

Innovaciones aplicadas a las barras para mejorar la calidad y uniformidad del tratamiento

Especificaciones técnicas y ensayos con barras de pulverización

En este artículo se revisan las características más relevantes de las barras de pulverización, poniendo especial énfasis en los sistemas de estabilización pasivos y activos, así como su efecto sobre la calidad del tratamiento. Se estudian las diferencias entre las vibraciones verticales y horizontales revelándose éstas últimas mucho más perniciosas que las primeras, aspecto que comúnmente pasa desapercibido.



Foto 1. Barra de pulverización de John Deere.

Pilar Barreiro.

Profesora Titular. Dpto. Ingeniería Rural. ETSI agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.

Las barras de pulverización (**foto 1**) se han ido sofisticando a medida que han aumentado sus anchos, así hoy en día es posible encontrar equipos comerciales con anchuras de trabajo incluso de 45 m (90 boquillas). Las barras de pulverización se pueden clasificar atendiendo al sistema de plegado (manuales y automáticas), al procedimiento de transporte de caldo (barras secas y húmedas), y al sistema de

estabilización (pasivos, activos o con atenuación adicional de vibraciones), siendo esto último con diferencia lo más relevante.

Sistemas de plegado automático

Tal y como se ha mencionado, en los últimos diez años los pulverizadores hidráulicos han aumentado su anchura útil de trabajo drásticamente. Estos equipos están especialmente adaptados para el trabajo de empresas de servicios en las que la característica fundamental reside en ofrecer un trabajo especializado y de calidad, con una elevada capacidad de trabajo (menor coste por hec-

tárea para un mismo coste horario), y disminución de los tiempos accesorios, entre ellos la rápida adaptación a distintos tipos de tratamientos (varias boquillas montadas en dispositivos de tipo revolver y sistemas de plegado y desplegado automáticos de las barras de pulverización).

La **foto 2** muestra un equipo plegado en posición de transporte (ancho < 2,5 m) y su correspondiente apertura mediante un sistema de accionamiento hidráulico.

Barras de pulverización secas y húmedas

Una barra de pulverización se considera húmeda si la estructura soporte realiza además la función de trasegar el caldo en su interior (**foto 3**), mientras que se denomina seca, cuando se emplea un tubería exterior aneja a la estructura de la barra, siendo éstas más frecuentes que las húmedas en nuestro país.

La principal ventaja de las barras húmedas es que existen menos áreas donde pueden acumularse residuos de caldo. Además la barra húmeda, sólo ha de ser alimentada por un extremo dado que el flujo de líquido es más suave en su interior y existen menos caídas de presión en su interior. Las dos desventajas principales de las barras húmedas son su mayor coste inicial (hasta un 60% superior según datos del servicio de extensión de la Universidad de Nebraska), y el riesgo de daño debido a impactos con obstáculos durante el trabajo que pueden provocar su deformación o rotura.

Resistencia y estabilidad de las barras de pulverización

Hay dos grandes atributos a tener en cuenta a la hora de seleccionar las barras de pulverización: su resistencia y su estabilidad. La resistencia refiere la capacidad de la ba-



Foto 3. Equipo de pulverización de Berthoud plegado para transporte.

rra de mantener su integridad durante las condiciones de trabajo u operación, mientras que la estabilidad indica la viabilidad de mantener la orientación de la barra constante en relación a su objetivo, en este caso, el perfil del terreno.

A medida que aumenta la longitud de las barras de pulverización, su estructura es más compleja y reforzada para evitar flexiones (foto 4).

Para elevadas longitudes de las barras de pulverización, incluso leves deformaciones y rotaciones de la estructura pueden

provocar desplazamientos considerables de los extremos. El cuadro 1 indica las variaciones de altura de la barra de pulverización respecto al suelo en función de la longitud de la barra y para inclinaciones variables de la barra de pulverización, de acuerdo con la figura 1. Es importante resaltar que pueden obtenerse oscilaciones superiores a 70 cm, aspecto que por tanto ha de tenerse en cuenta en relación con la altura de trabajo (típicamente 50 cm).

