

Modelación mediante la dinámica de los fluidos por computadora (CFD) de la corriente de aire de un pulverizador agrícola con ventilador centrífugo

Simulation by means of dynamics of having flowed by computer (CFD) the current of air an agricultural sprayer with fan centrifuges

Mario Ignacio Herrera Prat¹, Armando Eloy García de la Figal Costales², Héctor de las Cuevas Milán³
y Mauri Martins Teixeira⁴

RESUMEN. La utilización de pulverizadores auxiliados de corriente de aire para la aplicación de defensivos agrícolas constituye una necesidad en el control de plagas en frutales. Los pulverizadores que transportan la gota de pesticida con corriente de aire, son los que mayores pérdidas presentan. El proceso es complejo al combinar el tamaño de la gota y la aerodinámica de la corriente de aire en interacción con las condiciones del clima y con el movimiento del pulverizador. La dinámica de fluidos por computadora (CFD) constituye una herramienta valiosa para el análisis y estudio de la corriente de aire, permite visualizar el fenómeno y la variación de forma sencilla de las condiciones de experimentación. Se estudiara la aerodinámica de la corriente de aire del pulverizador “MARTIGNANI” que utiliza el ventilador centrífugo “MAJOR” que distribuye su aire en cuatro salidas. A partir de la velocidad del aire en las salidas y su distribución se procedió a la simulación de la corriente de aire. Se estudió el efecto en la corriente de aire del movimiento del pulverizador “MARTIGNANI” a velocidades de 2,18; 4,5 y 6,35 km/h. Se caracteriza la aerodinámica del pulverizador y los regimenes de trabajo más racionales a emplear.

Palabras clave: pulverizador, velocidad de trabajo, corriente de aire.

ABSTRACT. The use of aided sprayer of current of air for the application of defensive agricultural it constitutes a necessity in the control of plagues in fruit-bearing. The spraying machines that transport the pesticide drop with current of air are those that lost adults present. The process is complex when combining the size of the drop and the aerodynamics of the current of air in interaction with the conditions of the climate and with the movement of the sprayers. The dynamics of having flowed by computer (CFD) it constitutes a valuable tool for the analysis and study of the current of air, it allows to visualize the phenomenon and the variation in simple way of the experimentation conditions. The aerodynamics of the current of air of the sprayer “MARTIGNANI”, that uses the centrifugal fan “MAJOR” that distributes its air in four exits, was studied. Starting from the speed of the air in the exits and their distribution will proceed to the simulation of the current of air. The effect was studied in the current of air of the movement of the sprayer “MARTIGNANI” for speeds of 2,18, 4,5 and 6,35 km/h. It is characterized the aerodynamics of the sprayer and the most rational work regimes to use.

Keywords: spraying machine, work speed, current of air.

Recibido 14/06/09, aprobado 21/07/10, trabajo 43/10, investigación.

¹ Dr.C., Prof. e Inv. Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana-CEMA, La Habana, Cuba, E-✉: herrera@isch.edu.cu

² Dr.C., Prof. e Inv. Titular, Universidad Agraria de La Habana-CEMA, La Habana, Cuba.

³ M. Sc., Inv. Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana-CEMA, La Habana, Cuba.

⁴ Dr.C., Prof., Universidade Federal de Viçosa, MG., Brasil.

⁵ La mención de marcas comerciales de los equipos, instrumentos o materiales específicos obedece únicamente a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos por la dirección de la revista, la que tampoco se responsabiliza con los criterios emitidos con relación a productos de determinada firma comercial.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de defensivos químicos con pulverizadores en el control de plagas es una de las operaciones agrícolas que requiere de gran precisión, para evitar la contaminación del medio ambiente y la afectación de la salud humana por aplicaciones incorrectas. El proceso tecnológico de los pulverizadores agrícolas es complejo. En éste interviene la corriente de aire producida por el ventilador que transporta la gota de pesticida al árbol y el espectro de diámetro de estas gotas. La corriente de aire realiza su trabajo en diferentes condiciones de temperatura y velocidad del aire, a lo cual se añade la velocidad del movimiento del equipo en su labor. El estudio de la corriente de aire se torna difícil por lo característica de los estudios aerodinámicos, siendo la dinámica de los fluidos por computadora (CFD) una herramienta valiosa que permite el análisis de los chorros planos, por lo que su aplicación puede apoyar la experimentación y el diseño de la aerodinámica del ventilador, la corriente de aire y el espectro de gotas.

