

## ANÁLISIS DE DIFERENTES COEFICIENTES DE ARRASTRE EN LA SIMULACIÓN DE LA EYECCIÓN DE SPRAY DESDE UNA BOQUILLA DE PULVERIZACIÓN

### ANALYSIS OF DIFFERENT DRAG COEFFICIENTS IN THE SIMULATION OF SPRAY EJECTION FROM A SPRAY NOZZLE

Carlos G. Sedano<sup>a,c</sup>, Cesar A. Aguirre<sup>a,b,c</sup>, Armando B. Brizuela<sup>a,b</sup>, Guillermo A. Rondan<sup>b</sup>, Marisa Battisti<sup>c</sup> y Damián Lopez<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta 11 – Km 10 (3101), Oro Verde, Entre Ríos, Argentina, [sedanocarlos@gmail.com](mailto:sedanocarlos@gmail.com); [cesaraguirredalotto@gmail.com](mailto:cesaraguirredalotto@gmail.com)

<sup>b</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

<sup>c</sup>Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de Entre Ríos, Ruta 11 – Km 10 (3101), Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

**Palabras clave:** Modelos de simulación, coeficiente de arrastre, Eyección de spray, Herbicidas.

**Resumen.** En el presente trabajo, se analizan diferentes expresiones de coeficiente de arrastre en la trayectoria de las partículas líquidas que fueron incluidas en un modelo acoplado LES-STO (Large-eddy Simulation – Stochastic lagrangian one-particle model). A partir de mediciones de laboratorio para la boquilla tipo HARDI™ ISO F110-O3 se simulan las posiciones, velocidades y diámetros iniciales. En su trayectoria se calcula el número de Reynolds referido a la partícula líquida, coeficiente de arrastre, velocidades y posiciones corriente abajo. Durante el tiempo de la simulación, se registran las velocidades de las partículas a una distancia vertical de 0,5 m desde el punto de eyección. Para el coeficiente de arrastre se contrastaron seis expresiones diferentes, siendo la propuesta por R. Turton et al. (Pow. Tech., 47(1):83-86(1986)) la que obtuvo el mejor ajuste. Con estas determinaciones se puede concluir que colocando la boquilla a 0,75 m de altura las partículas mayores a 300 µm no alcanzan la velocidad de sedimentación antes de tocar el suelo.

**Keywords:** Simulation models, Drag coefficient, Spray ejection, Herbicides.

**Abstract.** In the present work, different expressions of drag coefficient in the trajectory of liquid particles that were included in a LES-STO (Large-eddy Simulation - Stochastic lagrangian one-particle model) coupled model are analyzed. The initial positions, velocities and diameters are simulated from laboratory measurements for the nozzle type HARDI™ ISO F110-O3. Its trajectory calculates the Reynolds number referred to the liquid particle, drag coefficient, velocities and downstream positions. During the simulation time, particle velocities are recorded at a vertical distance of 0.5 m from the ejection point. Six different expressions were contrasted for the drag coefficient, the one proposed by R. Turton et al. (Pow. Tech., 47(1):83-86(1986)) being the one that obtained the best adjustment. With these determinations, it can be concluded that by placing the nozzle at a height of 0.75 m, particles larger than 300 µm do not reach the sedimentation velocity before touching the ground.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las pulverizaciones agropecuarias se encuentran en una gran controversia debido a la dificultad que existe para determinar el alcance de las partículas emitidas durante la pulverización y, consecuentemente, su impacto en los diferentes ecosistemas a los cuales no debería llegar.

En este contexto, es que resulta importante lograr avances en la simulación computacional de los procesos físicos a los que se encuentran sometidas las partículas, a fin de optimizar los procesos minimizando el riesgo de deriva.

