulo que forman los discos con la horizontal W es 0.0873 rad .
- 5) Los discos están a una altura de 1.5 m respecto al punto de salida de la partícula en el disco.
- 6) La velocidad de avance del tractor es $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

El fertilizante usado en la simulación fue Kemira CAN 27 % N, que según Dintwa *et al.* (2004b), tiene densidad global $\rho_b = 1035 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, densidad de la partícula $1800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, y coeficiente de fricción con el plato de acero de $\mu = 0.3$.

application searches in each CV the largest distance between rows which the criterion fulfills and can find:

- 1) The last CV value being inferior to the optimization limit.
- 2) The first CV value being higher than the optimization limit.
- 3) The last group of five consecutive CV values being below the optimization limit.
- 4) The first group of five consecutive CV values with an element above the optimization limit.

One problem of the optimizer is that it only finds local maxima, due to the fact that the computerized application seeks the best CV, comparing the nearest values among each other, and therefore the maxima that it may find will be local maxima. Figure 3 shows that there are local maxima in an optimization where only two variables are altered, the vane angle and the angular speed of discs.

The solution of this problem consists in carrying out several searches with many seeds in order to increase the probability to find an absolute maximum. Conducting searches with various seeds, even though without absolute certainty to reach the absolute maximum considerably increases the probability to reach it or to arrive at a local maximum with a good CV.

RESULTS AND DISCUSSION

Approach

A trial carried out with computerized application consisted in optimizing fertilizing equipment with characteristics similar to low-cost models being on the market and with small disks and revolutions of low to medium turn. The model to be optimized has the following characteristics:

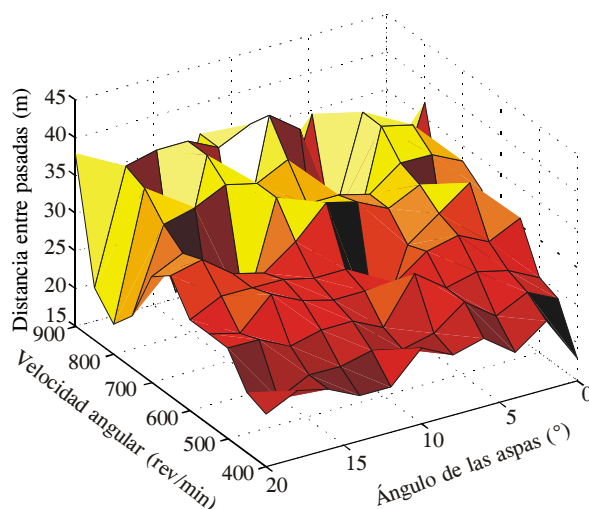


Figura 3. Máximos locales en una optimización.
Figure 3. Local maxima in an optimization

Las partículas poseen forma esférica y su coeficiente de resistencia al aire es $C_r=0.44$ (Mennel y Reece, 1963). El tamaño de los cedazos usados para hallar la granulometría de las partículas fue 1, 1.4, 2, 2.4, 2.8, 3.4, 4 y 5.6 mm; el porcentaje de la masa de partículas en cada cedazo fue 0, 0, 0.1, 2.4, 12.7, 38.8, 35.6, 10.4 y 0. Ninguna partícula atravesó los dos últimos cedazos, y ninguna se quedó sobre el cedazo con la malla más gruesa.

El orificio de alimentación tiene forma rectangular, el tractor con la abonadora se mueve a una velocidad de $2.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y la densidad del aire es $1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Las variables optimizadas en este estudio son las cuatro que definen el orificio de alimentación: abcisa y ordenada del centro de la apertura (x_{centro} e y_{centro}); y la longitud de los lados horizontales y verticales de la abertura (x_{lado} e y_{lado}). También se optimiza el ángulo de las aspas.

El criterio de optimización en este estudio es el tercero de los que posee la aplicación, es decir, el programa buscará el último grupo de cinco valores consecutivos del CV menores al límite de optimización. El límite de optimización se fijó en 12 %, por ser un valor admisible para el CV en aplicaciones agrícolas de fertilización.

