



TRACTORES Y MÁQUINAS AGRÍCOLAS TRACTORS AND AGRICULTURAL MACHINES

ARTÍCULO ORIGINAL

Simulación mediante la dinámica de fluidos por computadora del efecto de la velocidad del viento en el desempeño de los pulverizadores agrícolas de ventilador

Simulation by means of the dynamics of having flowed by computer of the effect of the speed of the wind in the acting of the agricultural crushers of fan

Mario Ignacio Herrera Prat¹, Armando García de la Figal Costales², Ernesto Ramos Carvajal³
y Mauri Martin Texeira⁴

RESUMEN. Los pulverizadores agrícolas para la aplicación de defensivos utilizan una corriente de aire para lograr una mayor eficacia en su trabajo, esto resulta complejo al tener que combinar el tamaño de la gota y la aerodinámica de la corriente de aire y a su vez en interacción con el viento y el movimiento del pulverizador. La efectividad en el cubrimiento con las gotas de plaguicidas del árbol está directamente relacionada con la capacidad de transporte de la corriente de aire y constituye la principal causa de las pérdidas por deriva si no se emplea adecuadamente. La dinámica de fluidos por computadora (CFD) permite de forma sencilla estudiar la aerodinámica de la corriente de aire mediante la simulación de esta en las condiciones de trabajo. El conocimiento del comportamiento de la corriente de aire, constituye un instrumento para lograr parámetros de regulación y regímenes de trabajo racionales en el pulverizador. En el estudio se empleara como maqueta experimental, el pulverizador integral "ASS-800" que utiliza un ventilador axial "VL610". El análisis de la aerodinámica de la corriente de aire, se realizará a una velocidad de trabajo del pulverizador de 3,6 km/h y una velocidad del viento de 5 m/s en ángulos de 30°, 45° y 60° con respecto a la dirección del movimiento del pulverizador.

Palabras clave: pulverizador, dinámica de fluidos computacional, corriente de aire

ABSTRACT. Agricultural sprayers for the application of defensive uses a stream of air to achieve greater efficiency in their work, this is complicated by having to combine the droplet size and the aerodynamics of the airflow and in turn interact with the wind and the movement of the sprayer. The effectiveness in covering the tree pesticide droplets is directly related to the transport capacity of the air stream and is the main cause of losses by drift if not used properly. The computational fluid dynamics can easily study the aerodynamics of the air stream by simulating the conditions of this work. Knowledge the aerodynamics of the current of air is an instrument for achieving control parameters and rational work regimes in the sprayer. In the study were used as experimental model, the integral spray "ASS-800" using an axial fan "VL610". The analysis of the aerodynamics of the current of air is carried out at a working speed of the sprayer of 3,6 km/h wind speed of 5 m/s at angles of 30°, 45° and 60° with respect to the direction of movement of the sprayer.

Keywords: spraying machine, computational fluid dynamics, current of air.

Recibido 27/09/10, **aprobado** 10/12/11, **trabajo** 03/12, **artículo original**.