Atendiendo la problemática, en el presente trabajo se utilizaron técnicas de simulación numérica a fin de evaluar diferentes expresiones del coeficiente de arrastre que permitan obtener resultados satisfactorios en la estimación de las trayectorias de las gotitas en relación a la velocidad de eyección, diámetros y altura de la boquilla pulverizadora. Estos aspectos permiten conocer umbrales de tamaño de gotas para diferentes posiciones del botalón, presión de eyección y condiciones de temperatura y viento, por debajo de los cuales las gotitas no alcanzan la zona destinada a la aplicación del producto por quedar expuestas a la deriva. Para ello se utilizó el código acoplado euler-lagrangiano de partículas LES-STO (Large-eddy Simulation – modelo estocástico Lagrangiano) para simular la trayectoria de dichas partículas en su fase líquida. El código euleriano LES a diferencias finitas es el Advanced Regional Prediction Systems (ARPS) desarrollado por el Centro de Análisis y Predicción de tormentas (CAPS) de la Universidad de Oklahoma, (Xue *et al.*, 1995). Este código ha sido adaptado por Aguirre (2005) para la simulación de partículas fluidas para simular la dispersión atmosférica de especies químicas utilizando un modelo estocástico lagrangiano a una partícula (STO). El acople de ambos modelos (LES-STO) fue validado con mediciones de concentración de un gas pasivo realizadas en túnel de viento por Fackrell and Robins (1982) para una superficie de suelo plano y en presencia de una colina de suave pendiente realizadas por Gong (1991). Posteriormente, fue utilizado para obtener una descripción de los fenómenos de dispersión atmosférica, difusión y reacciones químicas de especies en fases gaseosa (Aguirre *et al.*, 2006a; b), para la simulación de la pluma de dispersión de gases en un episodio de emisión con viento prevalente del este en el caso de la dispersión de olores desde una planta de fabricación de celulosa ubicada en la República Oriental del Uruguay (Aguirre *et al.*, 2012), para una situación de dispersión de olores desde un basural a cielo abierto en la localidad de Paraná, Argentina (Aguirre *et al.*, 2013). Posteriormente, Aguirre *et al.* (2014a) incorpora un acople del modelo LES-STO con el Modelo de Capa Límite Atmosférica de Meso-escala (MCLM) propuesto por Berri (1987) para tener en cuenta las variaciones de la circulación de viento durante un día en la región del Río de la Plata incorporadas como condiciones de borde dinámicas. Orcelet *et al.* (2016) utiliza este modelo acoplado para representar la dispersión atmosférica de Total de Azufre Reducido (TRS) emanados desde la planta de fabricación de celulosa durante varios días contrastando los resultados de las simulaciones con reportes de olores de autoridades del Programa de Monitoreo Ambiental de la Comisión Administradora Binacional (Argentina-Uruguay). Además, Aguirre *et al.* (2014b) presentan el modelo LES-STO para la dispersión de partículas sólidas de diámetros del orden de las decenas de micrón, Aguirre *et al.* (2016) contrastan los resultados de este modelo con mediciones de concentración de partículas de metales en cercanías de una planta de fundición en Tucumán (Argentina) que funcionó durante 24 años, realizadas por Fernández-Turiel *et al.* (2001). Otros autores utilizaron este modelo acoplado para dispersión de partículas líquidas (Vinkovic *et al.*, 2006a) y partículas sólidas en movimiento de saltación o suspensión en túnel de viento (Vinkovic *et al.*, 2006b). Sedano *et al.* (2017), presenta un algoritmo de eyección aleatoria de gotas de diferentes diámetros cuya función de densidad de probabilidad ajusta a una

distribución *Weibull* de dos parámetros. Estos parámetros son ajustados previamente utilizando datos de mediciones experimentales en laboratorio usando un analizador de partículas de fase doppler (PDPA) realizadas por Nuyttens (2007). Luego, presentan los resultados preliminares de la eyección del producto desde una boquilla pulverizadora HARDI™ ISO F110 03, contrastando los valores de velocidades de partículas líquidas en función del diámetro con mediciones experimentales de laboratorio realizadas por Sidahmed *et al.* (1998); Tuck *et al.* (1997); Holterman (2003) y Nuyttens (2007).

