

# LA TECNOLOGÍA EN LAS ABONADORAS DE PROYECCIÓN

El segundo y último artículo dedicado pone de manifiesto el mucho trabajo que aún queda por hacer en el ámbito de la tecnología de las abonadoras de proyección, una máquina que está presente en la mayoría de las explotaciones agrícolas mecanizadas.

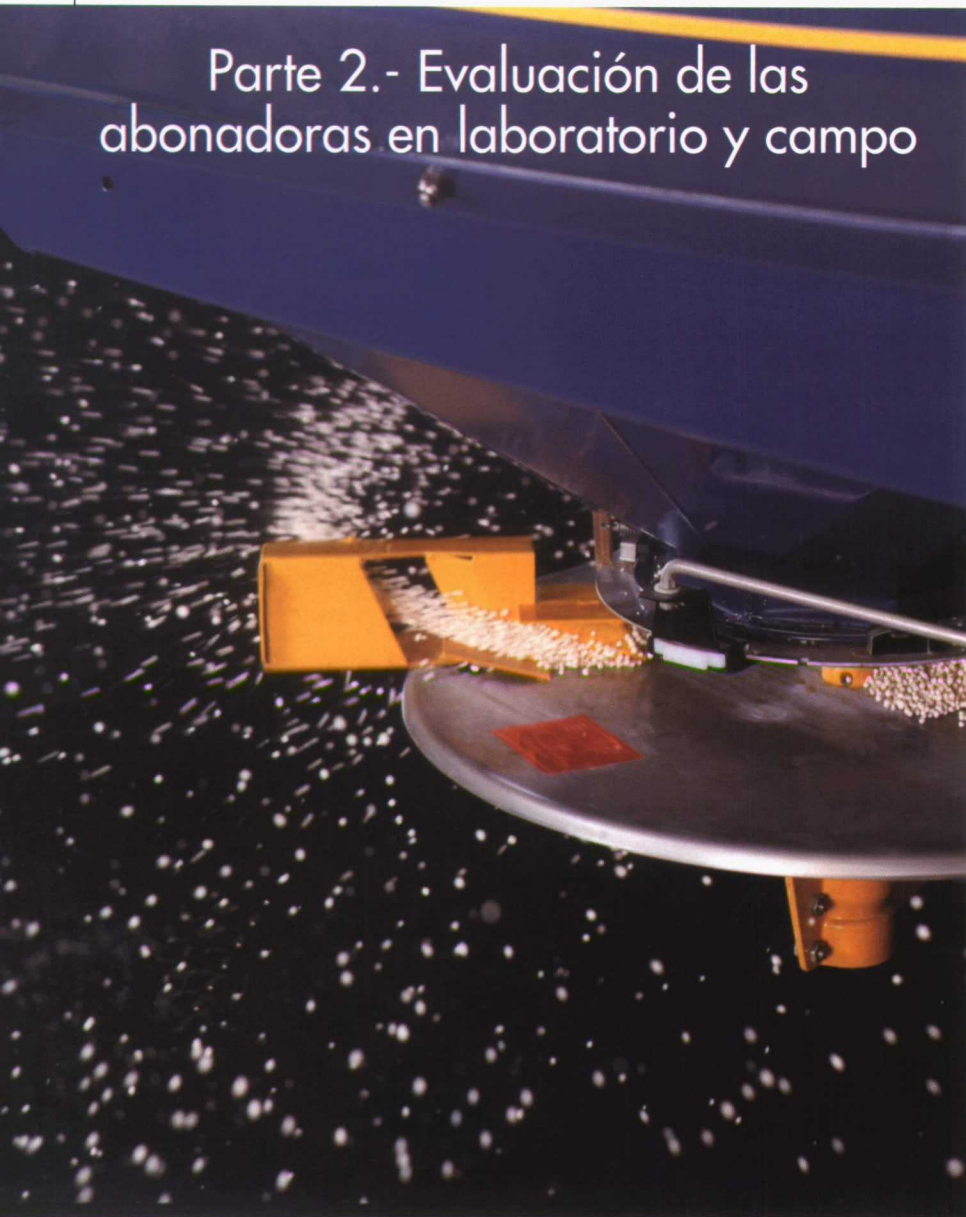
LUIS MÁRQUEZ

Con el objetivo de aumentar la capacidad de trabajo, a la vez que conseguir una fertilización diferenciada en función de las necesidades de las plantas, tomando en consideración las diferencias en las características físicas de los abonos minerales, se necesita profundizar en el conocimiento de la mecánica de los medios granulares para poder simular el comportamiento del abono. También, analizando, mediante toma de imágenes, el sistema de proyección, para reemplazar, en los límites de lo posible, los procedimientos de evaluación de las abonadoras establecidos en las normas ISO-EN.

La simulación del comportamiento dinámico de los granulos proyectados por los discos de la abonadora tiene como objetivo poder predecir las características de su flujo, lo que incluye la definición de la trayectoria, la velocidad, y la densidad de partículas a la salida del disco. A partir de estos datos, aplicando las leyes de la balística, podría calcularse su distribución en el suelo.

En el proceso de esparcido se pueden diferenciar tres etapas: la primera corresponde al descenso por gravedad de los granulos desde la tolva al disco de proyección; la segunda al movimiento de los granulos sobre el disco y las paletas por la fuerza centrífuga; la tercera al movimiento de los granulos en la atmósfera.

