

INFLUENCIA DE LA ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA EN LA PULVERIZACIÓN AGRÍCOLA

Renaudo, C.A.^{a,b}; Pintos, E.^a; Bucalá, V.^{a,b}; Bertin, D.^{a,b}

a. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (UNS)

b. Planta Piloto de Ingeniería Química – PLAPIQUI (UNS-CONICET)

carenaudo@plapiqui.edu.ar

Resumen

La estabilidad atmosférica es la capacidad del aire atmosférico para mezclarse verticalmente en función de su gradiente de temperatura. Durante la pulverización agrícola, las condiciones atmosféricas inestables son las mejores para aplicar agroquímicos, ya que las gotas pulverizadas tienen menos resistencia a moverse verticalmente y, por lo tanto, se favorece su deposición en el suelo. Por otro lado, en condiciones atmosféricas estables las gotas tienen menos tendencia a moverse verticalmente en el aire, existiendo más riesgo de que se depositen fuera del lugar objetivo.

En este trabajo se explora, mediante simulación, el impacto de diferentes condiciones de estabilidad atmosférica sobre el comportamiento de las gotas pulverizadas y su posterior deposición en suelo. Para ello, se resuelve un modelo matemático que describe la velocidad, posición y tamaño de las gotas durante su vuelo y calcula su deposición en función de la distancia a la boquilla. Se utilizan coeficientes de dispersión para representar diferentes condiciones de estabilidad atmosférica. Mediante el modelo desarrollado, en una primera etapa se analiza la importancia de incluir la dispersión en el modelo matemático, comparando simulaciones del modelo propuesto con valores experimentales. Luego, se realizan simulaciones numéricas para diferentes escenarios de estabilidad atmosférica y se analiza la deposición de las gotas. Para cada escenario, se imponen cambios en la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa en el modelo para estudiar su influencia en la deriva de la pulverización.

Abstract

Atmospheric stability is the ability of atmospheric air to mix vertically as a function of its temperature gradient. During agricultural spraying, unstable atmospheric conditions are the best for applying agrochemicals, since the sprayed droplets have less resistance to moving vertically and therefore their deposition on the ground is favored. On the other hand, in stable atmospheric conditions the droplets have less tendency to move vertically in the air, with a greater risk of them being deposited outside the target place.

In this work, the impact of different atmospheric stability conditions on the behavior of sprayed droplets and their subsequent deposition on the ground is explored through simulation. A mathematical model is solved that describes the velocity, position and size of the droplets during their flight and their deposition as a function of the distance to the nozzle is calculated. Dispersion coefficients are used to represent different conditions of atmospheric stability. Using the model developed, in a first stage the importance of including dispersion in the mathematical model is analyzed, comparing simulations of the proposed model with experimental values. Then, numerical simulations are performed for different atmospheric stability scenarios and droplet deposition is analyzed. For each scenario, changes in wind speed, temperature and relative humidity are imposed on the model to study their influence on spray drift.



Palabras clave: Pulverización agrícola, Estabilidad atmosférica, Modelado y simulación, Boquillas de atomización.

INTRODUCCIÓN

En las pulverizaciones agrícolas, la eficiencia de la aplicación de agroquímicos en el área deseada depende de las características de las boquillas, la presión de pulverización, la distancia desde la boquilla al suelo, el equipo de pulverización y las condiciones climáticas [1]. Debido a que el impacto de las condiciones climáticas no puede ser controlado por el aplicador, es necesario monitorearlas antes y durante la pulverización.

La velocidad del viento es la variable meteorológica más importante que influye en la deposición de gotas: si la velocidad del viento aumenta, la fuerza de arrastre sobre las gotas es mayor y se desplazan más lejos del objetivo. La temperatura y la humedad relativa influyen fuertemente en la velocidad de evaporación de las gotas: a mayores temperaturas y menores humedades relativas, mayor será la reducción de tamaño de las gotas en vuelo. Debido a que las gotas pequeñas se ven más afectadas por el viento que las grandes, la temperatura y la humedad relativa influyen más la distancia de deposición de estas gotas.