La corriente de aire en los pulverizadores agrícolas ha sido estudiada a partir de la teoría del chorro plano turbulento de Abramovich (1963); otros autores han perfeccionado su teoría con el fin de concebir la corriente de aire más eficiente a partir del diseño de los ventiladores. Herrera *et al.* (2002) concluye que la velocidad de movimiento del pulverizador en las operaciones de trabajo influye en las características aerodinámicas de la corriente de aire y de hecho en la calidad de su trabajo. El estudio de la corriente de aire modelado por la dinámica de fluido con computadora ha sido abordado por diferentes autores como base para la utilización racional de los pulverizadores (Xu *et al.*, 1998; Sidahmad & Brown, 2001). La modelación en específico de la corriente de aire, validando modelos lo aborda Delele *et al.* (2004); por otro lado Herrera (2006), aplica el CFD al pulverizador HATSUTA 420, comprobando los resultados experimentalmente. En Herrera (2007), se demuestra la influencia del movimiento del tractor en la aerodinámica de la corriente de aire.

A partir de la velocidad del aire en las salidas y su distribución se procede a la simulación de la corriente de aire, estudiando el efecto en ésta del movimiento del pulverizador "MARTIGNANI" a velocidades de 2,18; 4,5 y 6,35 km/h. Se caracteriza la aerodinámica del pulverizador y los regímenes de trabajo más racionales a emplear. Los resultados se presentan en referencia a las dimensiones y posición de las plantas del cultivo de la naranja en el proceso de trabajo del pulverizador, lo que permite la determinación de los parámetros geométricos y cinemáticos de la corriente de aire con relación al árbol en el proceso de pulverización. Estos resultados permitirán establecer los valores de velocidad para utilizar el pulverizador en plantaciones de cítricos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó como maqueta experimental el pulverizador MARTIGNANI, el cual posee un ventilador centrífugo modelo "MAJOR" con doble aspiración y cuatro salidas de aire dos inferiores y dos superiores montadas en una torre (Figura 1).



FIGURA 1. Pulverizador MARTIGNANI.

Para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes por el método de elementos finitos se empleó el programa de CFD ANSYS 11. La simulación se basa en la teoría del chorro plano libre, clasificado dentro de la categoría de los flujos que no circulan entre paredes rígidas y que sale de un orificio dentro de un ambiente en reposo o en movimiento. Los flujos libres se pueden trabajar por las ecuaciones de la capa límite y el perfil de Schliting (1972) para determinar las velocidades en el espesor del flujo. Las ecuaciones diferenciales para el movimiento en el plano son:

a) Ecuación de momento:

$$\frac{dv}{dt} + v \frac{dv}{dy} + w \frac{dw}{dz} := \frac{I}{\rho} \frac{dt}{dz}$$

b) Ecuación de continuidad:

$$\frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} := 0$$

El análisis de CFD se realiza a partir del perfil de velocidades del aire a la salida del difusor y la geometría de ésta. Los datos de velocidad del aire utilizados en la simulación son resultados de mediciones experimentales referidas en el trabajo Herrera (2009).

En este caso se trata de la modelación de la corriente de aire del pulverizador MARTIGNANI con la finalidad de de-

terminar la distribución en un plano horizontal de la corriente de aire que pasa por el centro del ventilador y que nace en el perfil de velocidad que se origina en el punto número 16 de la salida del difusor del ventilador (ver Figura 2). La modelación se efectúa considerando el pulverizador sin movimiento y a tres velocidades de trabajo del mismo (2,18; 4,16 y 6,35 km h⁻¹), con el objetivo de observar los cambios en la aerodinámica de la corriente analizando, la distribución de la velocidad y su posición. El régimen de trabajo escogido en el ventilador para la simulación es de 2 100 rpm, la cual es entregada por un motor auxiliar al ventilador.