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

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

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

⁴ Dr.C., Prof. /UFV, Viçosa, Mg, Brasil

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

INTRODUCCIÓN

Los pulverizadores agrícolas en el proceso de aplicación de defensivos se auxilian de una corriente de aire para lograr una mayor eficacia en su trabajo, esto resulta complejo al tener que combinar el tamaño de la gota con la aerodinámica de la corriente de aire y esta a su vez en interacción con el viento ambiental y el movimiento del pulverizador. La corriente de aire realiza su trabajo en diferentes condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire, a lo cual se añade la velocidad del movimiento del equipo en su labor. La dinámica de fluidos por computadora (CFD) permite de forma sencilla estudiar la aerodinámica de la corriente de aire mediante la simulación de esta en las condiciones de trabajo y de aquí tomar decisiones y lograr parámetros de regulación racionales en esta. La calidad en el cubrimiento con las gotas de plaguicidas del árbol está directamente relacionada con la capacidad de transporte de la corriente de aire y constituye la principal causa de pérdidas al no hacer blanco las gotas en el follaje del árbol, la corriente de aire inadecuada también incrementa las pérdidas por deriva características en este sistema de pulverización. Los primeros estudios de la corriente de aire en pulverizadores agrícolas fueron abordados por Abramovich (1963), aplicando la teoría del chorro plano turbulento, en este caso lo aplico en pulverizadores con diferentes formas en la salida del flujo de aire. Randall (1971), aplicó la teoría del flujo plano turbulento de Abramovich (1963) y estudió el efecto del viento y la velocidad de trabajo en el volumen de aire del ventilador. Hale *et al.* (1976), estudiaron el efecto de la velocidad de movimiento de la máquina y de un flujo de aire transversal a la corriente de aire del pulverizador, en una maqueta dentro de un túnel de aire. Reichard *et al.* (1979) plantearon que la velocidad del aire resultante en la corriente decreció con el incremento de la velocidad de trabajo de la máquina. Fox *et al.* (1985), desarrollaron un modelo computarizado para medir el flujo de aire del ventilador de un pulverizador, para ser utilizado en el cálculo de los perfiles de velocidad de la corriente de aire dentro de aire tranquilo o en movimiento. Esto permitió predecir los efectos de desviación que pueden producir flujo de aire externo (coflujo, flujo en contra y flujo transversal) incluyendo la velocidad de trabajo sobre la corriente de aire. Concluyó expresando que la deflexión que experimenta la corriente de aire de un pulverizador es difícil de controlar, porque el viento varía con el tiempo y con la elevación sobre la tierra. 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 como base para la utilización racional de los pulverizadores ha sido utilizado por diferentes autores (Xu *et al.*, 1998; Sidahmad & Brown, 2001). La modelación de la corriente de aire utilizando el CFD y la validación del mismo lo abordan Delele *et al.* (2004) y Herrera (2006). En este trabajo se emplea como maqueta experimental el pulverizador integral “ASS-800” que utiliza un ventilador axial “VL610”. El análisis de la aerodinámica de la corriente se realiza a una velocidad de trabajo del pulverizador de 3,6 km/h y una ve-

locidad del viento de 5 m/s en ángulos de 30°, 45° y 60° respecto a la dirección del movimiento del pulverizador.

MÉTODOS

Se empleó como maqueta experimental el pulverizador integral “ASS-800”, el cual utiliza un ventilador axial “VL610” para producir la corriente de aire. (Figura 1).



FIGURA 1. Pulverizador “ASS-800”.

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 movimiento:

$$d\mathbf{v} / dt + \mathbf{v}(d\mathbf{v} / dy) + \mathbf{w}(d\mathbf{w} / dz) = (\mathbf{I} / \rho) \cdot (d\mathbf{t} / dz) \quad (1)$$

b) Ecuación de continuidad:

$$(d\mathbf{v} / dy) + (d\mathbf{w} / dz) = 0 \quad (2)$$

El análisis de CFD se realiza a partir del perfil de velocidades del aire a la salida del difusor y la geometría de ésta.

La modelación de la corriente de aire del pulverizador integral “ASS-800” se realiza para determinar 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 a la

salida del difusor del ventilador como se observa en la Figura 2. La simulación se realizara a una velocidad de trabajo del pulverizador de 3,6 km/h y una velocidad del viento de 3,6 km/h en dirección contraria al movimiento del pulverizador y en ángulos de 30°, 45° y 60° con respecto a esta dirección (Figura 3). En el análisis de la aerodinámica de la corriente de aire se tendrá en cuenta la posición y ancho de esta y la distribución de la velocidad en la misma. El régimen de trabajo

escogido en el ventilador para la simulación es de 2 100 min⁻¹, la cual es entregada por la toma de fuerza del tractor.