La estabilidad de las barras de pulverización es básica, dado que estudios teóricos y experimentales indican que la distribución del producto fitosanitario puede variar de un 0% al 800% debido a la aparición de desplazamientos de distinta naturaleza en la barra de pulverización.



Foto 4. Fuente: Klein, 2004 (Servicio de Extensión de la Universidad de Nebraska).



**EL LADO SALVAJE DE LA POTENCIA.
PUMA. FABRICADOS EN AUSTRIA.**

CUADRO I.

Desnivel vertical (cm) en distintos puntos de una barra de pulverización en función de su inclinación. Fuente: Elaboración propia.

Inclinación (°)	Distancia al centro de la barra de pulverización (m)									
	-21	-15	-9	-3	0	3	9	15	21	
0,5	-18,3	-13,1	-7,9	-2,6	0	2,6	7,9	13,1	18,3	
1	-38,7	-26,2	-15,7	-5,2	0	5,2	15,7	26,2	38,7	
2	-73,3	-52,4	-31,4	-10,5	0	10,5	31,4	52,4	73,3	



Fig. 2. Detalle de la estructura de varias barras de pulverización: a) Miller N2XP; b) Hardi Campagne ECO-SOUFFLE 2009.

Sistemas de suspensión

Pasivos

Los sistemas de suspensión pasiva (péndulo o trapecio) se caracterizan por emplear un sistema de balancín que permite que la barra de pulverización pivote o rote accionada por la fuerza de la gravedad, de forma similar al procedimiento de aplomado de una vertedera. Este tipo de sistemas actúan atenuando las irregularidades del terreno. Casi todos los fabricantes ofrecen sistemas de suspensión pasivos basados en sistemas de péndulos o trapecios simples. Casi todos ellos son capaces de reducir a la mitad el movimiento vertical de la barra de pulverización comparados con el mo-

vimiento de una barra montada de forma rígida. Así por ejemplo, Kennes y colaboradores ya en 1999, indican que las desviaciones típicas de los extremos de las barras de

pulverización respecto a su posición de equilibrio se sitúan respectivamente en 44 cm, 25 cm y 27 cm para un sistema rígido, un sistema de péndulo y otro de trapecio.

Los sistemas de suspensión pasivos, actúan bien a velocidades moderadas (4 km/h) aunque son insuficientes a velocidades elevadas (superiores a 8 km/h), y de ahí que sucesivamente se hayan propuesto nuevos sistemas, como veremos más adelante.

Activos

Los sistemas de suspensión activa se caracterizan por recoger la señal de unos sensores situados en los extremos de la barra de pulverización, generalmente de ultrasonidos, que determinan la altura de la barra de pulverización respecto al suelo comparándola con el valor de consigna (valor deseado) y en función de la diferencia o error, un controlador envía una señal a un actuador hidráulico o eléctrico que desplaza la barra de pulverización para adaptarse al perfil del terreno. Están especialmente indicados en casos de pendiente transversal en el terreno, situación que no puede ser compensada por los sistemas pasivos anteriormente mencionados.

La figura 2 muestra cuatro procedimientos clásicos de actuación en los sistemas de suspensión activa. En todos ellos la dinámica de control es similar.

La calidad de los sistemas activos depende de lo optimizado que esté el algoritmo de control (selección del orden, polos y ceros), siendo más importante esta optimización para elevadas velocidades de avance.

Amortiguación adicional de vibraciones

Las vibraciones en las barras de pulverización están inducidas por las irregulari-

FIGURA 1

Efecto de la inclinación vertical de la barra de pulverización (roll). Fuente: Deprez y colaboradores, 2003.