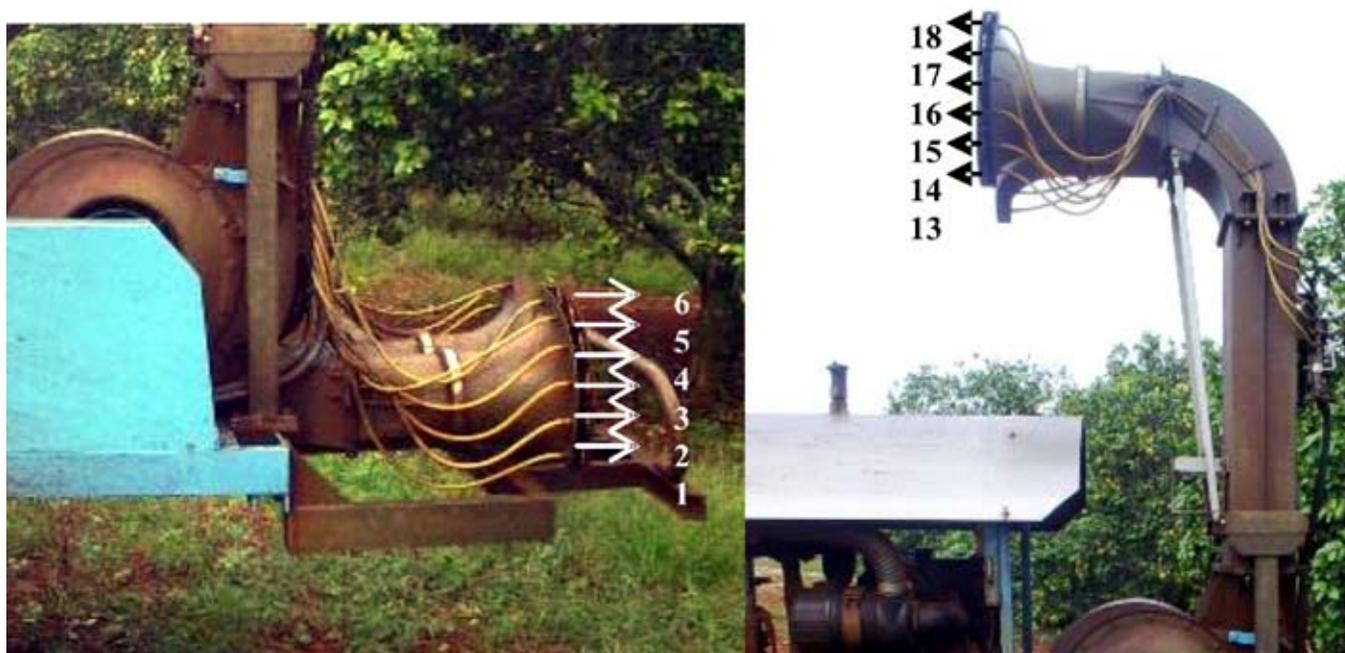


FIGURA 2. Puntos de medición de la velocidad del aire a la salida del difusor del pulverizador.

Dimensiones y propiedades

Los valores de distribución de la velocidad del aire en el punto 16 escogido a la salida del difusor superior (ver Figura 2), así como las condiciones del experimento se obtienen del trabajo Herrera, (2009) y se muestran en la Tabla 1.

Dominio computacional

Para la corrida del programa se crea un dominio computacional, donde se mueve el fluido (ver Figura 3); en este elemento

se realiza el enmallado que define los nodos para el desarrollo de las ecuaciones del programa. En el dominio computacional se colocan las condiciones de velocidades iniciales en el plano de salida del difusor seleccionado en el pulverizador y el ancho de salida del difusor (ver Tabla 1). En las paredes laterales del dominio se considera la velocidad del aire cero, ya que representa el aire tranquilo donde se inserta la corriente y en el fondo del dominio no se aplican valores de velocidad para que el flujo se desarrolle libremente.

TABLA 1. Dimensiones y propiedades

DIMENSIONES Y PROPIEDADES	VALOR		
	Posición	a	b
Distribución de la velocidad del aire, m/s	Superior (16)	55,57	59,41
Ancho de la salida de aire en el ventilador; mm		50	
Uniformidad de la velocidad del aire a la salida del ventilador		0,91	
Densidad del aire, kg/m ³		1,187	
Viscosidad, kg/m ⁻⁵		1,8135x10 ⁵	

Nota: a y b –secciones de mediciones correspondientes al punto 16.