Velocidad del aire a la salida del ventilador. El perfil de velocidad seleccionado a la salida del ventilador coincide con el centro de este y como se observa en la Figura 2, en la vista frontal el punto como el 4, y en la lateral con las letras A, B, C, D, E, F y se muestran los puntos medidos a lo ancho de la salida del difusor del ventilador.

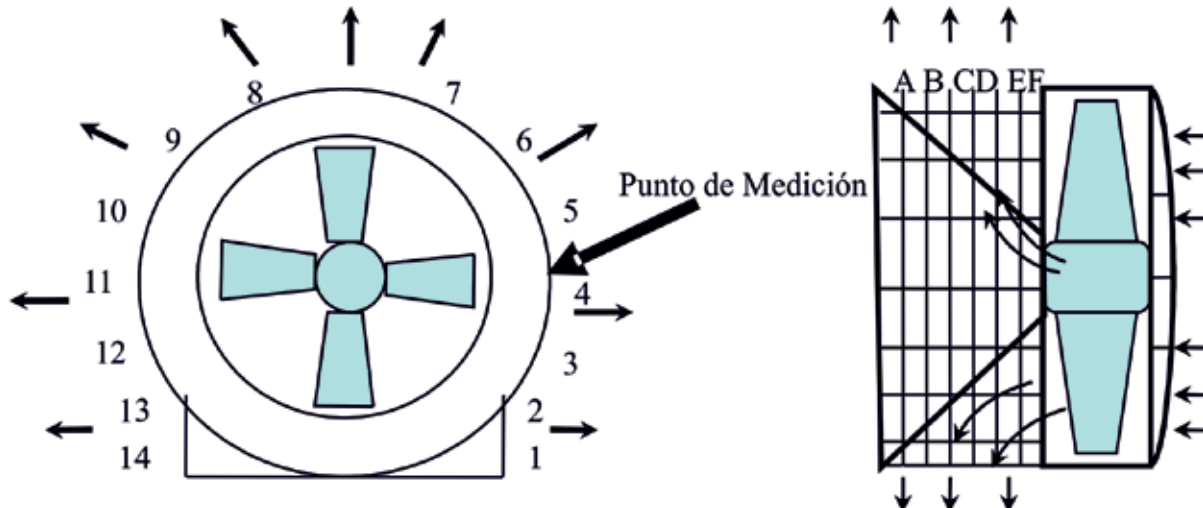


FIGURA 2 Esquema de medición a la salida del difusor del ventilador.