RESULTADOS

En el Cuadro 1 se muestran los resultados obtenidos después de una serie de optimizaciones con la aplicación desarrollada. El mejor resultado se muestra en la primera fila del Cuadro 1 por cumplir el criterio de optimización a una distancia entre pasadas de 22 m, mientras que el resto lo cumplen sólo para distancias entre pasadas de 20 m.

Para esta anchura de 22 m, algunas de las gráficas que calcula el simulador se muestran en las Figuras 4, 5, 6 y 7. En la Figura 4 se muestra la trayectoria calculada en 150 gránulos de fertilizante que caen en el disco distribuidor. En la Figura 5 se muestra la distribución sobre el terreno de las partículas de fertilizante, cuando la máquina abonadora no se desplaza.

Cuadro 1. Variables óptimas obtenidas tras la optimización.
Table 1. Optimal variables obtained after optimization.

Distancia entre pasadas (m)	Ángulo de las aspas (rad)	x_{centro} (m)	y_{centro} (m)	x_{lado} (m)	y_{lado} (m)
22	0	0.19	-0.03	0.16	0.11
20	0.035	0.2	-0.02	0.12	0.15
20	0.209	0.19	-0.01	0.14	0.15
20	0.140	0.19	-0.02	0.14	0.12

- 1) The fertilizer machine has two distributor disks, with centers separated at 0.7 m.
- 2) The radius of each disk is 0.3 m.
- 3) Disk rotation speed is $26.67 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (800 rpm).
- 4) The angle formed by the disks with the horizontal W is 0.0873 rad .
- 5) The disks are at 1.5 m height with respect to the particle exit point on the disk.
- 6) Tractor forward speed is $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

The fertilizer used in the simulation was Kemira CAN 27% N, which according to Dintwa et al. (2004b) has global density $\rho_b=1035 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, particle density $1800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, and friction coefficient with the steel plate of $\mu=0.3$.

The particles are spherical and their resistance coefficient to air is $C_r=0.44$ (Mennel and Reece, 1963). The size of the sieves utilized to find particle granulometry was 1, 1.4, 2, 2.4, 2.8, 3.4, 4, and 5.6 mm; particle mass percentage in each sieve was 0, 0, 0.1, 2.4, 12.7, 38.8, 35.6, 10.4, and 0. None of the particles went through the last two sieves, and none of them stayed on the sieve with the thickest net.

The supply opening orifice is rectangular, the tractor with the fertilizer machine moves at a speed of $2.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and air density is $1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

The optimized variables in this study are the four that define the supply opening: abscissa and ordinate of the opening center (x_{center} and y_{center}), and length of the horizontal and vertical sides of the opening (x_{side} and y_{side}). The vane angle also is optimized.

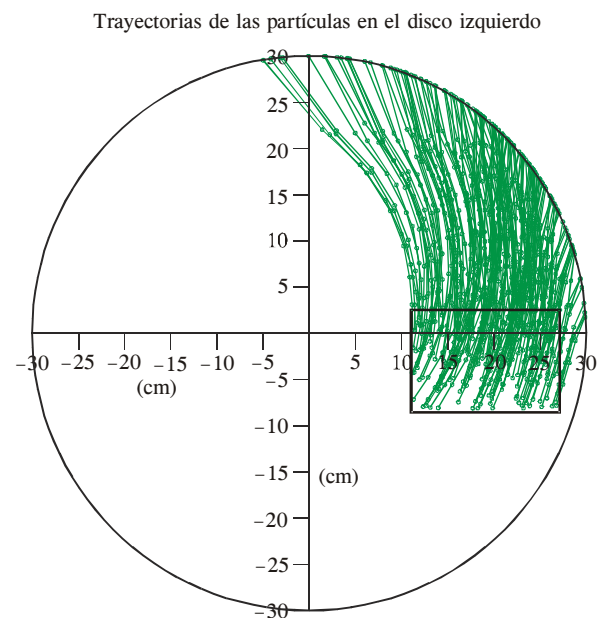


Figura 4. Trayectoria de las partículas en el disco izquierdo.
Figure 4. Particle trajectory on the left disk