## Parte 2.- Evaluación de las abonadoras en laboratorio y campo



En la parte que corresponde al desplazamiento de los granulos sobre el disco, simultáneamente se encuentran decenas, e incluso centenas, de granulos, que interfieren entre sí y con el disco de esparcido, por lo que es la más difícil de simular.

Paul Van Liedekerke propone un método de simulación por elementos discretos (DEM), describiendo el sistema 'granulos-paleta' en función de las leyes físicas a la que están sometidos, las condiciones iniciales y las leyes de contacto entre los propios granulos y de estos con las paletas, pero el establecimiento de los parámetros que la definen son difícilmente cuantificables.

Para validar los modelos de simulación se proponen cámaras de video de alta velocidad, captadores de velocidad, y coronas recogedoras situadas en la periferia del disco. De forma generalizada se puede decir que hay coincidencia entre las simulaciones y los resultados experimentales, al menos en el aspecto cualitativo, lo que permite estudiar, en una primera aproximación, la influencia de determinados parámetros en la calidad del esparcido del abono.

La aplicación del sistema basado en la simulación por elementos discretos (DEM) exige tiempos de cálculo que aumentan considerablemente con el número de granulos implicados en el proceso. Así, se estima que para 10 000 partículas esféricas se necesita 30 000 segundos de tiempo de cálculo para simular

un segundo de tiempo real de funcionamiento del sistema.

Si se consideran granulos esféricos la simulación se simplifica, pero las formas de los granulos en los fertilizantes no siempre son esféricas. El modelo de simulación se puede aplicar a los abonos complejos granulados. Los fertilizantes potásicos es frecuente que tomen formas aplastadas y angulosas, muy alejados de la forma esférica. Las fuerzas de contacto que actúan tangencialmente son las que producen la rotación de los granulos esféricos, mientras que las fuerzas normales las producen sobre los granulos con formas aplastadas, por lo que el comportamiento de estos granulos no puede ser simulado con modelos esféricos. La simulación se puede abordar con granulos de tipo poliédricos con cantos redondeados, pero la complejidad y el tiempo de cálculo aumenta considerablemente. Además, las incertidumbres en la medida aumentan con la dispersión granulométrica.

El efecto de las características físicas de los granulos sobre

los resultados en la distribución del abono, obligará a mejorar el conocimiento de las propiedades de los granulos (granulometría, forma, densidad, coeficiente de rozamiento, elasticidad, etc.) para que los modelos de simulación permitan dar resultados prácticos. También es importante la toma de las muestras de abono para limitar los efectos de la segregación.

## Caracterización del flujo de las partículas que salen del disco

Una solución puede ser la utilización de una cámara numérica monocroma situada por debajo del disco de proyección, que permite obtener las imágenes de las trayectorias de los granulos en la salida (Figura 2). Estas pueden definir la velocidad de salida y la distribución angular.

La combinación del análisis geométrico de las imágenes, un algoritmo para la identificación de líneas y un modelo cinemático del movimiento de los granu-

FIGURA 2.- CAPTURA DE IMÁGENES CON LAS TRAYECTORIAS DE LOS GRÁNULOS (VILLETTE)

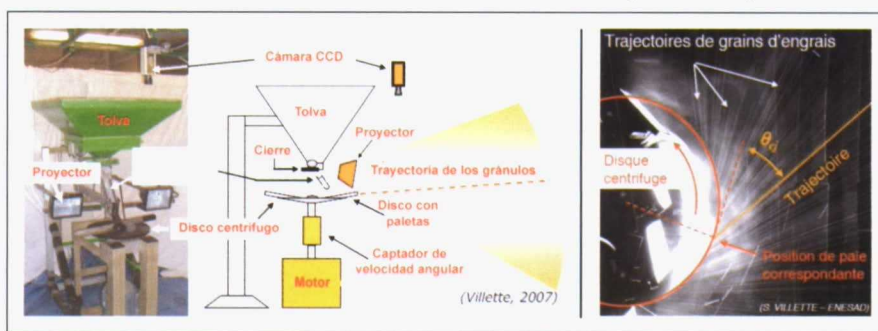
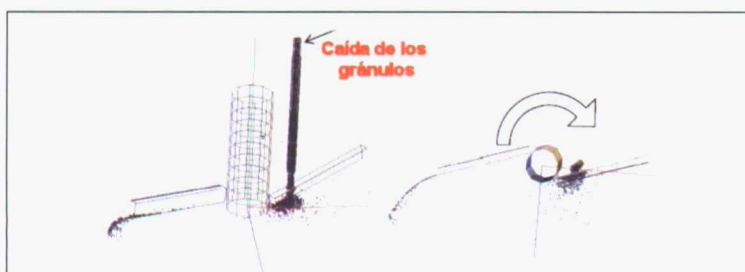
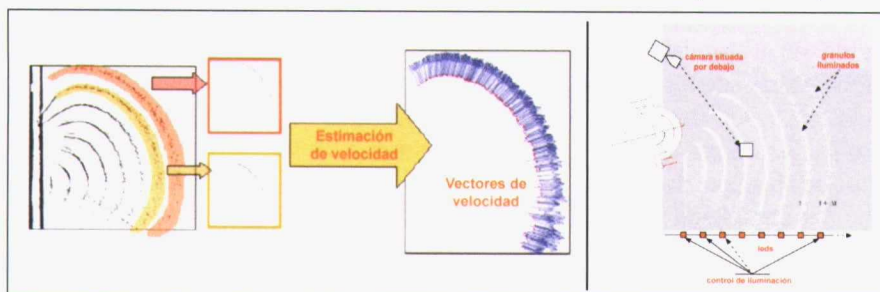