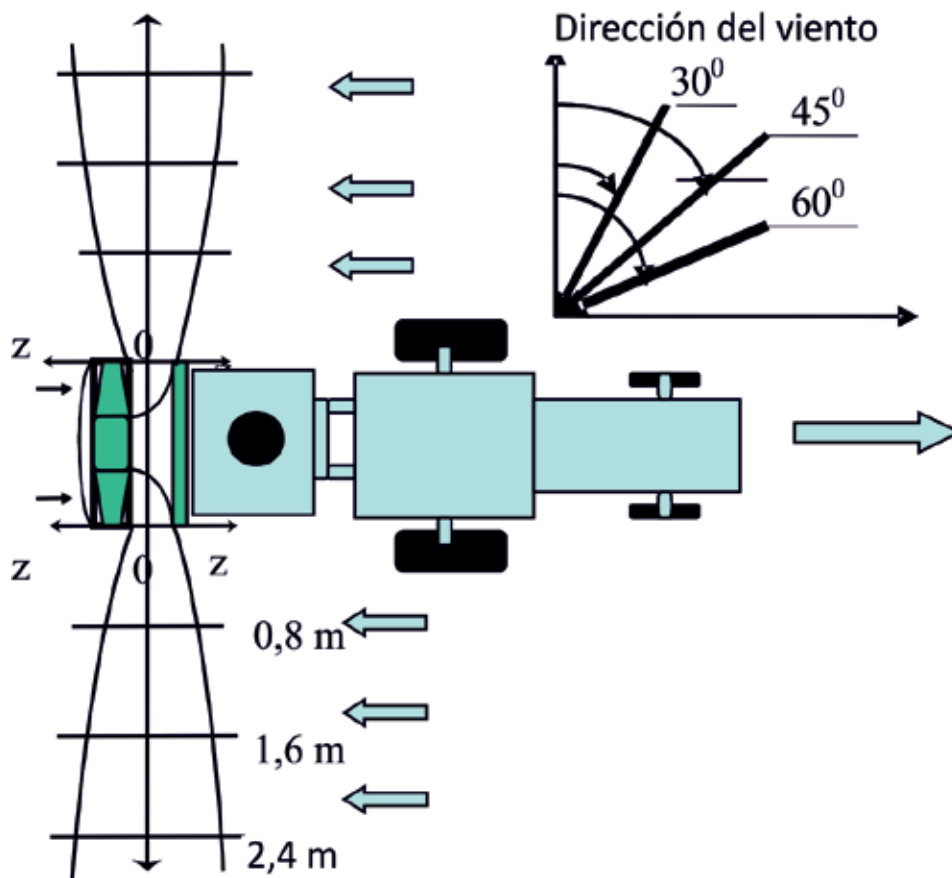


FIGURA 3. Esquema de la corriente de aire y la dirección del movimiento.

Dimensiones y propiedades. Los valores de distribución de la velocidad del aire en el punto 4 escogido a la salida del ventilador (Figura 2) se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1. Dimensiones y propiedades

Dimensiones y propiedades	Valor					
Velocidad del aire en las secciones; m/s	a	b	c	d	e	f
	40	35	30	30	28	25
Ancho de la salida del aire en el ventilador; mm	100					
Uniformidad de la velocidad del aire a la salida del ventilador	0,85					
Densidad del aire; kg/m ³	1,187					
Viscosidad; kg/m ⁻⁵	1,8135 x 10 ⁻⁵					

Nota; a, b, c, d, e y f secciones de medición correspondientes al punto.

Dominio computacional. Para la corrida del programa se crea un dominio computacional, donde se mueve el fluido (Figura 4); 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 (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.

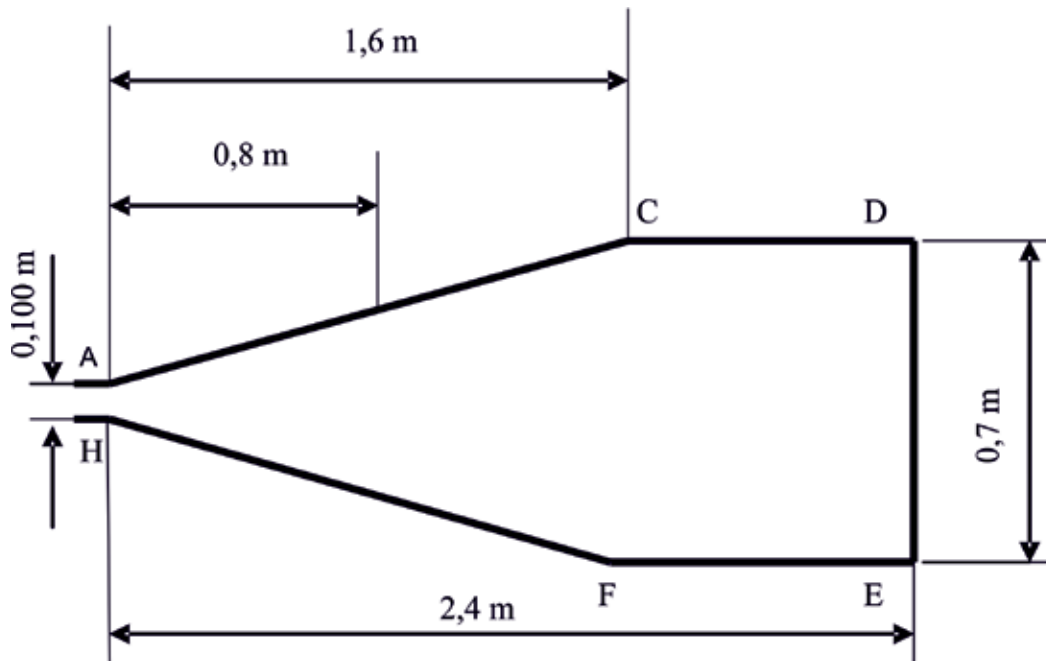


FIGURA 4. Elemento computacional para el modelado de la corriente de aire del pulverizador “ASS-800”.