Además del viento, la temperatura y la humedad relativa, se reconoce que la estabilidad atmosférica influye en el comportamiento de las gotas liberadas a la atmósfera durante las aplicaciones agrícolas. La estabilidad atmosférica es la tendencia de la atmósfera a resistir o mejorar su mezcla vertical y está relacionada con el gradiente de temperatura [4]. Por ejemplo, si una parcela de aire se altera de modo que se mueva en dirección vertical, puede seguir subiendo, volver a su posición inicial o permanecer en su nueva altitud dependiendo del gradiente de temperatura. Si la porción de aire continúa elevándose, la atmósfera se considera inestable; si la parcela vuelve a su posición inicial, la atmósfera se llama estable, y si la parcela permanece en su nueva posición, la atmósfera es neutra [2]. Las condiciones atmosféricas inestables son las mejores para la pulverización, ya que las gotas atomizadas tienen menos resistencia a moverse verticalmente y, por lo tanto, se favorece la deposición. Por otro lado, las condiciones atmosféricas estables implican un menor mezclado, lo que puede hacer que las gotas se desplacen a mayores distancias en

dirección del viento. Esto genera una mayor concentración de agroquímico depositado fuera del área objetivo [3]. La inversión térmica es una condición particular de la atmósfera estable. En la misma, la temperatura del aire tiende a aumentar con la altitud debido a que el aire adyacente al suelo se ha enfriado durante la noche. Por lo tanto, durante el amanecer, la temperatura del aire cerca del suelo tiende a aumentar con la altitud y la atmósfera es estable. Aunque la inversión puede ocurrir en cualquier momento del día, generalmente se desarrolla al final de la tarde o temprano en la mañana. Especialmente si la velocidad del viento no es considerable, la inversión térmica favorece que las pequeñas gotas se muevan hacia áreas no deseadas. Pasquill (1961) estudió las relaciones entre observaciones simples sobre el ángulo del sol, la cobertura de nubes y la velocidad del viento y las categorías de estabilidad atmosférica propuestas (A-F) se conocen como clases de estabilidad de Pasquill. Para cada clase, se pueden hacer suposiciones razonables sobre el riesgo de deriva [4].

En este trabajo se explora, mediante simulación, el impacto de diferentes condiciones de estabilidad atmosférica sobre el comportamiento de las gotas pulverizadas y su posterior deposición en suelo. Para ello, se resuelve un modelo matemático que describe la velocidad, posición y tamaño de las gotas durante su vuelo y calcula su deposición en función de la distancia a la boquilla. Se utilizan coeficientes de dispersión para representar diferentes condiciones de estabilidad atmosférica. Mediante el modelo desarrollado, en una primera etapa se analiza la importancia de incluir la dispersión en el modelo matemático, comparando simulaciones del modelo propuesto con valores experimentales. Luego, se realizan simulaciones numéricas para diferentes escenarios de estabilidad atmosférica y se analiza la deposición de las gotas. Para cada escenario, se imponen cambios en la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa en el modelo para estudiar su influencia en la deriva de la pulverización.

DESARROLLO

Distribución inicial de gotas atomizadas

El modelo matemático utilizado en este trabajo está basado en [5]. De acuerdo con este modelo, el aerosol atomizado se puede representar mediante una distribución bidimensional que es función del diámetro de gota d_0 y el ángulo α de la trayectoria inicial de gota respecto a la vertical (Figura 1). Por lo tanto, es posible describir la distribución del aerosol atomizado mediante la siguiente función bivariable:

$$f_{d\alpha}(d_0, \alpha) = k_1(d_0, \alpha)k_2(d_0, \alpha) \quad (1)$$

donde:

$$k_1(d_0, \alpha) = \frac{H[1+(\tan \alpha)^2]}{2\pi\sigma_s \ln \sigma_{ul}} \frac{d_{max}}{d_0(d_{max}-d_0)} \quad (2)$$

$$k_2(d_0, \alpha) = e^{-\frac{1}{2}\left\{\left[\frac{\ln(a_{ul}d_0)-\ln(d_{max}-d_0)}{\ln \sigma_{ul}}\right]^2 + \left(\frac{H \tan \alpha}{\sigma_s}\right)^2\right\}} \quad (3)$$

H es la altura de la boquilla. d_{max} , σ_{ul} y a_{ul} son parámetros dependientes de la distribución de tamaño de gota que se atomiza, mientras que σ_s es función de la distribución espacial de las gotas que abandonan la boquilla. En este trabajo, los parámetros d_{max} , σ_{ul} , a_{ul} y σ_s fueron obtenidos para una boquilla TeeJet XR 110-04 operando una presión de 3 bar [5],[6]. La Ecuación 1 es válida para $d_0 \leq d_{max}$.