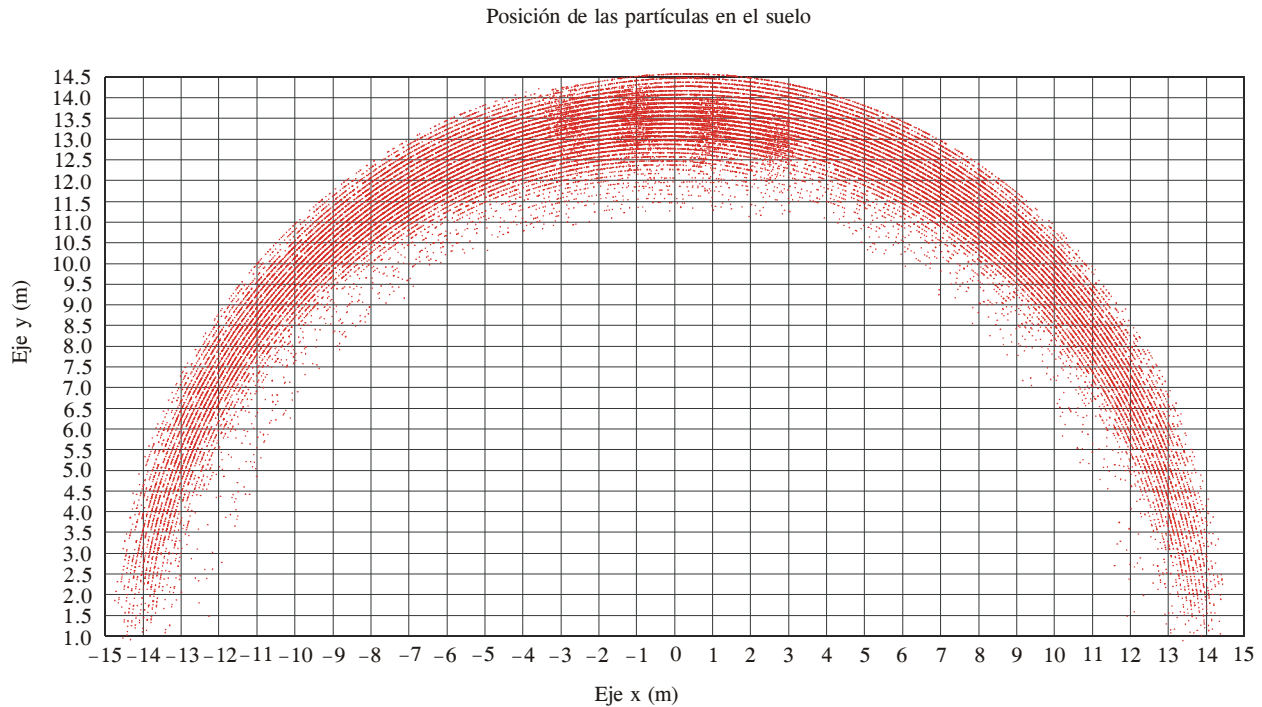


Figura 5. Distribución en el suelo de las partículas de fertilizante.
Figure 5. Fertilizer particle distribution on soil.

El perfil de distribución del equipo de abonado se muestra en la Figura 6, y el CV de la distribución en ida y vuelta en la Figura 7.