FIGURA 1.- SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LOS GRÁNULOS SOBRE EL DISCO (VAN LIEDEKERKE, 2007)



los sobre el disco permiten definir los vectores de velocidad del lanzamiento en tres dimensiones. La distribución angular del flujo del abono que sale del disco se deduce a partir de la frecuencia de detección de las trayectorias. Aunque todavía se estima que falta precisión, los resultados obtenidos en laboratorio parecen prometedores para

FIGURA 3.- CÁMARA DE ALTA RESOLUCIÓN ASOCIADA A UN ESTROBOSCOPIO PARA FIJAR TRES POSICIONES SUCEASIVAS DE LOS GRÁNULOS (VANGEYTE)



transferir este método de determinación a la puesta a punto de una herramienta de diagnóstico, asociada a un banco de ensayo de abonadoras (fijo o móvil), y al desarrollo de un captador en la propia abonadora que se integre en su sistema de regulación.

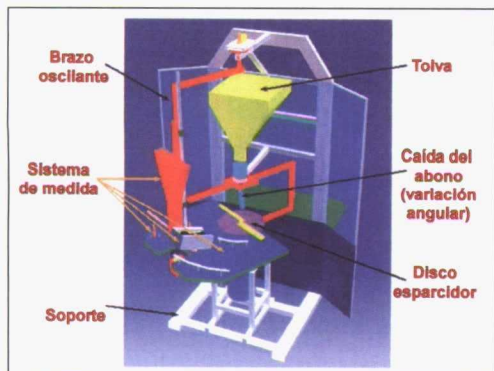
Otros investigadores trabajan para poner a punto un sistema basado en la utilización de una cámara de alta resolución, asociada a un estroboscopio, que permite recoger tres posiciones relativas de granos a la salida del disco; el dispositivo es móvil para cubrir toda la circunferencia útil del disco. El objetivo que se pretende con este sistema es el de sustituir

Asimismo se han asociado captadores ópticos de diodos para diseñar y construir una unidad de experimentación, denominada como MC2 (*Multi Compartment Characterization* – Figura 4). Inclu-

FIGURA 5.- SISTEMAS PARA DETECTAR EL HAZ DE PROYECCIÓN DE FERTILIZANTE GRANULADO



FIGURA 4.- PLATAFORMA MC2 PARA INVESTIGACIÓN APLICADA AL ESPARCIDO CENTRÍFUGO (MICLET)



el método tradicional de control de las abonadoras mediante bancos de ensayo de cajas, por la lentitud y el coste de los mismos. El sistema ya es operacional, y se intenta mejorar la precisión de la medida del diámetro de los granos.

ye una cámara digital para visualizar el comportamiento de los granos sobre las paletas, un dispositivo para la medida del ángulo de salida del gránulo y dos captadores piezoeléctricos para medir el ángulo de salida del gránulo por efecto del impacto.

ductor de que la proyección del abono mantiene el perfil de distribución a lo largo de toda la parcela, imprescindible para hacer aplicaciones de fertilizante en dosis variable según preconizan los sistemas de Agricultura de Precisión.



## El futuro de los bancos para el ensayo de las abonadoras

Los bancos para el ensayo de la uniformidad de distribución de las abonadoras han sido diseñados conforme a la norma EN 13739-2, que se deriva de la ISO 5690/1 (UNE 68088) equivalente. Con ellos se puede obtener el perfil de distribución sobre la base de la recogida del fertilizante en cajas situadas perpendicularmente a la dirección de avance del tractor con la abonadora.

Sin embrago, este banco no permite conocer la distribución real del abono sobre la parcela (dosis según el punto de caída del abono) a la vez que exige disponer de una nave diáfana climatizada, con una superpie mínima de 5 000 m<sup>2</sup>, y con aumento en su superficie a medida crece la anchura de esparcido de las nuevas abonadoras.

Piron y Miclet han construido un banco experimental en el que la abonadora se hace girar durante el proceso de esparcido, y los gránulos son recogidos en un banco con 80 cajas colocadas radialmente, que disponen de un sistema de pesada en continuo. Con los datos recibidos es posible reconstruir la distribución espacial de la abonadora con

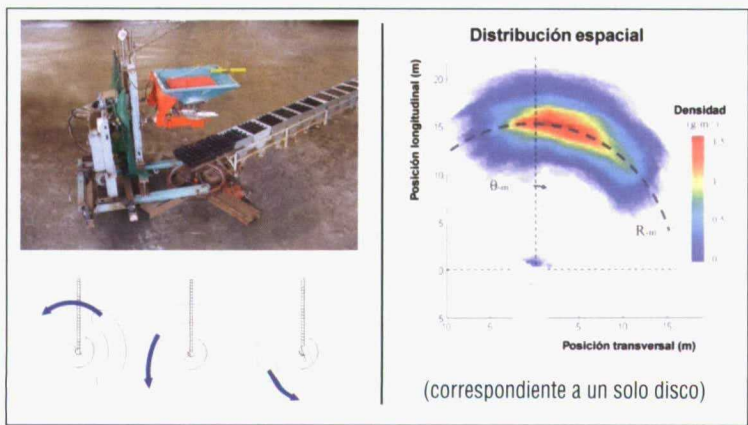


gran precisión, así como obtener el diagrama de distribución transversal que exige la norma EN. Una ventaja importante es que solo se necesita una superficie de 500 m<sup>2</sup>, a la vez que permite evaluar el sistema de modulación espacial de la dosis.