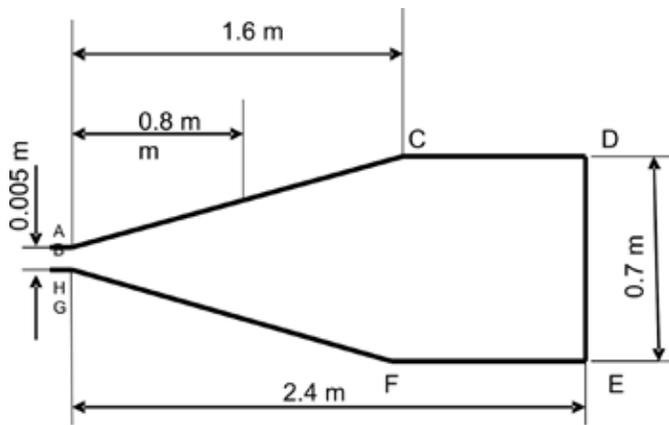


FIGURA 3. Elemento computacional para el modelado de la corriente de aire del pulverizador MARTIGNANI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

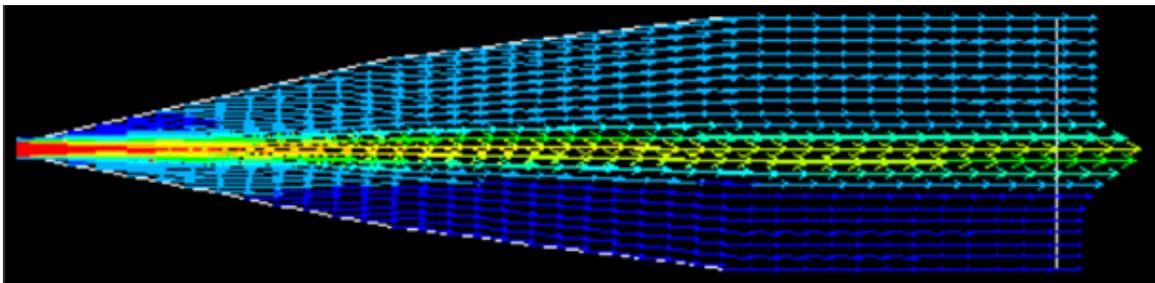
En la Figura 4 se observan las gráficas de la corriente de aire modelados en CFD para los distintos regimenes de trabajo a estudiar; el pulverizador sin movimiento de traslación y con velocidad de trabajo de 2,18; 4,16 y 6,35 km/h. El pulverizador MARTIGNANI, produce la corriente de aire para el traslado de la gota al árbol a partir de un ventilador centrífugo, caracterizado por rangos de velocidad altos (50 y 90 m/s) y bajo caudal de aire (entre 10 000 y 25 000 m³/h) con respecto a los ventiladores axiales utilizados en estos equipos agrícolas. La aerodinámica de la corriente parte de una alta velocidad (50 a 65 m/s) y la geometría del difusor con un ancho de salida del aire de 0,05 m, lo que produce una corriente de aire estrecha con respecto a ventiladores axiales con salida de 0,1 a 0,3 m.

En el esquema a) de la Figura 4 se muestra el desarrollo de la corriente de aire con el pulverizador sin movimiento, donde los valores altos de la velocidad del aire se concentra en un núcleo que produce una corriente estrecha a través de todo el dominio computacional, aunque arrastra el aire tranquilo circundante, aumentando su ancho a medida que se aleja de la salida de aire. La marca en forma de arco es el lugar donde la corriente de aire hace contacto con la copa el árbol, simulando frutales con marco de siembra de 8 x 4 m. La corriente de aire penetra en línea recta a éste y puede mantener su velocidad de 25 m/s hasta que alcance el tronco central del árbol.