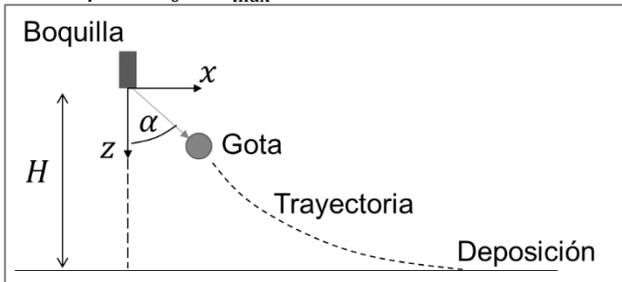


Figura 1. Trayectoria y deposición de una gota atomizada.

Empleando las ecuaciones 1-3, en la Figura 2, se presenta la distribución de tamaño de gota atomizada por la boquilla, para un ángulo $\alpha=0$. Similarmente, en la Figura 3, se presenta la distribución de ángulos iniciales para un diámetro inicial de gota de $250 \mu\text{m}$. Si la Ecuación 1 es integrada en rangos de diámetros d_0 y ángulos α , se obtiene la fracción en volumen del caudal total atomizado por la boquilla correspondiente a esos rangos.

Trayectorias de las gotas atomizadas

Una vez que abandonan la boquilla, el diámetro y la posición vertical y horizontal de cada gota se modifica según los siguientes balances:

$$\frac{dd}{dt} = -\frac{1}{kd_0} \quad d(0) = d_0 \quad (4)$$

$$\frac{dz}{dt} = v_T \quad z(0) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = \bar{U} \quad x(0) = H \tan \alpha \quad (6)$$

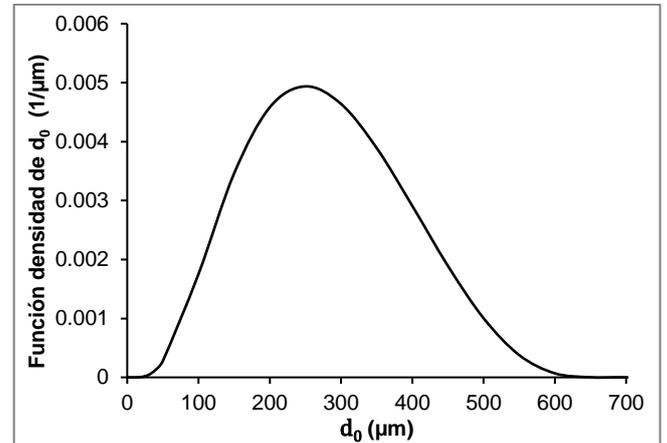


Figura 2. Distribución de tamaño de gota atomizada por la boquilla, para un ángulo $\alpha=0$.

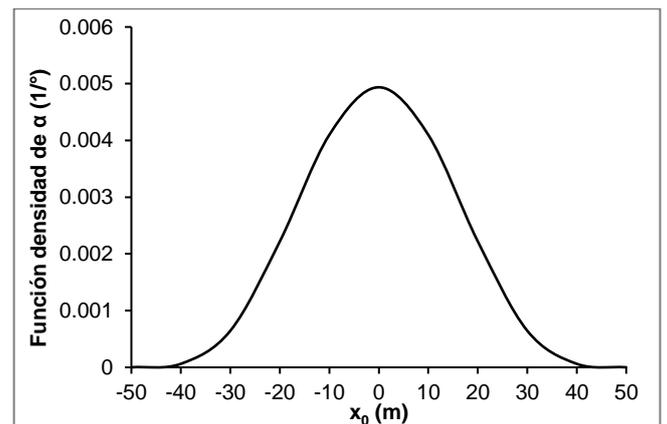


Figura 3. Distribución de ángulos para las trayectorias de gota atomizadas por la boquilla, para $d_0=250 \mu\text{m}$.

La Ecuación 4 describe la disminución del tamaño de cada gota. $k = 10^{12}/\beta\Delta T$ (unidades SI), donde ΔT es la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y húmedo y $\beta = 80 \times 10^{13} \text{ m}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ [8].