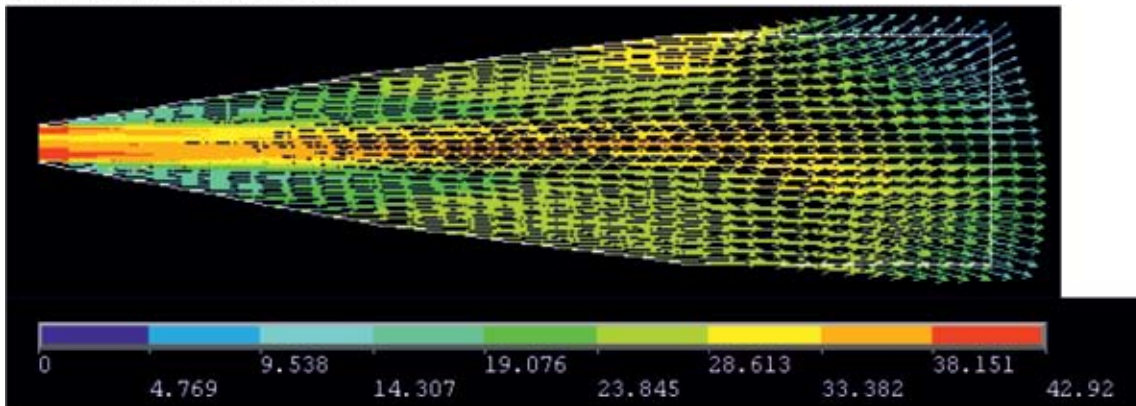
DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En la Figura 5 se observan las gráficas de la corriente de aire modeladas en CFD para los distintos regímenes de trabajo a estudiar; en la grafica (a) el pulverizador sin movimiento y de la (b) a la (d) el pulverizador a una velocidad de 3,6 km/h y un viento de velocidad 5 m/s en dirección contraria al movimiento del pulverizador formando ángulos de 30°, 45° y 60° con respecto a este. El pulverizador integral “ASS-800”, produce la corriente de aire para el traslado de la gota al árbol a partir de un ventilador axial “VL610”, caracterizado por rangos de velocidad entre 25 y 40 m/s. La corriente de aire se desarrolla a partir de la distribución de velocidades a la salida

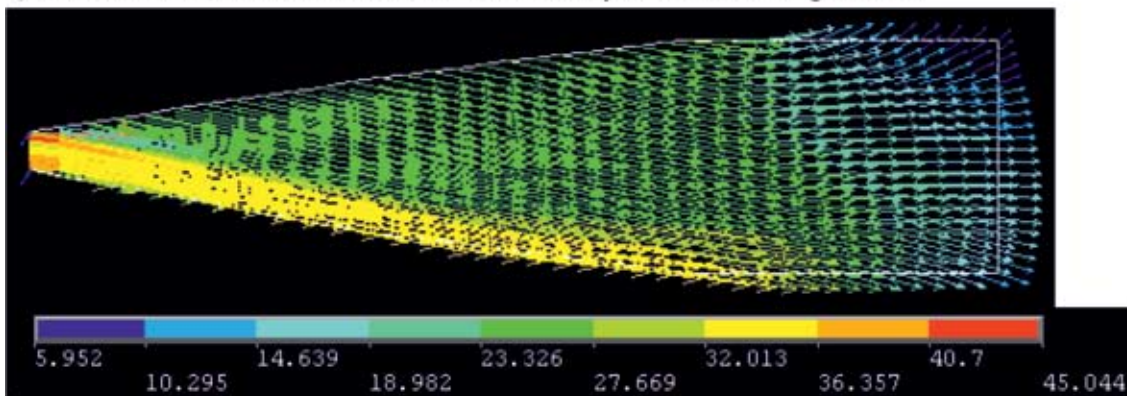
del ventilador de (25 a 40 m/s) y la geometría del difusor posee un ancho de salida del aire de 0,1 m.