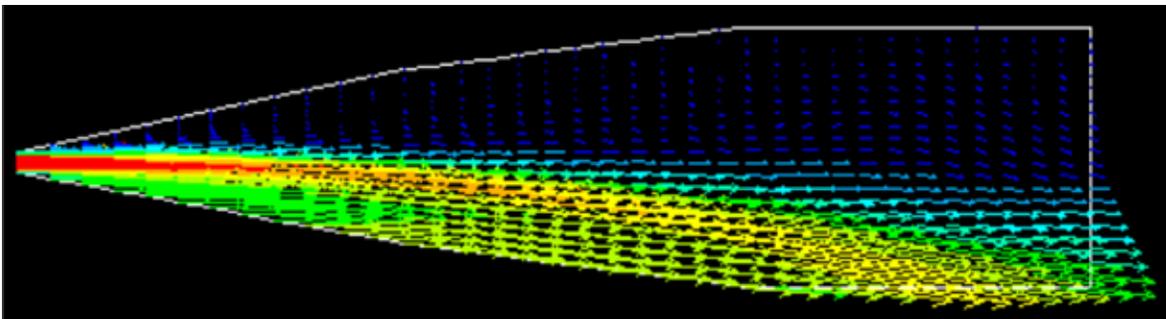
En el esquema b), la corriente está modelada con una velocidad de traslación del tractor de 2,18 km/h y la corriente de aire, aunque mantiene sus valores de velocidad máximos, se empieza a desplazar en sentido contrario al movimiento del pulverizador, penetrando en la copa del árbol con desviación respecto al eje central del aire a la salida del difusor, lo cual comienza a influir negativamente en la deposición de las gotas en el las hojas del árbol, disminuyendo el cubrimiento de las mismas.

En el esquema c) se presenta la variante con 4,16 km/h como velocidad de trabajo del pulverizador y, al igual que en el caso anterior, los valores de velocidad máximos del aire se mantienen, pero aumenta el desplazamiento de la corriente en contra del movimiento del pulverizador, creciendo la longitud de la trayectoria de las gotas para lograr alcanzar la copa del árbol. Lo anterior provoca pérdidas de gotas por deriva.

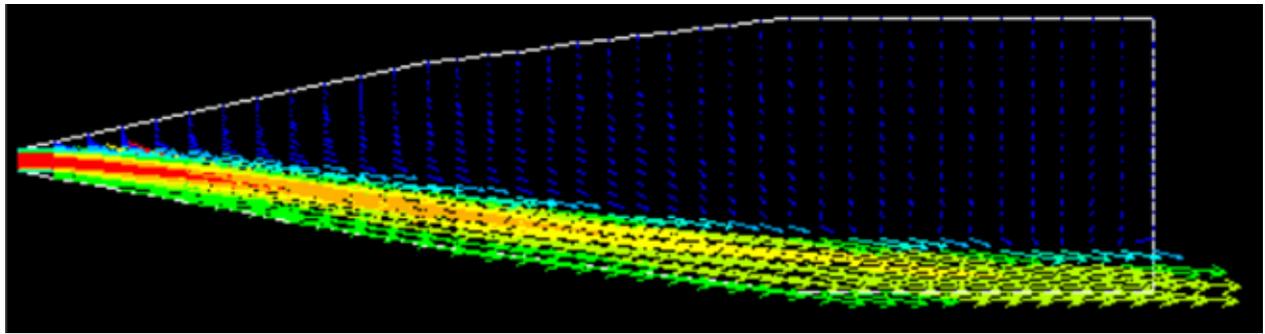
En el esquema d), cuando la velocidad del pulverizador es de 6,35 km/h se observa que le desplazamiento de la corriente es alto, no logrando alcanzar ésta la copa del árbol con el núcleo de velocidades máximas, por lo que este régimen de velocidad no es adecuado para el uso del pulverizador, al no llegar la corriente de aire que transporta las gotas al árbol.