En la Ecuación 5, v_T es la velocidad terminal. Para el régimen de Stokes, v_T está dado por [7]:

$$v_T = \frac{(\rho_d - \rho_g)gd^2}{18\mu_g} \quad (7)$$

donde μ_g es la viscosidad del aire, g es la aceleración de la gravedad y ρ_d y ρ_g son las densidades de gota y aire, respectivamente.

Con respecto a la Ecuación 6, \bar{U} es un valor representativo de la velocidad de viento que afecta a las gotas, y viene dado por [5]:

$$\bar{U} = \gamma U_0 \quad (8)$$



donde U_0 es la velocidad del viento correspondiente a la altura de boquilla H y γ es un parámetro dependiente de la distribución de tamaño de gota atomizada.

Combinando las ecuaciones 4-6, es posible obtener la altura z en que se encuentra una gota en función de la distancia horizontal recorrida x :

$$z(x) = \frac{kd_0^4(\rho_d - \rho_g)g}{54\mu_g} \left[1 - \left(1 - \frac{x - H \tan \alpha}{\gamma U_0 k d_0^2} \right)^3 \right] \quad (9)$$

Dispersión

De acuerdo con la Ecuación 6, gotas con igual d_0 y x_0 tendrán las mismas trayectorias y, por lo tanto, se depositarán en el mismo lugar. Sin embargo, se sabe que las gotas tienden a desviarse de estas trayectorias, por lo que existe un campo de concentración de gotas en función de las coordenadas espaciales. Como consecuencia del fenómeno de dispersión, gotas con diferentes condiciones iniciales d_0 y x_0 son capaces de depositarse en una misma posición x . La dispersión suele describirse mediante una distribución de probabilidad gaussiana [4],[8]:

$$f_{disp}(x) = \frac{v_T}{U} \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z(x)-H)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (10)$$

La Ecuación 10 indica la concentración de gotas depositadas a una distancia x , si la trayectoria de las mismas se encuentra a una altura $z(x)$ (Figura 4).

En la Ecuación 10, σ_z es un coeficiente de dispersión dependiente del mezclado o poder dispersivo del flujo turbulento dentro de la capa límite atmosférica [4]:

$$\sigma_z = C_1(x - x_0)^{C_2} \quad (11)$$

Pasquill propuso un método que permite determinar los parámetros C_1 y C_2 a partir de una clasificación sencilla de las condiciones atmosféricas, definidas como categorías de estabilidad. En base a esta clasificación, en la Tabla 1 se presentan los parámetros obtenidos por Klug (1961) [4].

Deposición de gotas

Si se multiplican las ecuaciones 1 y 10, se obtiene una función de distribución de volumen que describe como se depositan las gotas atomizadas con diámetro d_0 y ángulo α :

$$f_{d,\alpha,x}(d_0, \alpha, x) = f_{d\alpha}(d_0, \alpha) f_{disp}(x) \quad (12)$$

La función de distribución del volumen total depositado considerando efectos de dispersión se obtiene integrando la Ecuación 12 con respecto a las condiciones iniciales d_0 y x_0 :

$$f_x(x) = \int_{-\frac{\theta}{2}}^{\frac{\theta}{2}} \int_0^{d_{max}} f_{d,\alpha,x}(d_0, \alpha, x) dd_0 d\alpha \quad (13)$$

Tabla 1. Parámetros de dispersión para diferentes clases de estabilidad atmosférica [4].

Clase de estabilidad	Atmósfera	C1	C2
A	Extremadamente inestable	0.017	1.38
B	Moderadamente inestable	0.072	1.021
C	Ligeramente inestable	0.076	0.879
D	Neutral	0.14	0.727
E	Ligeramente estable	0.217	0.61
F	Moderadamente estable	0.262	0.5

Resultados

El conjunto de ecuaciones que constituye el modelo matemático se implementó en el lenguaje de programación Python. La función de distribución del volumen total depositado se calcula hasta una distancia de 10 m. El área deseada de aplicación tiene un radio aproximado de 0.5 m debajo de la boquilla. Por lo tanto, cuanto menor sea $f_x(x)$ fuera del área deseada, más eficaz será el proceso de pulverización.

En la Figura 4, se comparan los resultados predichos por el modelo con los resultados experimentales obtenidos por van de Zande para las condiciones de la Tabla 2 [9]. Además, la Figura 4 incluye resultados de simulación correspondientes a dispersión nula ($C_1 \rightarrow 0$). Como es de esperar la dispersión produce una mayor deposición de gotas con respecto al caso sin dispersión. Se encuentra que la inclusión de la dispersión en el modelo matemático mejora el cálculo de la distribución del volumen total depositado con respecto al modelo sin dispersión.