En el grafico a) de la Figura 4 se representa el desarrollo de la corriente de aire del pulverizador sin movimiento, en este caso la corriente de aire sale por una ranura a un aire tranquilo y toma las características de un flujo plano libre descrito por Abramovich. El núcleo de la corriente de aire se desarrolla hasta 0,6 m de distancia de la salida del ventilador y el mismo posee un ancho de 0,1 m con velocidades de 38 m/s y en algunos puntos de 40 m/s, de 0,6 a 1,6 m el núcleo desaparece y solo quedan valores de velocidad de 38 m/s en un punto; además el núcleo arrastra el aire tranquilo circundante produciendo velocidades del aire entre (19 y 23 m/s) de forma

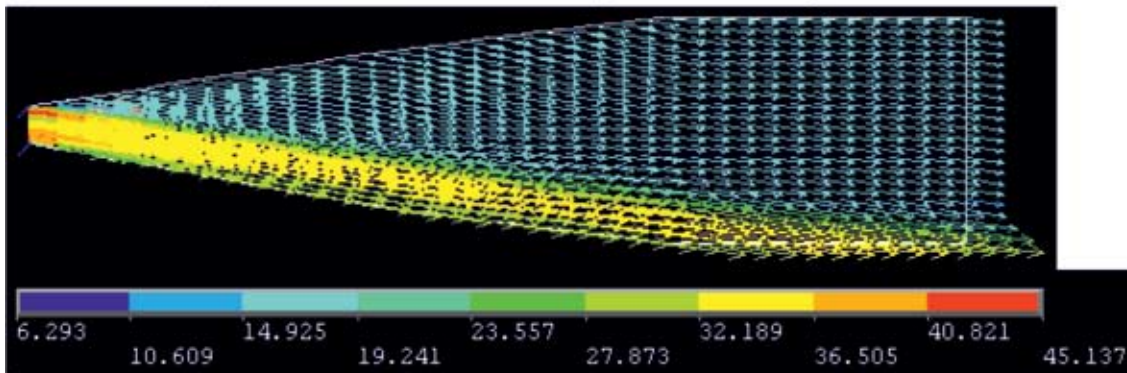
a) Pulverizador sin movimiento.



b) Pulverizador a 3,6 km/h de velocidad de movimiento y de 5 m/s en un ángulo de 30°



c) Pulverizador a 3,6 km/h de velocidad de movimiento y de 5 m/s en un ángulo de 45°



d) Pulverizador a 3,6 km/h de velocidad de movimiento y de 5 m/s en un ángulo de 60°

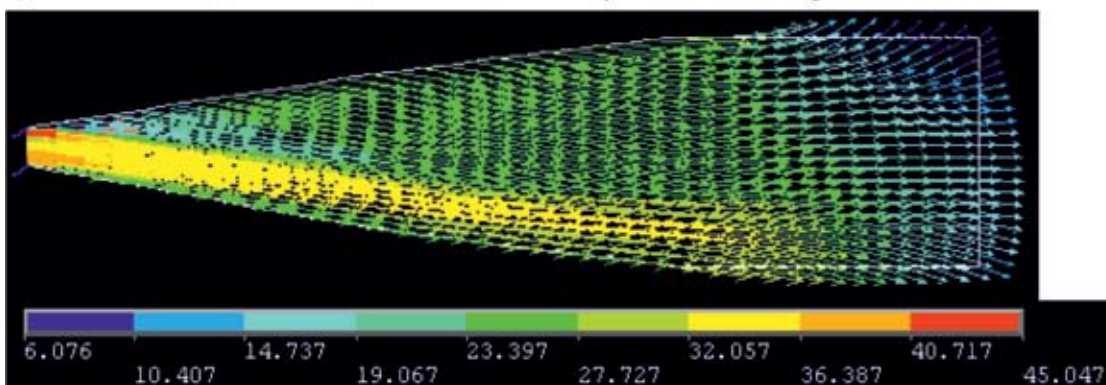


FIGURA 5. Gráficas de distribución de velocidades de la corriente de aire del pulverizador ASS 800 en los distintos regímenes de trabajo modelados en CF.