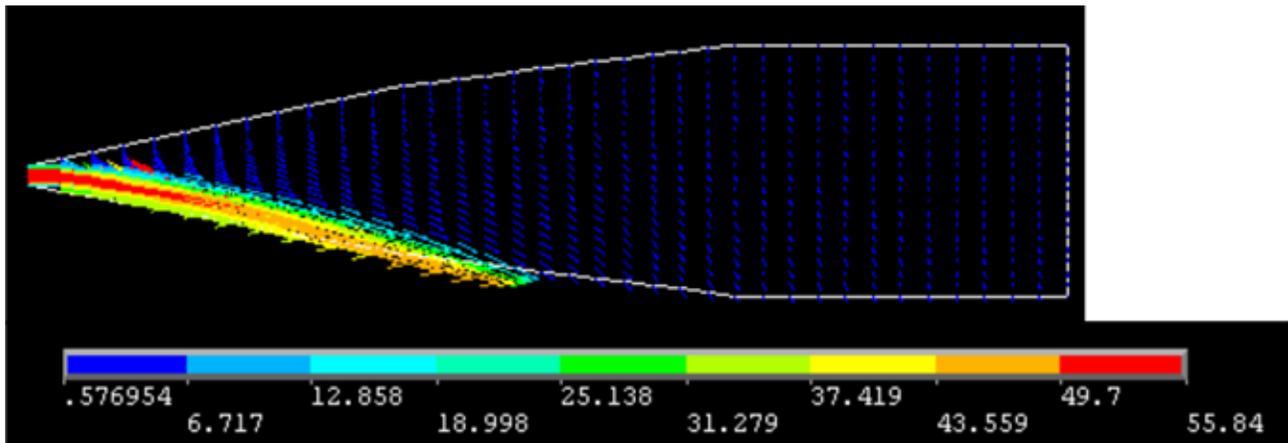
a) Pulverizador sin movimiento



b) En movimiento a 2,18 km/h



c) En movimiento a 4,16 km/h



d) En movimiento a 6,35 km/h

FIGURA 4. Gráficas de la corriente de aire del pulverizador MARTIGNANI en los distintos regímenes de trabajo modelados en CFD.

Aunque existen prácticas de aumentar la velocidad de los pulverizadores en condiciones de producción, buscando un crecimiento en la productividad y lograr así el tratamiento de una mayor cantidad de áreas, éstas disminuyen significativamente la calidad en el cubrimiento, por lo que se debe lograr un régimen de trabajo de compromiso entre estas variables y tener en cuenta que en la aerodinámica de la corriente de aire también influyen factores climáticos como la velocidad y dirección del aire ambiental, lo cual puede acentuar la disminución de la calidad del cubrimiento del árbol.

En las Figuras 5, 6 y 7, se muestran los gráficos de velocidad del aire en función del ancho de la corriente simulada sin movimiento del pulverizador, a diferentes distancias a medida que se aleja de la salida del aire para tres posiciones: a 0,8; 1,4 y 2,4 m.

En la gráfica de la Figura 5 se muestra la distribución de velocidades a 0,8 m de la salida y se observa un núcleo de velocidades alta con un máximo bien definido de 47,5 m/s, disminuyendo la velocidad en 7,5 m/s respecto a 55 m/s de promedio en la salida, lo cual es característico de las corrientes de aire al aumentar su ancho y expandirse en aire tranquilo.

De la Figura 6 con 1,4 m de distancia de la salida, se deduce que cuando la velocidad máxima disminuye a 43,9 m/s

y comienza el aumento del ancho del núcleo de la corriente, aparecen valores de velocidad muy cercano al anterior de 42,5 m/s y en los bordes de la corrientes comienzan a encontrarse valores de velocidad mayores que en las posiciones anteriores. La corriente de aire se comienza a transformar, según el comportamiento de los perfiles de Schliting, H (1972).

En la Figura 7 se muestra la gráfica de velocidades a 2,4 m de la salida del aire del difusor; en esta posición la corriente de aire alcanza ya la copa del árbol. La corriente de aire disminuye su velocidad en 18 m/s, alcanzando un máximo de 25,75 m/s, mientras que en su borde derecho alcanza 20 m/s y en la parte izquierda lo logra hasta un ancho de 0,160 m a partir del centro del eje de la corriente. La corriente de aire, aunque disminuye su velocidad, adquiere un ancho mayor y mejor estructurado, lo cual posibilita una distribución uniforme en el cubrimiento del árbol con líquido plaguicida. En cuanto a las velocidades del aire al hacer contacto con el follaje del árbol se pueden considerar altas, ya que se reportan resultados satisfactorios en frutales con velocidades en el rango de 15 a 20 m/s (Brazee *et al*, 1981). Este pulverizador utiliza un ventilador centrífugo que basa el traslado de la gota de plaguicida en una combinación de alta velocidad y bajo caudal de aire, tal y como se señaló más arriba.