The optimization criterion in this study is the third one of the application, in other words, the program will search the last group of five consecutive CV values

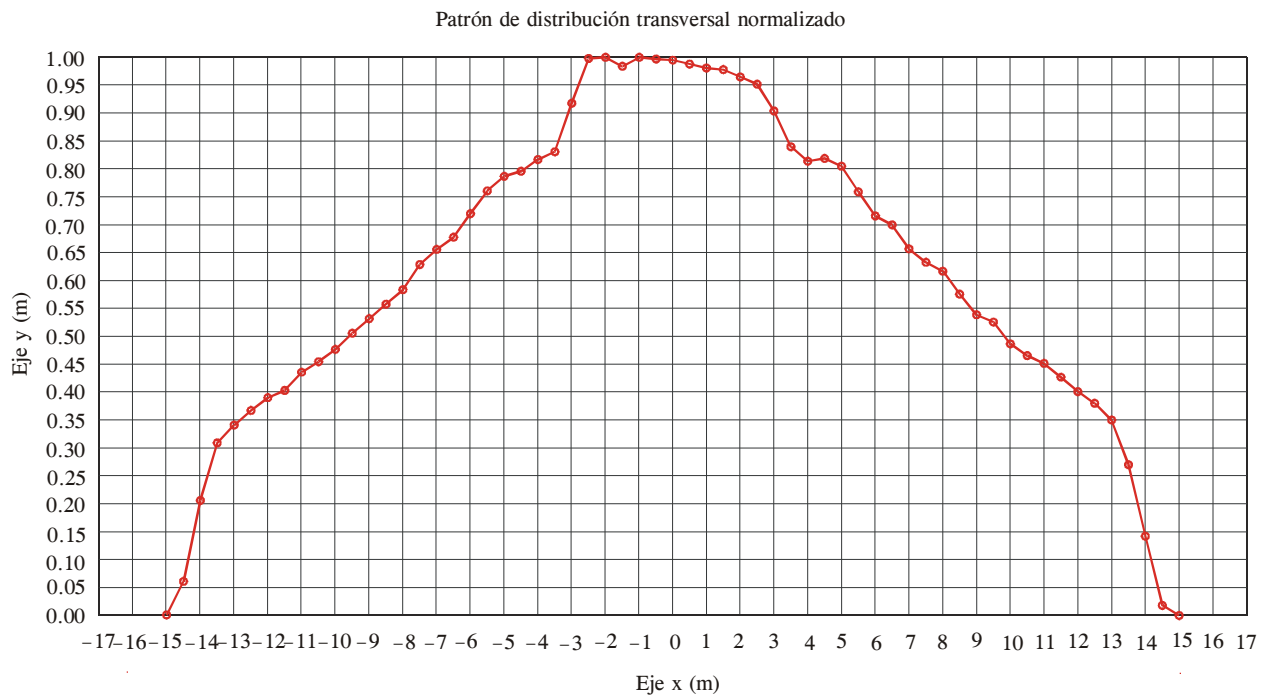


Figura 6. Perfil de distribución.
Figure 6. Distribution profile.



Figura 7. Coeficiente de variación ida y vuelta.
Figure 7. Variation coefficient coming and going.

CONCLUSIONES

Los valores óptimos de las variables de funcionamiento obtenidos analíticamente tienen CV similares a los de marcas conocidas de equipos de abonado. Los modelos SULKY DX Prisma, AMAZONE ZA-X, o KUHN AXIS tienen características de disco similares en tamaño y velocidad de rotación, y permite anchos máximos de trabajo de 24, 18, y 28 m.

Obtener experimentalmente estos resultados en una estación de ensayo es una tarea que exige mucho trabajo y recursos, mientras que con la aplicación desarrollada se obtiene resultados rápidamente. La misión de la estación de ensayo sería ajustar finamente los parámetros obtenidos con esta aplicación.