Tabla 2. Caso de estudio.

Dato	Valor
Velocidad del viento* (m/s)	2.5
Temperatura (°C)	10
Humedad relativa (%)	70
Estabilidad atmosférica	B
P	3
Altura de boquilla H (m)	1
Boquilla	TeeJet XR 110-04

* Evaluada a una altura H .

Para ilustrar la influencia de la estabilidad atmosférica sobre la deposición de gotas, en la Figura 5 se presenta la función de deposición $f_{d,\alpha,x}(d_0, \alpha, x)$ para clases B y E de estabilidad atmosférica. Estas dos clases fueron seleccionadas para las simulaciones debido a que suelen ocurrir para condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad de viento similares (Tabla 2) [4]. Las condiciones para las



simulaciones corresponden a las de la Tabla 1. Como es de esperar, a medida que la atmósfera se vuelve más estable (desde la clase B a la clase E), la deposición de gotas disminuye. Para las condiciones simuladas, la estabilidad atmosférica influye en el rango 3-70 m, aproximadamente. Para las clases C y D, se obtienen curvas de deposición intermedias entre las de B y E (resultados no mostrados). Similarmente, Para la clase A se obtiene una curva de deposición levemente superior a la de clase B, mientras que para la clase F la curva de deposición es inferior a la de clase E.

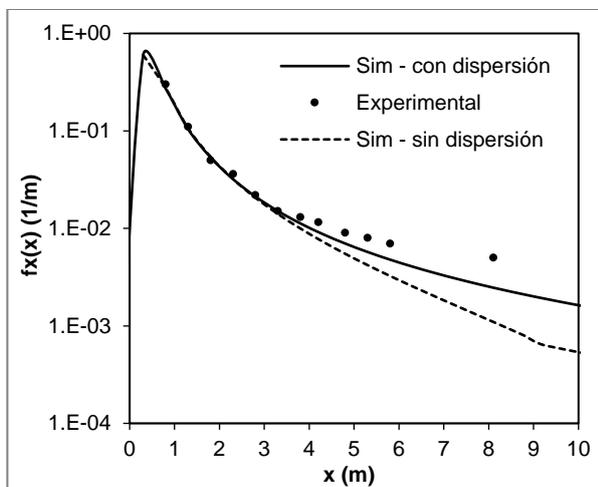


Figura 4. Comparación entre valores experimentales y predichos por el modelo (con y sin dispersión) de la función de distribución del volumen total depositado.

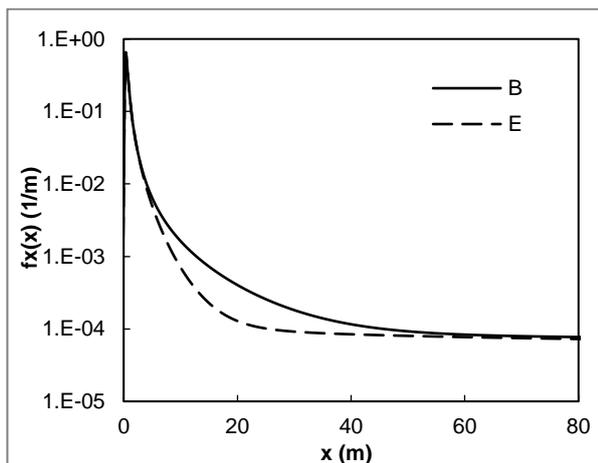


Figura 5. Función de distribución del volumen total depositado para clases B y E de estabilidad atmosférica.

En la Figura 6 se muestra la distribución de gotas depositadas para velocidades de viento de 1.25 m/s y 2.5 m/s, para las clases B y E de estabilidad atmosférica. Cuando la velocidad del viento aumenta de 1.5 a 2.5 m/s, el arrastre de las

gotas aumenta, y un mayor volumen de gotas se deposita a distancias mayores. En consecuencia, para la menor velocidad de viento, se encuentra una mayor deposición de gotas a mayores distancias. Este comportamiento es observado para las dos clases de estabilidad atmosférica.