En la actualidad, algunos fabricantes de abonadoras, que disponen de instalaciones para realizar los ensayos conforme a

la norma EN-ISO, han desarrollado sistemas que permiten establecer las regulaciones más apropiadas de su máquina de forma más rápida, y sin que se necesite distribuir grandes cantidades de abono. Así, Amazone ha desarrollado una cámara circular que recoge el fertilizante lanzado por sectores de 30° adaptada a las características de sus discos esparcidos.

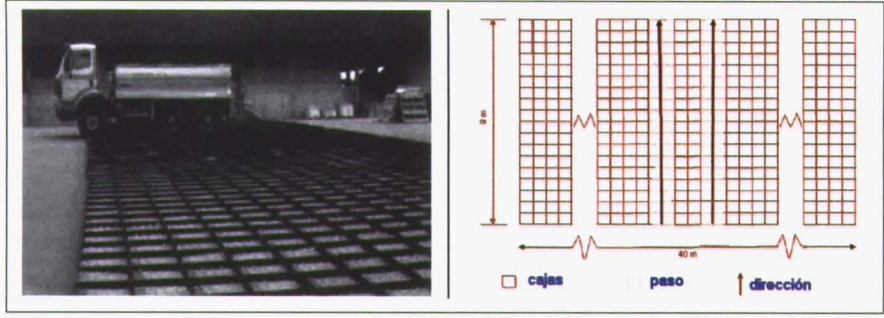
FIGURA 6.- BANCO DE ENSAYO PARA ABONADORAS (ROTACIÓN DE LA ABONADORA RESPECTO AL SISTEMA DE RECOGIDA). PIRON Y MICLET



## Estabilidad del coeficiente de variación en la pasada de la abonadora

La determinación del perfil de distribución de una abonadora utilizando la instalación definida por la correspondiente norma ISO-EN se supone que permite hacer comparaciones entre máquinas diferentes, y que si se repite el ensayo de la misma máquina, en similares condiciones de trabajo, los resultados obtenidos serían similares.

FIGURA 8.- BANCO DE RECOGIDA DE 80 CAJAS (0.5 X 0.5). LAWRENCE (NZ)



**El efecto de las características físicas de los gránulos sobre los resultados en la distribución del abono obligará a mejorar el conocimiento de las propiedades de los gránulos**

Lawrence, en un banco de ensayo que permite realizar 18 determinaciones en cada pasada, con cajas de 0.50 x 0.50 m, utilizando urea y sobre la base de 36 repeticiones, ha analizado de forma exhaustiva las diferencias obtenidas comparando distintas normas de ensayo (ISO y otras) aplicables las abonadoras de proyección. Como esparcidor ha utilizado un camión con un dispositivo de abonado de doble plato, calibrado para aplicar dosis teóricas de 80, 100 y 150 kg/ha.

Los resultados de los perfiles de distribución permiten deducir los coeficientes de variación del fertilizante recogido en las cajas que se encuentran a la misma distancia de la zona de

pasada, que se presentan en la Figura 16, junto con los perfiles de distribución obtenidos con la máquina ajustada para aplicar 80, 100 y 150 kg/ha. Se observa que los coeficientes de variación en las cajas situadas a más de 12.5 m de eje de pasada son muy elevados, y aumentan considerablemente cuando la dosis se reduce. Así mismo se detecta que los perfiles de distribución no guardan simetría; al pasar de 80 a 100 kg/ha de dosis teórica el abono recogidos en la zona central permanece constante, mientras que aumenta el abono recogido en las cajas laterales. Cuando la abonadora se regula para aplicar 150 kg/ha el perfil de distribución pierde simetría con respecto a lo que sucede con dosis más bajas.

Si se representa el perfil de distribución correspondiente a los valores medios obtenidos en

FIGURA 10.- COEFICIENTE DE VARIACIÓN CON DIFERENTES DOSIS

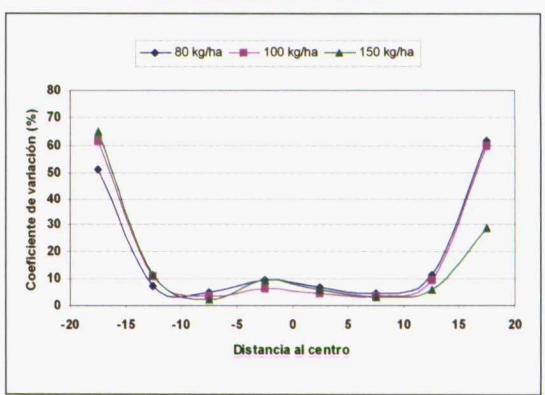


FIGURA 9.- PERFILES DE DISTRIBUCIÓN OBTENIDOS EN EL BANCO DE 80 CAJAS Y COEFICIENTES DE VARIACIÓN EN CAJAS SITUADAS A LA MISMA DISTANCIA DE LA ZONA DE PASADA (LAWRENCE)