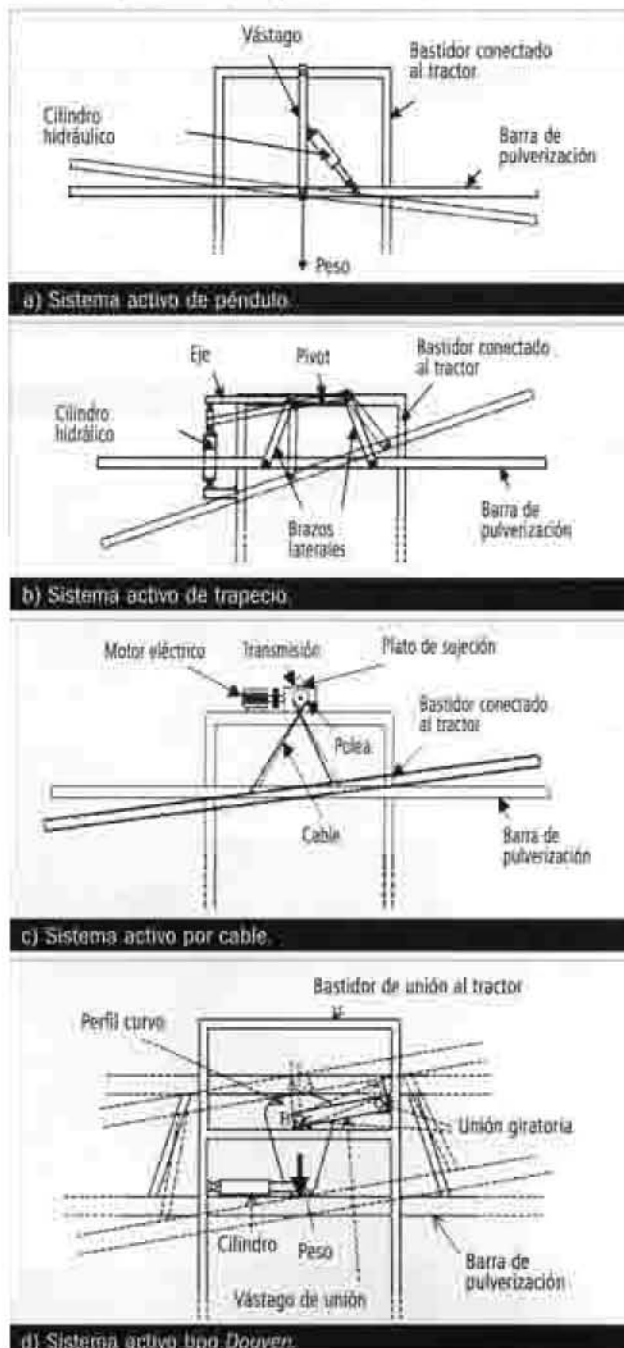


dades del terreno que se transmiten desde los neumáticos a través del tractor, que actúa como un filtro. A las frecuencias propias del tractor, las vibraciones se amplifican, mientras que en otras frecuencias las vibraciones se atenúan. Lamentablemente, las frecuencias propias del tractor se encuentran mu

FIGURA 2

Esquema de los cuatro procedimientos más empleados en la suspensión activa de barras de pulverización: péndulo, trapecio, cable accionado y *Douven*;

Fuente: Adaptado de Deprez y colaboradores, 2003.



próximas a las de las barras de pulverización, por lo que este efecto resulta muy significativo.

Las vibraciones más importantes que afectan el patrón de distribución del fitosanitario son debidas al movimiento de rotación respecto al eje que se alinea con la velocidad de avance (*rolling*) y que redundan en desplazamientos en el plano vertical, así como a dos tipos de vibraciones en el plano

FIGURA 3

Posibles fluctuaciones de las barras de pulverización debidas a procesos de vibración. Fuente: Anthonis y colaboradores, 2005.