simétrica a ambos lados de la corriente, aumentando su ancho a medida que se aleja de la salida del aire del ventilador característica de una corriente de aire turbulenta inundada en aire tranquilo. En la última sección de la corriente hasta 2.4 m de distancia de la salida del ventilador la velocidad del aire está entre 14 y 19 m/s.

En el gráfico b), la corriente está modelada teniendo en cuenta una velocidad de traslación del tractor de 3,6 km/h y un viento de 5 m/s en un ángulo de 30° con respecto a la dirección del movimiento del pulverizador, ya en este caso la corriente de aire no va penetrar en un aire tranquilo por lo que los patrones aerodinámicos de esta varían. La corriente de aire mantiene su núcleo definido hasta la distancia de la salida de 1,6 m con velocidades de 23 a 33 m/s en el primer tramo hasta 0,8 m predominan velocidades de 33 m/s con un ancho de 0,1 m del núcleo, a partir de aquí en los bordes de este aparecen velocidades de 23 m/s. El núcleo de la corriente aparece en toda su longitud desplazado hasta el borde de la corriente de aire que se encuentra en sentido opuesto al movimiento del pulverizador; arrastra el aire tranquilo circundante pero solo en la parte delantera de la corriente con velocidades de 23 m/s hasta 1.6 m de distancia, en el tramo final hasta 2,4 m las velocidades van disminuyendo de 18 a 14 m/s y termina en un rango de 5 a 14 m/s.

En el gráfico c), la corriente está modelada con una velocidad de traslación del tractor de 3,6 km/h y un viento de 5 m/s en dirección contraria al movimiento del pulverizador formando un ángulo de 45° con respecto a esta. La corriente de aire mantiene su núcleo hasta la distancia de la salida de 1,9 m con velocidades de 32 m/s en el centro y en la periferia 23 m/s, en el primer tramo hasta los 0,6 m de distancia predominan velocidades de 32 m/s en la formación del núcleo central y a partir de esta distancia ya aparecen valores de 23 m/s a ambos lados formando la corriente, este núcleo de la corriente tiene un desplazamiento hasta el borde de la corriente de aire que se encuentra en sentido opuesto al movimiento del pulverizador; arrastra el aire tranquilo circundante pero solo en la parte delantera de la corriente con velocidades de 15 m/s, aumentando su ancho a medida que se aleja de la salida del aire del ventilador. De 1,9 m a 2,4 m la corriente se estrecha manteniendo la velocidad 27 m/s en un solo punto y en el resto del ancho de la corriente la velocidad del aire, ésta es de 10 m/s.

En el gráfico d), la corriente está modelada con una velocidad de traslación del tractor de 3,6 km/h y se simula un viento de 5 m/s en dirección contraria al movimiento del pulverizador formando un ángulo de 60° con respecto a ésta. En este caso la corriente de aire mantiene su núcleo hasta la distancia de la salida de 0,8 m con velocidades de 32 m/s a partir de aquí el núcleo se desintegra y solo queda un punto a esta velocidad, que al llegar a los 1,6 m desaparece apareciendo valores de 23 m/s, este núcleo tiene un desplazamiento hasta el borde de la corriente de aire que se encuentra en sentido opuesto al movimiento del pulverizador; el núcleo arrastra el aire tranquilo circundante pero solo en la parte delantera de la corriente con velocidades de 23 m/s, esta velocidad ya termina a los 1,9 m de distancia pasando a velocidades de 14 m/s. En el

último tramo de la corriente a 2,4 m de distancia de la salida del ventilador la velocidad del aire está entre 6 y 10 m/s a todo el ancho de esta disminuye en 4 m/s con respecto al pulverizador sin movimiento.