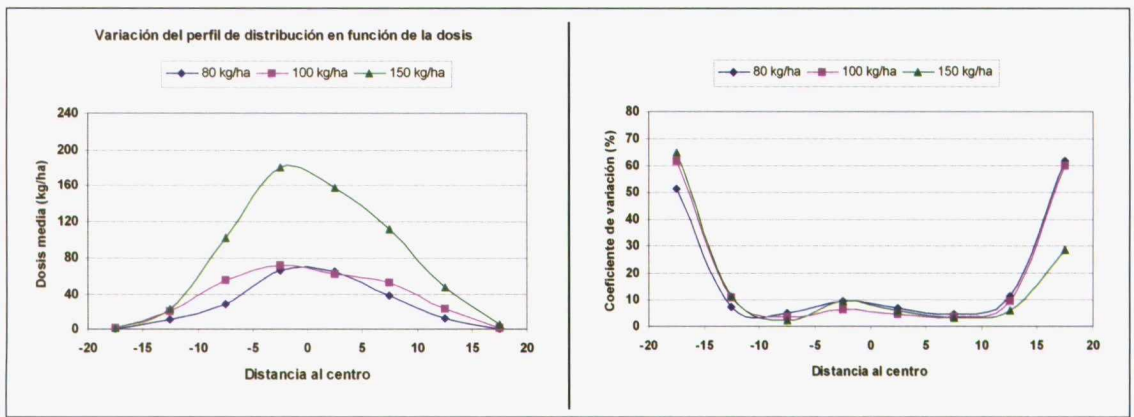
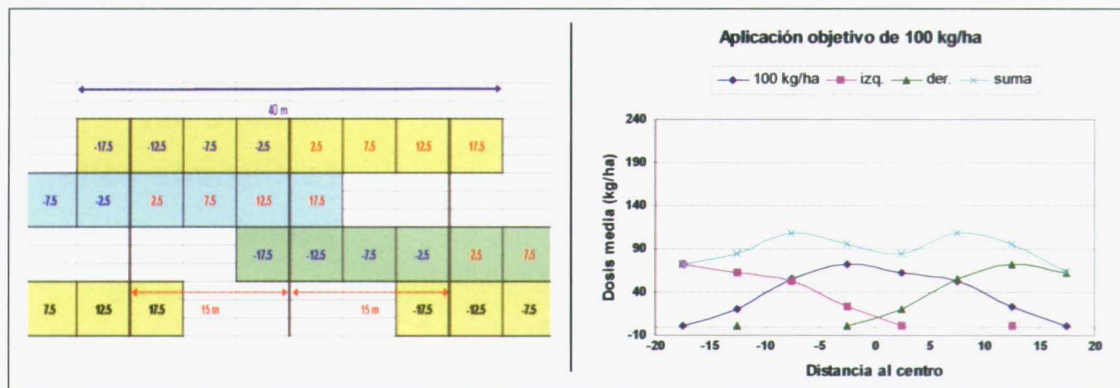


FIGURA 11.- PERFIL DE DISTRIBUCIÓN PARA 100 KG/HA CON 15 M DE ANCHURA EFECTIVA DE TRABAJO

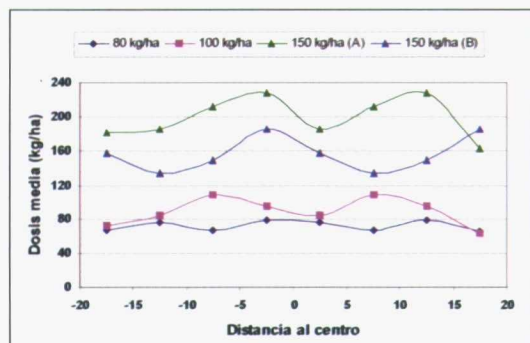


cada caja para la aplicación de 150 kg/ha, junto con los correspondientes a estos valores medios más y menos dos veces la desviación típica se observa (Figura 17) que, con el 95% del nivel de probabilidad, el abono caído en cada caja se mantiene en valores comprendidos entre la línea superior y la inferior del gráfico, lo que indica que para un valor medio de 180 kg/ha en la zona entre 0 y 5 m de la línea de pasada (lado izquierdo), pueden recibir cantidades entre 145 y 215 kg/ha. Esto obliga a reflexionar cuando pretenden aplicar dosis variables de fertilización con abonadoras centrífugas.

En cuanto a la anchura de trabajo recomendada, tomando como referencia que la anchura efectiva podría ser aproximadamente igual a la mitad de la anchura de proyección, se obtienen los correspondientes perfiles de distribución para cada una de las dosis aplicadas. Para el caso de los 100 kg/ha, contado con una anchura efectiva de trabajo de 15 m, el perfil de distribución obtenido es el que se presenta en la Figura 18.

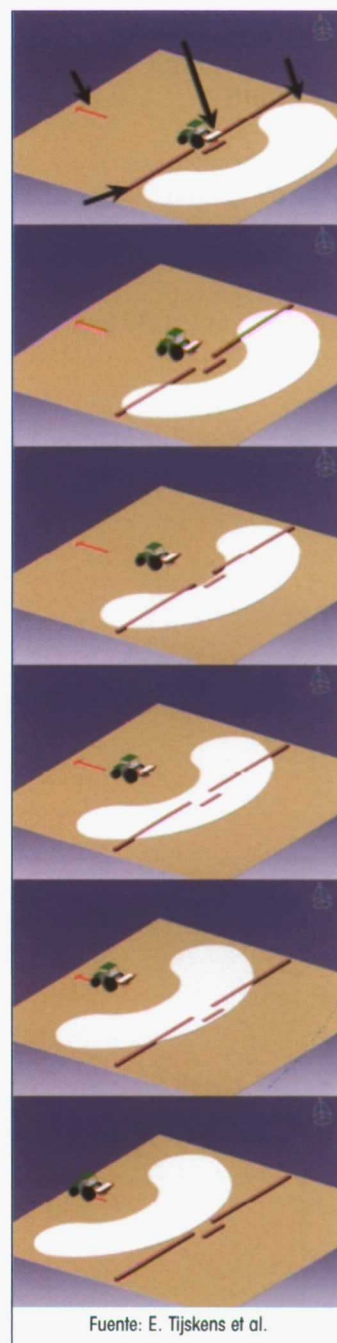
Si este cálculo se repite para 150 kg/ha con la misma anchura de trabajo de 15 m, se observa que la dosis real aumenta hasta 200 kg/ha, con un CV de 8.4%. Aumentando la anchura de trabajo hasta los 20 m, se observa que la dosis se reduce a 156 kg/ha, más próxima al objetivo previsto, aunque el CV sería del 12.75, que seguiría siendo aceptable. También aumenta la capacidad de trabajo de la abonadora.