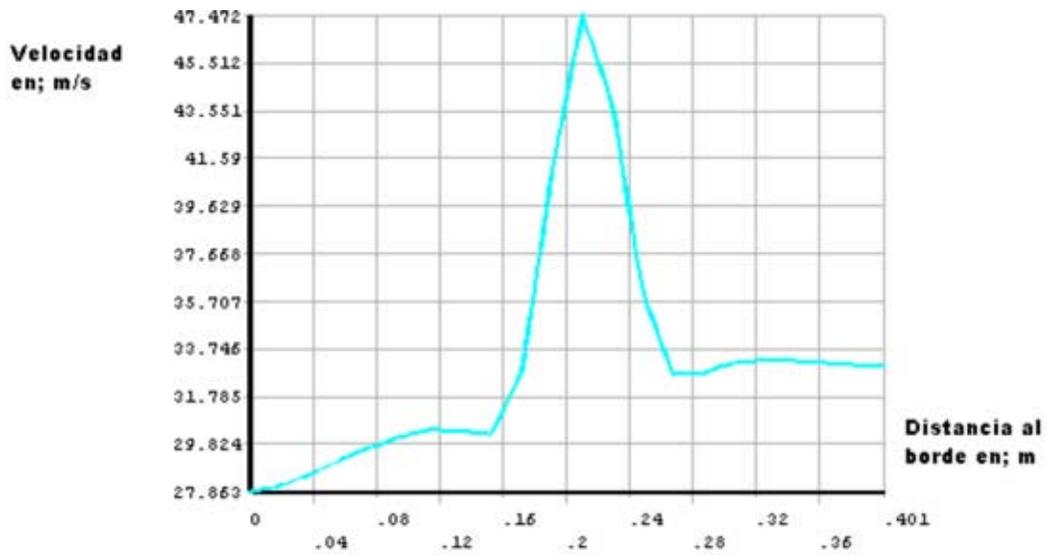


FIGURA 5. Distribución de la velocidad a la distancia de 0.8 m de la salida con el pulverizador sin movimiento.

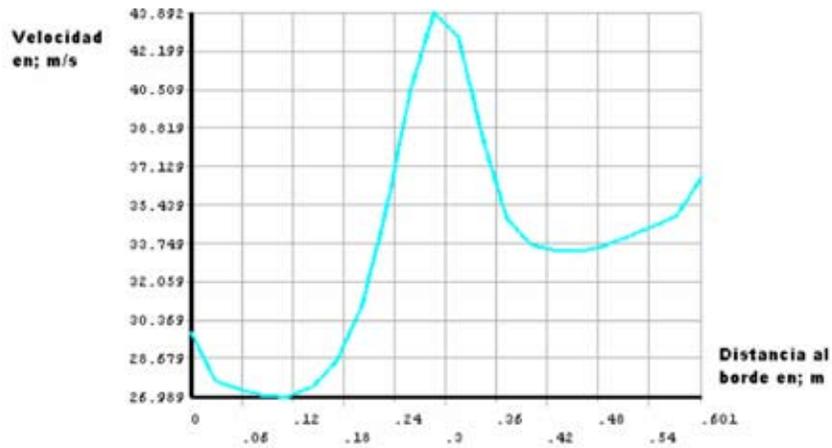


FIGURA 6. Distribución de la velocidad del aire a la distancia de 1.4 m de la salida con el pulverizador sin movimiento.

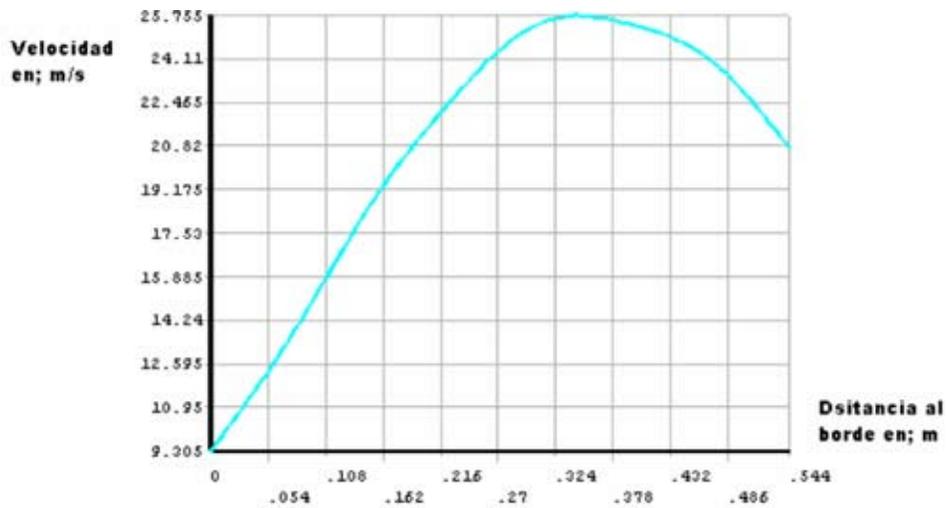


FIGURA 7. Distribución de la velocidad del aire a la distancia de 2.4 m de la salida con el pulverizador sin movimiento.