LITERATURA CITADA

- Dintwa, E., P. Van Liedekerke, R. Olieslagers, E. Tijkens, and H. Ramon. 2004a. Model for simulation of particle flow on a centrifugal fertiliser spreader. *Biosystems Eng.* 87(4): 407-415.
- Dintwa, E., E. Tijkens, R. Olieslagers, J. De Beardmaeker, and H. Ramon. 2004b. Calibration of a spinning disc spreader simulation model for accurate site-specific fertiliser application. *Biosystems Eng.* 88(1): 49-62.
- Mennel, R. M., and A. R. Reece. 1963. The theory of the centrifugal distributor III: particle trajectories. *J. Agric. Eng. Res.* 8(1): 78-84.
- Olieslagers, R., H. Ramón, and J. de Baeremaeker. 1996. Calculation of fertilizer distribution patterns from a spinning disc spreader by means of a simulation model. *J. Agric. Eng. Res.* 63: 137-152.

smaller than the optimization limit. The optimization limit was fixed at 12%, because of being an admissible value for CV in agricultural fertilizer applications.

RESULTS

The results obtained after a series of optimizations with developed application are shown in Table 1. The best result is shown in the first line of Table 1 for fulfilling the optimization criterion at a distance between rows of 22 m, while the rest fulfills it only for distances between rows of 20 m.

For this width of 22 m, some of the graphs which the simulator calculates are shown in Figures 4, 5, 6, and 7. The trajectory calculated in 150 fertilizer granules which fall on the distributor disk is shown in Figure 4. In Figure 5, the fertilizer particle distribution on the land is presented, when the machine does not move from its place. The distribution profile of the fertilizer equipment is shown in Figure 6, and the distribution go and return CV in Figure 7.

CONCLUSIONS

The best values of the operation variables analytically obtained have CV similar to those of well-known fertilizer equipment trade marks. SULKY DX Prisma, AMAZONE ZA-X, or KUHN AXIS models have disk

- Grift, T.E., and J. W. Hofstee. 2002. Testing an online spread pattern determination sensor on a broadcast fertilizer spreader. *T. of the Asabe* 45(3): 561-567.
- Swisher, D.W., S. C. Borgelt, and K. A. Sudduth. 2002. Optical sensor for granular fertilizer flow rate measurement. *T. of the Asabe* 45(4): 881-888.
- Tissot, S., O. Miserque, O. Mostade, B. Huyghebaert, and J. P. Destain. 2002. Uniformity of N-fertilizer spreading and risk of ground water contamination. *Irrig. and Drainage* 51(1): 17-24.
- Timoshenko, S., and D.H. Young. 1984. *Advanced Dynamics*. McGraw-Hill Book Co., Inc. New York, NY. 1948 p.
- Villette, S., F. Cointault, E. Pirón, and B. Chopinet. 2005. Centrifugal spreading: an analytical model for the motion of fertiliser particles on a spinning disc. *Biosystems Eng.* 92(2): 157-164. Enesad, UMR Cemagref-Enesad, Dsi-Lgap, Bp 87999, 21079 Dijon Cedex, France.

characteristics, similar in size and rotation speed, and allow maximum work width of 24, 18, and 28 m.

Obtaining these results experimentally at a test site is a task which demands a lot of labor and resources, whereas using developed application, results are obtained quickly. The mission of the test site would be, artfully adjusting the obtained parameters with this application.

Apéndice (Olieslagers *et al.*, 1996)
Appendix (Olieslagers *et al.*, 1996)