FIGURA 12.- PERFILES DE DISTRIBUCIÓN CON DOSIS DIFERENTES



anchura	Aplicación objetivo			
	80 kg/ha	100 kg/ha	150 kg/ha (A)	150 kg/ha (B)
-17.5	67.1	72.0	181.1	157.4
-12.5	75.8	84.1	185.0	134.4
-7.5	66.5	108.7	212.5	148.5
-2.5	78.8	95.6	228.3	185.4
2.5	75.8	84.1	185.0	157.4
7.5	66.5	108.7	212.5	134.4
12.5	78.8	95.6	228.3	148.5
17.5	65.6	63.3	161.8	185.4
media	73.7	96.1	208.6	156.5
desv. st.	5.7	11.0	19.6	18.9
coef.v. (%)	7.8	11.5	9.4	12.1

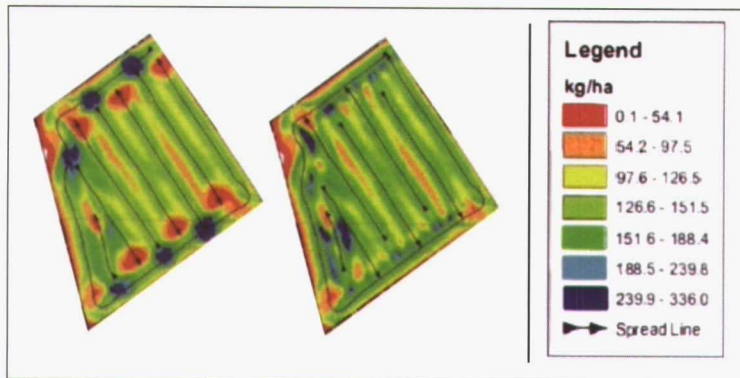
FIGURA 13.-



Fuente: E. Tijskens et al.

En la Figura 19 se representan los perfiles de distribución con las diferentes dosis, para 15 m de anchura de trabajo, ya para 20 m en el caso de la dosis mayor.

FIGURA 14.- OPTIMIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN MODIFICANDO LOS PUNTOS DE APERTURA Y CIERRE (LAWRENCE)



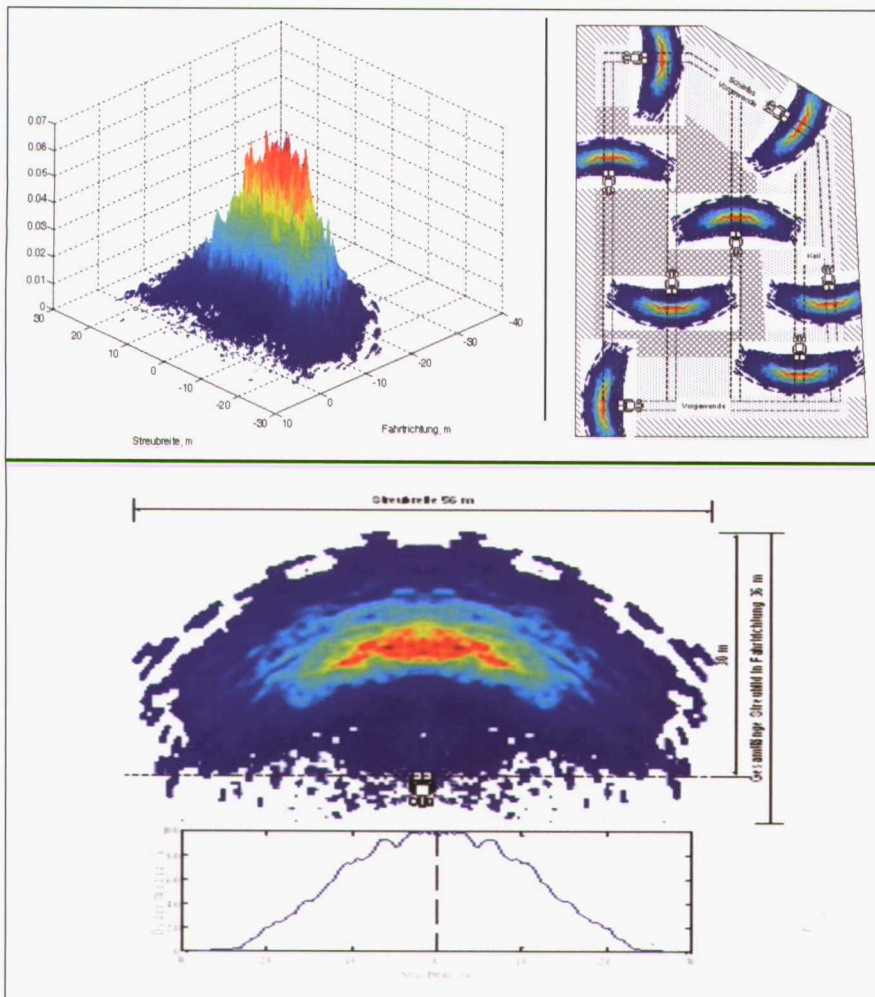
### Uniformidad de distribución en condiciones reales de campo