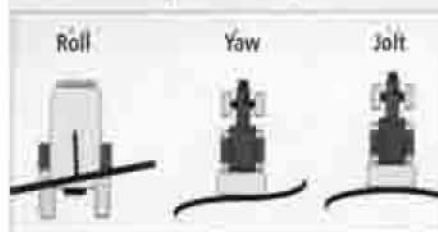
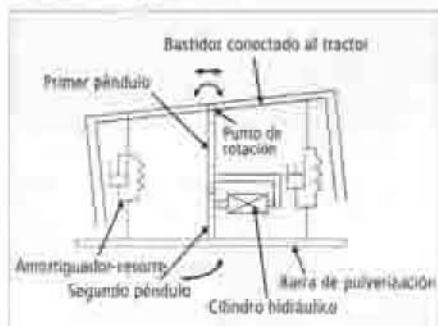
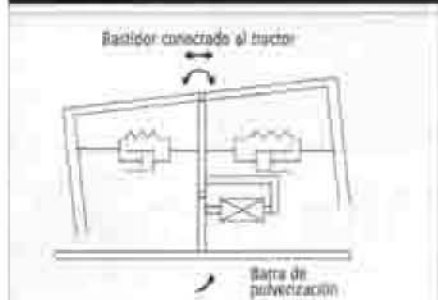


FIGURA 4

Sistema de absorción de vibraciones verticales y horizontales en un péndulo doble, evaluado en una barra de pulverización John Deere de 39 m de longitud. Fuente: Anthonis y colaboradores, 2005.



a) Sistema de atenuación de vibradores verticales.



b) Sistema de atenuación de vibradores horizontales.

horizontal (*yawing and jolting*, desplazamientos anti-simétricos y simétricos respectivamente, **figura 3**).

Aunque casi todos estos tipos de vibraciones (*rolling, yawing and jolting*) pueden ser modelizados mediante filtro de paso bajo de segundo orden, difieren enormemente desde un punto de vista práctico, especialmente en lo que se refiere a las frecuencias de corte y el procedimiento de control de los elementos de amortiguación. Así, cuanto menor es la frecuencia de corte, menores son las vibraciones transmitidas desde el tractor hasta la barra de pulverización, pero más lenta resulta ser la respuesta de la barra de pulverización a la hora de colocarse paralela al perfil del terreno.

De acuerdo con estudios experimentales el efecto de las vibraciones verticales redundan en variaciones de dosis entre el 85% y el 140% (sobre una base de 100%), mientras que las vibraciones horizontales son mucho más importantes alcanzándose dosis nulas en un extremo, y en el otro extremo valores superiores al 300% (algunos incluso citan un 800%). En dichos estudios se indica que los sistemas de suspensión activa son mucho más eficaces en la supresión de las vibraciones horizontales que los sistemas pasivos.

La causa de la mayor influencia de las vibraciones en el plano horizontal sobre la dosis se debe al efecto que provocan sobre las variaciones en la velocidad de avance de las boquillas, que a su vez redundan en variaciones de la dosis en la dirección de avance. Así, mientras que el extremo de la barra de

De acuerdo con estudios experimentales el efecto de las vibraciones horizontales es mucho más importante que el de las verticales alcanzándose dosis nulas en un extremo, y en el otro extremo valores superiores al 300%.

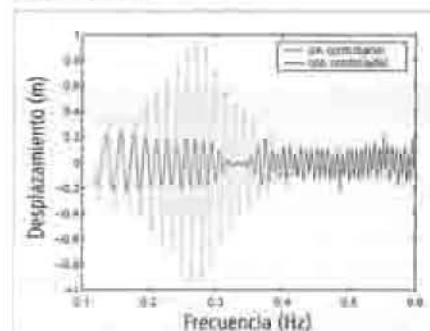
pulverización que se desplaza hacia delante muestra una mayor velocidad (menor dosis aplicada), el extremo de la barra que se desplaza hacia atrás disminuye su velocidad de avance (mayor dosis aplicada).

Una solución todavía más avanzada que las descritas para eliminar las vibraciones de la barra de pulverización es el empleo de un doble péndulo o un doble trapecio junto con unos amortiguadores de vibración en el plano vertical y horizontal (**figura 4**), de manera que el primer péndulo o trapecio actúa como una suspensión pasiva respecto a irregularidades del terreno, los amortiguadores absorben las vibraciones que se transmiten desde el tractor, y el segundo péndulo o trapecio es accionado mediante un cilindro hidráulico (suspensión activa), para adaptarse al perfil del terreno.

