

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS FENÓMENOS DE LA MICROFÍSICA Y
DISPERSIÓN DE GOTAS PULVERIZADAS EN APLICACIONES DE
AGROQUÍMICOS**

por

Carlos Germán Sedano

Tesis para obtener el grado académico de

DOCTOR EN INGENIERÍA

Mención en Ciencias Agropecuarias

de las Facultades de Ciencias de la Alimentación, Ciencias Agropecuarias e Ingeniería
de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ENTRE RÍOS



Director de la Tesis: Dr. César Augusto Aguirre.

Septiembre de 2019

Resumen

En el presente trabajo se utilizan técnicas de simulación numérica a fin de representar y analizar los procesos físicos que ocurren cuando se realizan pulverizaciones terrestres de fitosanitarios. Para ello, se utilizó el código computacional Advanced Regional Prediction System (ARPS) desarrollado por Center of Analysis and Prediction of Storm (CAPS) y la Universidad de Oklahoma (EEUU), que simula las condiciones meteorológicas mediante simulación de grandes escalas turbulentas (LES), acoplado a un modelo lagrangiano (STO) incorporando para la eyección de gotas desde una boquilla de abanico plano HARDI™ ISO F110-03. El trabajo está organizado en las siguientes etapas:

- (a) Simulación de la eyección de las gotas.
- (b) Simulación de la trayectoria y la evaporación.
- (c) Simulación de la colisión entre gotas.
- (d) Simulación de la experiencia de la deriva.
- (e) Análisis de recomendaciones de buenas prácticas.
- (f) Aplicación del método de simulación en una pulverización virtual.

(a) Se utilizó una función de densidad de probabilidad Weibull, con un parámetro de forma $m=2,61$ y de escala $k=301,23$ para describir el espectro de los diámetros de las gotas eyectadas. El diámetro medio, desvío estándar y los parámetros de la distribución Weibull fueron obtenidos utilizando mediciones de laboratorio realizadas bajo Norma ISO 22866 a 0,5 m del pico. El diámetro medio de las gotas eyectadas es de $267,67\mu m$ y el ajuste respecto a los datos de laboratorio es muy satisfactorio con un $R^2=0,99$. La curva de distribución de diámetros obtenida a partir de esta metodología no considera los fenómenos de evaporación y colisión de gotas que podría ocurrir durante su trayectoria.

(b) Utilizando simulación de fluidos confinados, se determinó que la velocidad de eyección de las gotas alcanza los $16,356 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, con una presión de trabajo de 0,3 MPa. La determinación de la velocidad de eyección, permitió determinar el modelo de coeficiente de arrastre que presenta mejor ajuste respecto a las pruebas de laboratorio. Con ello, se pudo determinar que las partículas menores a $300 \mu\text{m}$ alcanzan la velocidad de sedimentación antes de llegar al suelo, lo que podría indicar que son propensas a deriva.

Para la simulación de la trayectoria y evaporación de las gotas se utilizó el modelo de doble vía acoplado ARPS-STO. Para la simulación del fenómeno de evaporación de gotas, se utilizó un modelo de transferencia de masa por convección. Se realizaron nueve simulaciones de eyección de gotas considerando las diferentes condiciones meteorológicas de los ensayos realizados en laboratorio. La comparación entre los resultados de las simulaciones y las mediciones experimentales presentan un $R^2=0,96$ en el ajuste de los diámetros de las gotas evaporadas próximas a los $100 \mu\text{m}$ y un $R^2=0,72$ en el ajuste de la distancia recorrida. De igual manera, se obtiene un $R^2=0,99$ en los diámetros de las gotas evaporadas próximas a los $200 \mu\text{m}$ y un $R^2=0,93$ en el ajuste de su distancia recorrida.

(c) Para la simulación del fenómeno de colisión de gotas se utilizó un modelo determinista de colisión binaria. Este modelo utiliza el parámetro Weber simétrico. Se obtuvieron cinco mapas de colisión para diferentes casos de temperatura y tensión superficial del líquido. Se observa que al reducir la tensión superficial, se reducen los fenómenos que generan gotas satélite y aumentan los fenómenos de rebote y coalescencia. De igual manera, al reducir la tensión superficial también se observó una reducción en la cantidad y diámetro de las gotas satélites generadas en las colisiones. Considerando los fenómenos de evaporación y colisión se debió modificar el diámetro medio de las gotas eyectadas a la salida del pico a un valor de $350 \mu\text{m}$, alcanzando un $R^2=0,97$ a 0,5 m del pico.

(d) La validación de la deriva fue realizada utilizando dos ensayos bajo Norma ISO 22866: i) En tunel de viento, ii) A campo. i) En el tunel de viento, el modelo presenta un buen ajuste hasta los 3 m de distancia, subestimando a partir de ésta los valores de laboratorio. ii) Para la validación a campo, se simuló el ensayo denominado RS24 considerando las variables meteorológicas, características del fluido eyectado y el avance del tractor. Se observó que el modelo subestima los valores medios registrados por el autor, pero los mismos se encuentran dentro de la desviación estandar presentada en la medición a campo. Es

importante destacar que dicha medición fue realizada con las partículas sedimentadas. Se registró que el 0,1156 % del volumen se encuentra en el aire, además el 0,0008 % de las gotas salieron del dominio de simulación superando los 38 m corriente abajo y se registró una evaporación del 0,0296 % del volumen. Por otra parte, algunas gotas alcanzaron una altura máxima de 331,8 m.

(e) Se analizaron tres manuales de buenas prácticas para la aplicación de fitosanitarios, considerando las variables meteorológicas en tres estaciones de la provincia de Entre Ríos para el año 2018. Se observó que existe mayor proporción mensual de horas disponibles para la aplicación terrestre de fitosanitarios durante la jornada nocturna que durante la jornada diurna. De los resultados de la simulación, siguiendo las propuestas analizadas, resulta que los diámetros de las gotas menores de $25 \mu m$ se evaporan antes de recorrer los 0,02 m. Esta situación también se observó en las simulaciones realizadas fuera del rango de aplicación establecido en los manuales.

(f) Se simuló una pulverización virtual de 65,5 s de duración, considerando un equipo de arraste compuesto por diez boquillas de abanico plano HARDI™ ISO F110-03. Se utilizaron imágenes satelitales y capas de un GIS a fin de tener en cuenta las condiciones reales de aplicación. Las condiciones meteorológicas iniciales fueron fijadas a partir de los registros de una estación meteorológica instalada en el campo. Se utilizó el modelo de núcleo sólido para simular la evaporación de gotas. Como resultado se obtuvo que el 8,72 % del volumen se encontraba en suspensión a los 65,5 s; alcanzando una altura máxima de 5,2 m. Se evaporaron 136.301 gotas cuyos diámetros iniciales se encuentran entre $176,17 \mu m$ y $0,005 \mu m$, alcanzando un 0,47 % del volumen eyectado. Las partículas recorrieron una distancia de 410,36 m. La distancia recorrida por las partículas supera la zona de exclusión de 100 m establecida por el Decreto Provincial vigente.

De esta forma, se presentan los primeros resultados de un sistema de pulverización virtual, validado bajo estándares internacionales.

Palabras claves— Deriva, Pulverización Agropecuaria, Simulación, Métodos Numéricos, Diferencias Finitas.