Es frecuente encontrar la oferta de equipos para la distribución de abonos sólidos por proyección

en los que se destaca su capacidad para esparcir un caudal proporcional al avance recurriendo a sistemas GNSS, pero en la mayoría de los casos se está olvidando e efecto que tiene sobre la uniformidad de la distribución transversal el caudal que cae sobre los ele-

**El creciente interés por la dosificación variable del fertilizante sólido aconseja actualizar los bancos de ensayo de las abonadoras**

FIGURA 15.- PERFILES DE DISTRIBUCIÓN DE UNA ABONADORA EN LABORATORIO Y CAMPO (RAUCH)



mentos de proyección, el punto de caída, las características granulométricas del abono, etc.

Considerando al adecuado solapamiento entre pasadas contiguas, calculado a partir del perfil de distribución en banco de ensayos normalizado, se podría conseguir una distribución uniforme (coeficiente de variación inferior al 15 o al 10%). Para ello, los sistemas de guiado por GNSS, tanto semiautomáticos como automáticos, permiten mantener la distancia entre pasada sucesivas.

Sin embargo las parcelas no son rectangulares y se necesita dar vueltas en los cabeceros. Si se interrumpe el esparcido al salir de la parcela y se inicia de nuevo, cuando la abonadora vuelve a la parcela, el esparcido no es uniforme transversalmente hasta que la máquina no ha superado una cierta distancia desde el cabecero (Figura 13). Lo mismo sucede cuando entra en la parcela, a no ser que se mantenga abierta la proyección del abono superando los límites de la parcela.

Con los sistemas de limitación de la fertilización en los bordes se resuelve el problema de la proyección del fertilizante en los laterales de la parcela, si se mantienen paralelos a la trayectoria del tractor con la abonadora.

Esto pone de manifiesto la dificultad para realizar una fertilización diferencial precisa con abonadoras de proyección, más aún cuando al cambiar la dosis de fertilizante puede modificarse el alcance de los gránulos.

En consecuencia, para poder llegar a optimizar la fertilización con abonos sólidos granulados será necesario integrar en el sistema de regulación de la máquina una información más completa de la que ofrece el ensayo en el actual banco normalizado, como la obtenida en un banco de ensayo como el que se presenta en la Figura 13, lo que requiere la actualización de las normas de ensayo.

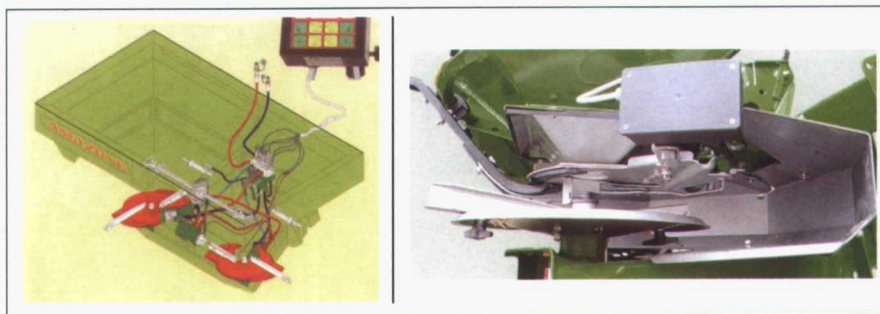
Esto permitiría optimizar la aplicación en los cabeceros, modificando los puntos de apertura y cierre de la salida del abono de la tova (Figura 14)

En esta misma línea, Rauch pone de manifiesto esta misma variabilidad considerando el perfil de distribución de la abonadora, como se puede observar en la Figura 15

Por otra parte, la aplicación diferencial de fertilizante exige que se utilicen abonadoras cuyo perfil de distribución se mantenga cuando se modifique la dosis, así como que los discos funcionen con una velocidad de rotación constante, para lo cual su accionamiento debe ser independiente de la velocidad de avance del tractor, que se consigue con tractores con transmisión CVT (continua sin escalones) o bien utilizando motores hidráulicos (Figura 16) o eléctricos (Figura 17).

Esta última opción es la propuesta por Rauch, ya que permite un cambio instantáneo de la velocidad de giro de los discos de proyección, adaptándose mejor a la fertilización diferencial que se necesita en la Agricultura de Precisión. Esto exige contar con instalación eléctrica de alta potencia en los tractores agrícolas, aunque la oferta de esta opción es muy limitada hasta el momento.

FIGURA 16.- ACCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS DISCOS DE LA ABONADORA (AMAZONE)



## Conclusiones

Las abonadoras de proyección están presentes en la gran mayoría de explotaciones agrarias mecanizadas, aunque no siempre se utilizan calibradas para conseguir una distribución superficial uniforme.

Las propiedades físicas de los fertilizantes, que pueden variar en el tiempo, influyen de forma directa en los perfiles de distribución por proyección, obligando a regular la abonadora para cada caso particular si se desea mantener la uniformidad de distribución en toda la parcela.