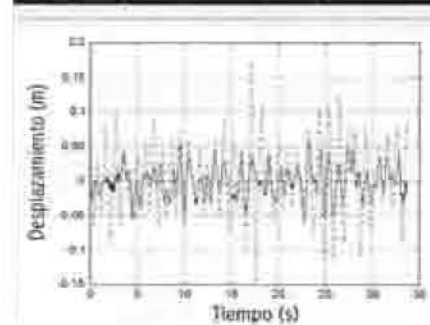
Otra solución propuesta por Anthonis y colaboradores en 2003, implica la creación de un sistema activo de aislamiento de la

FIGURA 5

Efecto de los controladores en la eliminación de vibraciones.



a) Comparación de un sistema activo respecto a un sistema sin controlador (Deprez y colaboradores, 2002).



b) Efecto de aislamiento activo para una supresión adicional de las vibraciones (Anthonis y colaboradores, 2003).

barra de pulverización respecto al tractor. Para ello emplea dos acelerómetros estratégicamente colocados sobre el chasis de la barra que envían la señal a un sistema de control capaz de actuar sobre un sistema de suspensión activa provocando una intensa eliminación de las vibraciones. La **figura 5**, muestra como los distintos procedimientos pueden reducir los desplazamientos de la barra de pulverización de ± 80 cm a ± 5 cm. Este último rango hace viable trabajar con alturas de la barra de pulverización incluso inferiores a 50 cm, especial-

mente indicadas para realizar tratamientos de baja deriva en caso necesario.

Bancos de ensayo

Desde 1987 a 2007 se han descrito no menos de cinco tipos distintos de procedimientos de ensayo, algunos de ellos actúan sobre el conjunto tractor barra de pulverización, mientras que recientemente se ha desarrollado un banco de ensayo en el que se monta la barra. Este banco permite provocar vibraciones controladas en el plano

vertical y horizontal, análisis en un amplio rango de velocidades de avance y determinaciones de las poblaciones de gotas y su distribución espacial mediante un sistema láser de tipo Doppler.

Un aspecto muy importante en este trabajo es que se demuestra la necesidad de realizar estudios dinámicos exhaustivos para los distintos tipos de boquillas, dado que éstas afectan enormemente a la calidad de la distribución en condiciones variables de intensidad de vibración y de velocidad de avance. ●

BIBLIOGRAFÍA

Anthonis, J.; Audenaert, J.; Ramon, H.; 2005. Design Optimisation for the Vertical Suspension of a Crop Sprayer Boom. *Biosystems Engineering* 90 (2): 153-160.

Anthonis, J.; Ramon, H.; 2003. Design of an active suspension to suppress the horizontal vibrations of a spray boom. *Journal of Sound and Vibration* 266: 573-583.

Deprez, K.; Anthonis, J.; Ramon, H.; 2003. System for vertical boom corrections on hilly fields. *Journal of Sound and Vibration* 266: 613-624.

Deprez, K.; Anthonis, J.; Ramon, H.; Brussel, H. Van; 2002. Development of a Slow Active Suspension for Stabilizing the Roll of Spray Booms. Part 1: Hybrid Modelling. *Biosystems Engineering* 81 (2): 185-191.

Deprez, K.; Anthonis, J.; Ramon, H.; Brussel, H. Van; 2002. Development of a Slow Active Suspension for Stabilizing the Roll of Spray Booms. Part 2: Controller Design. *Biosystems Engineering* 81 (3): 273-279.

Kiehl, R.N.; 2004. Spray Boom Set-up on Field Sprayers. NebGuide, University of Nebraska.

Lardoux, Y.; Sinfort, C.; Entfält, P.; Sevilla, E.; 2007. Test Method for Boom Suspension Influence on Spray Distribution, Part I: Experimental Study of Pesticide Application under a Moving Boom. *Biosystems Engineering* 98 (1): 29-39.