Si bien no se muestran los resultados, se realizaron simulaciones adicionales para analizar la influencia de la temperatura y la humedad relativa sobre la deposición de las gotas. Se encontró que, si la temperatura ambiente aumenta y la humedad relativa disminuye, la deposición de las gotas disminuye en los primeros 30 m, para luego aumentar levemente a distancias mayores. Esto se debe a la mayor velocidad de evaporación, que provoca una mayor disminución en el tamaño de las gotas, siendo las mismas arrastradas a mayores distancias.

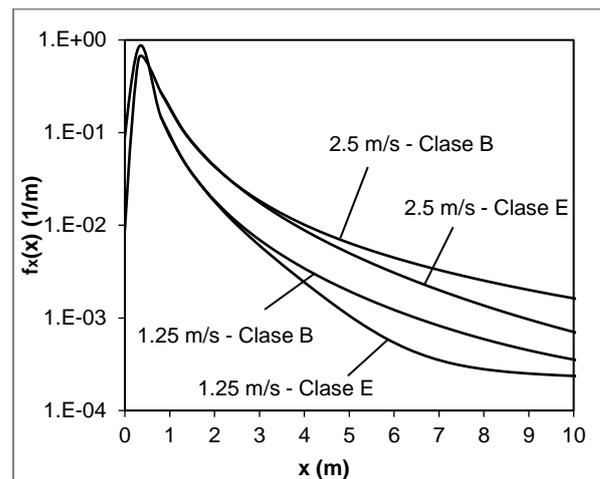


Figura 6. Función de distribución del volumen total depositado para clases B y E, y velocidades de viento de 1.25 y 2.5 m/s.

Para analizar la influencia de la estabilidad atmosférica sobre diferentes tamaños de gota, en las Figuras 7-9 se grafica la función de distribución $f_{d,\alpha,x}(d_0, \alpha, x)$, para $\alpha = 0^\circ$ y fijando d_0 en 210, 130 y 30 μm , respectivamente. En la Figura 7, debido a que las gotas simuladas son relativamente grandes ($d_0=210 \mu\text{m}$), se depositan en distancias cortas, siendo poco influidas por las condiciones ambientales. Por lo tanto, la función de deposición $f_{d,\alpha,x}(d_0, \alpha, x)$ es similar para las dos clases de estabilidad atmosférica simuladas (B y E).

En la Figura 8, el diámetro inicial de gota es $d_0=130 \mu\text{m}$. Para las dos clases de estabilidad simuladas, las gotas se depositan alrededor de una distancia de aproximadamente 1 m. Sin



embargo, las gotas se encuentran más distribuidas para la clase B que para la clase E, debido a la mayor dispersión de la clase B con respecto a la E.

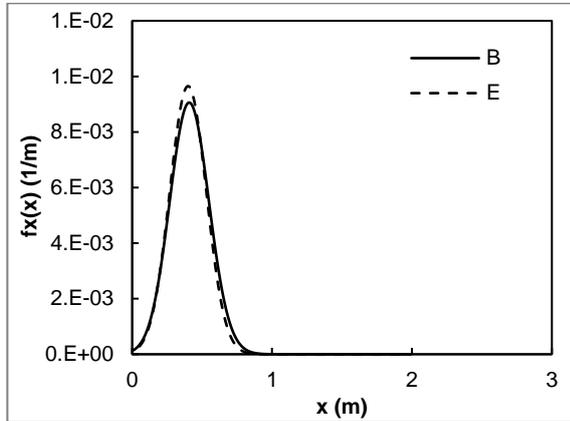


Figura 7. Función de distribución de volumen para gotas con $d_0=210 \mu\text{m}$ y $\alpha = 0^\circ$.

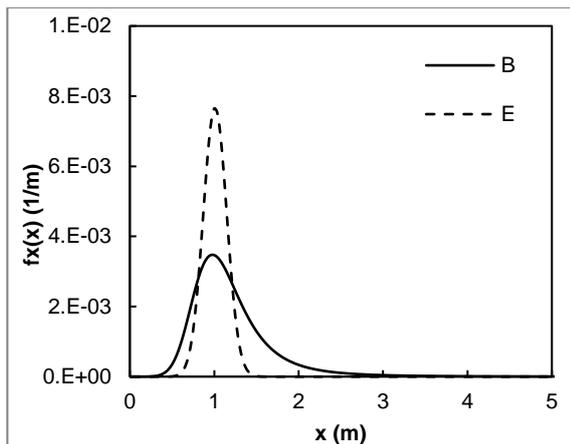


Figura 8. Función de distribución de volumen para gotas con $d_0=130 \mu\text{m}$ y $\alpha = 0^\circ$.