En general en todos los casos la velocidad en el núcleo disminuye y el ángulo de penetración en la copa del árbol presenta desviación respecto al eje central del aire a la salida del difusor, lo cual influye negativamente en la deposición de las gotas en las hojas del árbol, disminuyendo el cubrimiento de las mismas y aumentando los efectos de deriva por el ángulo de incidencia de esta en el árbol. En ángulos de 45° y 60° de la dirección de la velocidad del viento con respecto a la dirección del movimiento del pulverizador se producen los mayores efectos negativos en la aerodinámica de la corriente de aire limitando su alcance.

El pulverizador "ASS-800" operando a una misma velocidad de trabajo y una velocidad del viento ambiental de 5 m/s, muestra patrones diferentes de la aerodinámica de la corriente de aire para las distintas direcciones del viento, estos cambios en la aerodinámica de la corriente de aire demuestran que a pesar de utilizar el mismo equipo y a la misma velocidad de traslación la corriente varía en su alcance, en el ángulo de incidencia en el árbol y en el ancho del núcleo, lo que provoca efectos negativos en el transporte de la gota hacia la planta y aumenta los niveles de deriva del producto.

Un factor a tener en cuenta en el trabajo de los pulverizadores agrícolas es la velocidad y dirección del viento ambiental, lo cual puede acentuar la disminución de la calidad del cubrimiento del árbol y aumentar el efecto de deriva. Este factor no siempre es considerado debido a que existen prácticas de trabajar los pulverizadores en condiciones de producción con valores de velocidad del viento de 5 m/s, para lograr el cumplimiento de tratamiento cantidad determinada de área.

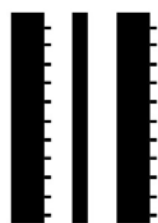
Por lo que se debe lograr un régimen de trabajo de compromiso entre estas variables y tener en cuenta que en la aerodinámica de la corriente de aire también influyen factores climáticos como la velocidad y dirección del viento, lo cual puede acentuar la disminución de la calidad del cubrimiento del árbol.

CONCLUSIONES

- La corriente de aire producida por el pulverizador "ASS-800" en régimen estático, cumple con los principios del flujo libre turbulento que penetra en aire tranquilo.
- El pulverizador "ASS-800" operando a una velocidad de trabajo de 3,6 km/h y una velocidad del viento ambiental de 5 m/s, muestra patrones diferentes de la aerodinámica de la corriente de aire para las distintas direcciones del viento.
- Para los ángulos de dirección del viento de 30°, 45° y 60° ocurre la desviación del núcleo de la corriente y afecta el ángulo de incidencia de esta en el árbol.
- En ángulos de 45° y 60° de la dirección de la velocidad del viento se producen las mayores variaciones en la aerodinámica de la corriente de aire limitando su alcance y el ángulo de incidencia al penetrar en el árbol.

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.; R.D. FOX; D.L. REICHARD & F.R. HALL: "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.
- FOX, R.D.; R.D. BRAZEE; and D.L. REICHARD: "A model Study of the effect of wind on Air Sprayer Jets", *Transactions of the ASAE* 28(1): 83-88, 1985.
- 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.
- RANDALL, J.M.: "The relationship between air volumen and pressure on spray distribution on fruit trees", *Journal Agric. Engr. Res* 16(1): 1-31, 1971.
- REICHARD, D. L.; R.D. FOX.; R.D. BRAZEE & F.R. HALL: "Air velocities delivered by orchard air sprayers", *Transactions of the ASAE*, 22(1): 69 74, 1979.
- SIDAHMED, M. M. & B. BROWN: "Simulation of Spray Dispersal 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 5ta 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.



GIAF