A_d	Distancia entre los centros de los discos, m.	A_d	Distance between disk centers, m.
C_r	Coeficiente de resistencia del aire.	C_r	Air resistance coefficient.
C_{var}	Coeficiente de variación de la abonadora, %.	C_{var}	Fertilizer variation coefficient, %.
d	Diámetro de una partícula, m.	d	Particle diameter, m.
g	Aceleración de la gravedad, $m\ s^{-2}$.	g	Gravity acceleration, $m\ s^{-2}$.
N	Ancho de trabajo de la abonadora, m.	N	Fertilizer machine work width, m.
l_{aspa}	Longitud de las aspas, m.	l_{aspa}	Vane length, m.
O	Punto en el eje rotacional del disco.	O	Point on disk rotation axis.
O_v	Proyección de O en el eje del aspa.	O_v	O projection on vane axis.
r	Radio de la posición del gránulo en el disco respecto del centro del mismo, m.	r	Granule position radius on the disk with respect to its center, m.
r_p	Radio del círculo tangente a las aspas, m.	r_p	Radius from the tangent circle to vanes, m.
r_{aspa}	Radio del disco.	r_{aspa}	Disk radius.
t	Tiempo, s.	t	Time, s.
v_H	Componente horizontal de v_0 , $m\ s^{-1}$.	v_H	v_0 Horizontal component, $m\ s^{-1}$.
V_m	Velocidad de la máquina abonadora, $m\ s^{-1}$.	V_m	Fertilizer machine speed, $m\ s^{-1}$.
v_R	Componente radial de v_H , $m\ s^{-1}$.	v_R	v_H Radial component, $m\ s^{-1}$.
v_T	Componente tangencial de v_H , $m\ s^{-1}$.	v_T	v_H Tangential component, $m\ s^{-1}$.
v_y	Componente vertical de v_0 , $m\ s^{-1}$.	v_y	v_0 Vertical component, $m\ s^{-1}$.
v_0	Velocidad de la partícula cuando abandona el disco, $m\ s^{-1}$.	v_0	Particle speed at leaving disk, $m\ s^{-1}$.
v_{0r}	Velocidad inicial de la partícula en el aire, $m\ s^{-1}$.	v_{0r}	Initial particle speed in the air, $m\ s^{-1}$.
x_f	Abcisa del punto por el que la partícula abandona el disco, m.	x_f	Abscissa of particle exit point on disk, m.
x_k	Distancia entre el punto de abandono del disco y la posición final del gránulo en el suelo, m.	x_k	Distance between exit point of disk and final position of granule on soil, m.
x_{tot}	Abcisa de la posición final de la partícula en el suelo, m.	x_{tot}	Abscissa of particle final position on soil, m.
		$\hat{x}_v$	Abscissa of granule on vane with respect to O_v , m.

$\hat{x}_v$	Abcisa del gránulo en el aspa respecto de O_v , m.	$\hat{x}_v$	Particle speed on vane, m s^{-1} .
$\hat{x}_v$	Velocidad de la partícula en el aspa, m s^{-1} .	x_{v0}	Initial particle position on vane, m.
x_{v0}	Posición inicial de la partícula en el aspa, m.	y	Particle height at each trajectory point, m.
y	Altura de la partícula en cada punto de la trayectoria, m.	z_f	Ordinate of particle exit point on disk, m.
z_f	Ordenada del punto por el que la partícula abandona el disco, m.	z_{tot}	Ordinate of particle final position on soil, m.
z_{tot}	Ordenada de la posición final de la partícula en el suelo, m.	α_{lv}	Inclination angle of vanes, rad.
α_{lv}	Ángulo de inclinación de las aspas, rad.	θ_{out}	Angle between speed vector and radius vector at disk rim, rad.
θ_{out}	Ángulo entre el vector velocidad y el vector radio en el extremo del disco, rad.	$\dot{\theta}$	Angular disk speed, rad.
$\dot{\theta}$	Velocidad angular del disco, rad s^{-1} .	μ	Friction coefficient between particle and disk or vanes.
μ	Coefficiente de fricción entre la partícula y el disco o aspas.	ρ_a	Air density, g m^{-3} .
ρ_a	Densidad del aire, g m^{-3} .	ρ_p	Particle density, g m^{-3} .
ρ_p	Densidad de la partícula, g m^{-3} .	σ	Typical deviation of distribution profile.
σ	Desviación típica del perfil de distribución.	Φ_0	Initial position angle of particle on disk, rad.
Φ_0	Ángulo de la posición inicial de la partícula en el disco, rad.	Φ_u	Angle covered by particle in its movement on disk, rad.
Φ_u	Ángulo recorrido por la partícula en su movimiento por el disco, rad.	Ω	Angle between vane and the horizontal plane, rad.
Ω	Ángulo entre el aspa y el plano horizontal, rad.		