En la Figura 9, las gotas simuladas son relativamente pequeñas ($d_0=30 \mu\text{m}$). Las curvas de deposición presentan un máximo a 5 y 13 m para clases B y E, respectivamente. Esta diferencia en las curvas de deposición indica que la dispersión atmosférica impacta más en las gotas de menor tamaño. A distancias superiores a 8 m, se encuentra una mayor deposición de gotas cuando la estabilidad atmosférica es clase E. Si bien el spray atomizado posee pocas gotas de $30 \mu\text{m}$ (ver Figura 2), la presencia de estas gotas se extiende a distancias muy grandes, tal como se muestra en la Figura 9. Este resultado demuestra el riesgo de pulverizar en condiciones atmosféricas estables: las gotas de pequeño tamaño permanecen "flotando" en el aire y se trasladan durante grandes distancias hasta que alcanzan una zona turbulenta y se depositan, o

bien se produce la evaporación total del agua y se transforman en un aerosol.

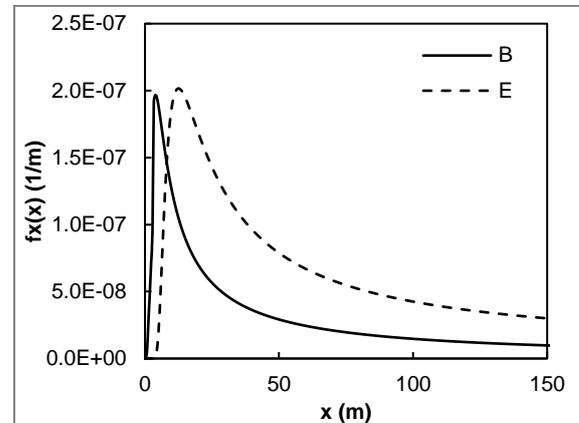


Figura 9. Función de distribución de volumen para gotas con $d_0=30 \mu\text{m}$ y $\alpha = 0^\circ$.

CONCLUSIONES

El modelo presentado en este trabajo presentó una correspondencia aceptable con los datos experimentales al incluir el fenómeno de dispersión. Aun así, es posible que los parámetros de dispersión utilizados (Tabla 1) no sean los más adecuados para el caso estudiado. Con respecto a la función de distribución del volumen total depositado, las simulaciones indican que la estabilidad atmosférica afecta principalmente la deposición de gotas en el rango 3-70 m. Sin embargo, la estabilidad atmosférica impacta considerablemente en las gotas pequeñas, las cuales permanecen suspendidas en el aire por más tiempo cuanto más estable es la atmósfera. Como consecuencia, las gotas pequeñas se mueven durante grandes distancias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional del Sur (UNS) por el soporte financiero.

REFERENCIAS

- [1] Nuyttens, D. (2007). Drift from field crop sprayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means. *Katholieke Universiteit Leuven*.
- [2] Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.



- [3] Fritz, B. K., & Hoffmann, W. C. (2016). Measuring Spray Droplet Size from Agricultural Nozzles Using Laser Diffraction. *J. Vis. Exp.*, (115), 54533.
- [4] Tan, Z. *Air Pollution and Greenhouse Gases From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control*. Springer. 2014.
- [5] Renaudo, C.A. (2020). *Modelo predictivo de la deriva de pulverización en aplicaciones agrícolas de botalón*. Universidad Nacional del Sur, Argentina. 2020.
- [6] Leunda, P., Debouche, C., & Caussin, R. (1990). Predicting the transverse volume distribution under an agricultural spray boom. *Crop protection*, 9(2), 111-114.
- [7] Zannetti, P. (Ed.). (2013). *Air pollution modeling: theories, computational methods and available software*. Springer Science & Business Media.
- [8] Lebeau, F.; Verstraete, A.; Stainier, C.; Destain, M. F. (2011). RTDrift: A real time model for estimating spray drift from ground applications. *Comput. Electron. Agric.*, 77(2), 161–174.
- [9] van de Zande, J. C., Michielsen, J. G. P., Stallinga, H., & van Velde, P. (2014). Spray drift of reducing nozzle types spraying a bare soil surface with a boom sprayer. *International Advances in Pesticide Application*, Oxford, UK (Vol. 122, pp. 245-254).