CONCLUSIONES

- En el proceso de trabajo del pulverizador con el aumento de la velocidad de traslación de 2,18 a 6,35 km/h, existe un desplazamiento proporcional en la posición de la corriente de aire y varía la distribución de velocidades con respecto al pulverizador sin movimiento, lo cual provoca una disminución del cubrimiento de las gotas de plaguicidas en el árbol.
- El pulverizador MARTIGNANI en plantaciones de marco de siembra de 8 x 4 m no se debe emplear a la velocidad de 6,35 km/h, por no alcanzar la corriente del aire la copa del árbol de forma directa.
- La desviación de la corriente aumenta con el crecimiento de la velocidad de traslación del pulverizador, produciendo un aumento de la distancia a recorrer por las gotas para alcanzar la copa del árbol, incrementando la deriva.
- La distribución de la velocidad del aire en la corriente con el pulverizador sin movimiento en el tramo de 0,8 a 1,4 m de distancia del difusor, la velocidad máxima del cono disminuye en 4 m/s y en el tramo de 1,4 a 2,4 m disminuye en 18 m/s.
- Lo anterior demuestra la importancia de tener en cuenta en el régimen de operación de los pulverizadores la velocidad de trabajo, ya que produce modificaciones en la aerodinámica de la corriente de aire que disminuyen significativamente la eficiencia en los tratamientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOVICH, G.N.: *The Theory of Turbulent jets*, pp. 1-671, Fitzmatgiz, 1960, English translation, edited by L. H. Schindel. M.I.T. Press, USA, 1963.
- BRAZEE, R.D.; FOX, R.D.; REICHARD, D.L.; HALL, F.R.: "Turbulent Jet Theory Applied to air sprayers". *Transactions of the ASAE*, 24(2): 266-272 1981.
- DELELE, M. A.; A. DE MOOR; P. VERBOVEN; R. RAMON; B. SONCK; M. NICOLAÏ: "CFD Modeling of Air Flow Patterns from an Air-Assisted Orchard Sprayer", *Aspects of Applied Biology*, 71: 303-310, 2004.
- HERRERA, P. M.; A. GARCÍA DE LA FIGAL; H. DE LAS CUEVAS Y O. VAZQUEZ: **Aerodinámica de la corriente de aire de un pulverizador agrícola con ventilador centrífugo**. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(4): 33-38, 2009.
- HERRERA, P. M.; M. MARTINS, G.J. RODRÍGUES Y H. DE LAS CUEVAS: "Modelación mediante la dinámica de fluidos computacional de la corriente de aire de un pulverizador", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(1): 12-18, 2006.
- HERRERA, P. M. I.; E. RAMOS; H. DE LAS CUEVAS Y C.M. DE SOUZA: Relación entre la velocidad del pulverizador y la corriente de aire en plantaciones de Café. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(1): 10-14, 2007.
- HERRERA, M. I.; M. TEIXEIRA Y G.J. RODRÍGUES: "Influencia de la velocidad del pulverizador y la presión de líquido en la deposición del espectro de gotas", *Revista Ciencias técnicas Agropecuarias*, 15(3): 34-38, 2006.
- SIDAHMED, M. M. AND B. BROWN: "Simulation of Spray Dispersion and Deposition from a Forestry Airblast Sprayer-Part II: Droplet Trajectory Model", *Transactions of the ASAE*, 44(1): 5-17, 2001.
- SCHLITING, H.: *Teoría de la capa límite*, 68pp., Versión en español de la 5ª Edición. Ed. Mc Graw-Hill, 1972.
- XU, Z. G.; J. WALKLATE; G. RIGBY; M. RICHARDSON: "Stochastic Modeling of Turbulent Spray Dispersion in the Near-field of Orchard Sprayers", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74-76: 295-300, 1998.