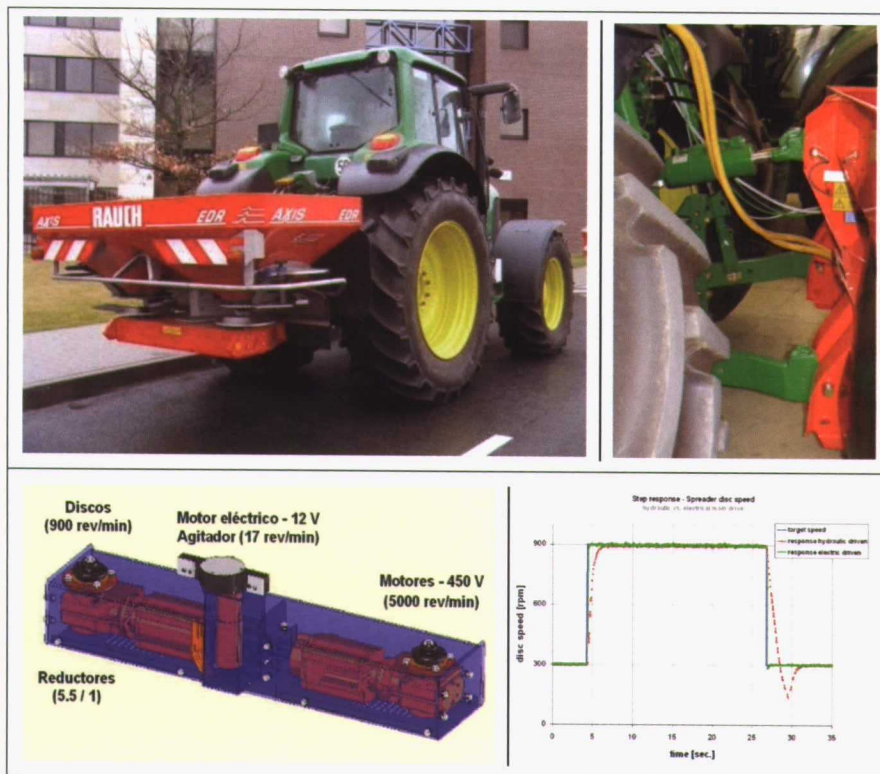
Los puntos críticos en el diseño de las abonadoras son los relativos a la dosificación del fertilizante, especialmente en los que se relaciona con el orificio de salida desde la tolva a los ele-

**Las abonadoras de proyección no siempre se utilizan calibradas para conseguir una distribución superficial uniforme**

mentos de proyección y al sistema de agitación para que no provoque la rotura del gránulo, y a los elementos de proyección, que permiten ajustar la anchura de esparcido, en ciertos límites, con independencia de la granu-



FIGURA 17.- ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO DE LOS DISCOS DE LA ABONADORA (RAUCH)



lometría del fertilizante y la dosis aplicada.

Se están desarrollando modelos matemáticos para explicar el comportamiento dinámico de los gránulos, así como dispositivos electrónicos para detectar las trayectorias que siguen a la salida de los elementos de proyección, aunque todavía no se puede proporcionar al operador

de la máquina una información en tiempo real sobre el perfil de distribución del abono en la parcela.

El creciente interés por la dosificación variable del fertilizante sólido, que demanda la Agricultura de Precisión, hace aconsejable actualizar los bancos de ensayo de las abonadoras, tomando en consideración la falta de



estabilidad que se produce en el coeficiente de variación en función de la distancia al punto de proyección, para conseguir uniformidad de la distribución sobre toda la parcela, especialmente cuando esta es de forma irregular.

El sistema de esparcido de las abonadoras de proyección es simple en apariencia, pero los resultados, al verificar el grado de uniformidad de distribución del fertilizante en campo, ponen de manifiesto que hay mucho trabajo por hacer en el ámbito de la tecnología de las abonadoras de proyección, especialmente cuando los sensores de vegetación empiezan a estar disponibles para realizar una fertilización diferencial que reduzca los costes de producción manteniendo la productividad. ■

#### BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

Lawrence, Hayden G. *Adoption of precision agriculture. Technologies for fertilizers placement in New Zealand. Tesis Doctoral. Massey University, 2007*

Miclet, D., Piron E., Heritier P., *Dynamic comportment of a fertiliser flow accelerated by centrifugal principle. II Symposium Internacional sobre el esparcido centrifugo de abonos. Montoldre (Francia). Año 2006.*

Piron E., Miclet D. *Spatial distribution measurement: a new method for the evaluation and testing of centrifugal fertiliser spreaders. II Symposium Internacional sobre el esparcido centrifugo de abonos. Montoldre (Francia). Año 2006.*

Rauch, N., *Rauch Landmaschinenfabrik GmbH. Electric drives in agricultural machinery: Experiences and visions of an implement manufacturer. Club of Bologna. Reunión Plenaria, noviembre 2010 (Bologna, Italia)*

Tijksens, E.; Van Liedekerke, P.; Piron, E.; Van Geyte, J.; Villette, S.; Ramon, H. *Recent results of experimentation and DEM modeling of centrifugal fertilizer spreading. Granular Matter, Volume 10, Number 4 / June 2008, pág. 247-255.*

Van Liedekerke, P. *Study of the granular fertilizers and the centrifugal spreader using Discrete Element Method (DEM) simulations, Tesis Doctoral. Universidad Católica de Lovaina, 2007.*