Este trabajo presenta un análisis de diferentes expresiones para el coeficiente de arrastre aerodinámico con el fin obtener el modelo que mejor ajusta a dichas mediciones de velocidad de las partículas líquidas.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Parámetros característicos de las partículas líquidas

En trabajos previos, Sedano *et al.* (2017), presentaron el modelo para la generación y aleatorización en el tiempo de las partículas que son eyectadas desde una boquilla HARDI™ ISO F110 03.

Con el mismo modelo pero utilizando un acople bi-direccional entre el modelo LES y el STO, es posible tener en cuenta el efecto que produce una concentración elevada de partículas líquidas de diferente tamaño al flujo de aire que las transporta. Este efecto es tenido en cuenta en la ecuación de balance de la cantidad de movimiento del aire. Se considera que las partículas poseen una forma esférica constante en su trayectoria desde que fueron eyectadas por la boquilla. Además, en este trabajo no se simulan los procesos de evaporación-condensación, como así tampoco la cinética y dinámica que involucra la interacción entre las partículas (rebote, ruptura y coalescencia).

Asumiendo estas simplificaciones, la fuerza  $F_i$  de una partícula líquida de masa  $m$  en la dirección  $i=1,2,3$  ( $x,y,z$ ) del sistema de coordenadas cartesianas, donde  $x$  es la dirección del semieje mayor de la elipse,  $y$  es la dirección transversal y  $z$  es la dirección vertical, depende sólo de la viscosidad y la gravedad:

$$\frac{F_i}{m} = \underbrace{\frac{U_i - V_i}{\tau}}_{\text{Aceleración por Viscosidad}} - \underbrace{g_i \delta_{i3}}_{\text{Aceleración por Gravedad}} \quad (1)$$

Sedano *et al.* (2017) dividen el proceso aerodinámico de transporte de las partículas líquidas en dos etapas según es mencionado por Holterman (2003): un estado transitorio donde la relación de velocidades entre la gotita y el aire es variable en el transcurso del tiempo y un estado de sedimentación, donde esta diferencia de velocidades se mantiene constante mientras la partícula es transportada corriente abajo. En (1)  $\tau$  representa el tiempo de relajación de la partícula líquida (Holterman, 2003) que indica el tiempo necesario para que la partícula se adapte a los cambios de velocidad producto de la turbulencia del aire y la gravedad  $g_i$ ,  $V_i$  representa la velocidad de la partícula líquida y  $U_i$  representa la velocidad del aire en la posición de la misma.

#### 2.2.1 Parámetros característicos de las partículas líquidas – Estado Transitorio (ET)

En ET,  $\tau$  puede ser obtenida considerando la Fuerza de arrastre por viscosidad  $F_D$ :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_i |U_i - V_i|^2, \quad (2)$$

siendo  $\rho$  la densidad del aire,  $C_D$  el coeficiente de arrastre dinámico debido a la fricción del aire y  $A_l$  el área proyectada de la partícula en dirección normal al flujo.

Combinando el primer término del segundo miembro de (1) con (2) se obtiene el tiempo de relajación en ET  $\tau$  :

$$\tau = \frac{4}{3} \frac{\phi}{C_D} \frac{\rho_l}{\rho} \frac{1}{|U_i - V_i|}, \quad (3)$$

donde,  $\rho_l$  es la densidad de la partícula líquida y  $\phi$  es su diámetro.

Como la partícula líquida se considera esférica, el coeficiente de arrastre  $C_D$  depende del diámetro de la partícula  $\phi$  y de la viscosidad del aire  $\nu$ . Existen diferentes expresiones para estimar dicho coeficiente. Algunas de ellas fueron utilizadas en este trabajo para realizar un análisis del grado de ajuste de las mismas con valores de velocidad de gotas medidos experimentalmente. Las expresiones utilizadas para el cálculo del coeficiente de arrastre fueron propuestas por Clift *et al.* (1971), Flemmer *et al.* (1986), Turton *et al.* (1986), Brown *et al.* (2003), Cheng (2009) y Mikhailov *et al.* (2012) como se muestran en la Tabla I:

Autor	Modelo	Ecuación
Clift <i>et al.</i> (1971)	$C_D = \frac{24}{\Re e_p} \left(1 + 0,15 \Re e_p^{0,687}\right) + \frac{0,42}{1 + 42500 \Re e_p^{-1,16}}$	(4)
Flemmer <i>et al.</i> (1986)	$C_D = \frac{24}{\Re e_p} 10^\alpha, \quad \alpha = 0,261 \Re e_p^{0,369} - 0,105 \Re e_p^{0,431} - \frac{0,124}{1 + \log^2 \Re e_p}$	(5)
Turton <i>et al.</i> (1986)	$C_D = \frac{24}{\Re e_p} \left(1 + 0,173 \Re e_p^{0,657}\right) + \frac{0,413}{1 + 16300 \Re e_p^{-1,09}}, \quad \Re e_p < 2 \times 10^5$	(6)
Brown <i>et al.</i> (2003)	$C_D = \frac{24}{\Re e_p} \left(1 + 0,15 \Re e_p^{0,681}\right) + \frac{0,407}{1 + 8710 \Re e_p^{-1}}, \quad \Re e_p < 2 \times 10^5$	(7)
Cheng (2009)	$C_D = \frac{24}{\Re e_p} \left(1 + 0,27 \Re e_p\right)^{0,43} + 0,47 \left(1 - \exp\left(-0,04 \Re e_p^{0,38}\right)\right)$	(8)
Mikhailov <i>et al.</i> (2012)	$C_D = \frac{777 \left( (669806 / 875) + (114976 / 1155) \Re e_p + (707 / 1380) \Re e_p^2 \right)}{646 \Re e_p \left( (32869 / 952) + (924 / 643) \Re e_p + (1 / 385718) \Re e_p^2 \right)}$	(9)

Tabla I: Coeficiente de arrastre evaluados.

Este coeficiente de arrastre, depende del número de Reynolds, el cual es calculado en cada paso de tiempo y para cada partícula líquida:

$$\Re e_p = \phi \frac{|U_i - V_i|}{\nu}. \quad (10)$$

## 2.2.2 Parámetros característicos de las partículas líquidas – Estado Sedimentación (ES)

Si se logra un equilibrio entre las fuerzas de arrastre y gravedad, la partícula líquida continúa su trayectoria con una velocidad de sedimentación  $|U_i - V_i| \delta_{i3} = V_s$ . Esta velocidad es directamente proporcional a la raíz cuadrada del diámetro de la partícula y se obtiene a partir de las ecuaciones (1–10) (Nuyttens, 2007):

$$V_s = \left( \frac{4}{3} \frac{\rho_l g \phi}{\rho C_{D,s}} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

El tiempo de relajación en función de la velocidad de sedimentación es obtenido combinando (1), cuando ambas fuerzas se equilibran, y (11):

$$\tau_s = \frac{V_s}{g} \quad (12)$$

Se hace notar que en (11) se debe obtener el coeficiente de arrastre en régimen de sedimentación  $C_{D,s}$  de acuerdo a las ecuaciones (4–9). Éste depende del número de Reynolds referido a la partícula líquida en régimen de sedimentación  $\Re_{p,s}$ :

$$\Re_{p,s} = \phi \frac{V_s}{\nu}. \quad (13)$$

Como se observa en (13), el número de Reynolds de sedimentación  $\Re_{p,s}$  depende de  $V_s$  por lo que ambos son calculados de forma iterativa usando (4–9, 11 y 13). Se define también la fuerza de arrastre en este régimen como:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_{D,s} A_l V_s^2. \quad (14)$$

Nuyttens (2007), utiliza tres tipos de parámetros a fin de caracterizar las velocidades de las gotas:

- $V_{vol\ 10}$ ,  $V_{vol\ 25}$ ,  $V_{vol\ 50}$ ,  $V_{vol\ 75}$ ,  $V_{vol\ 90}$ : velocidad de las gotas ( $m.s^{-1}$ ) debajo de las cuales las gotitas más lentas constituyen 10%, 25%, 50%, 75% y 90% del volumen total de pulverización.
- $V_{AVG}$ : velocidad media de las gotas ( $m.s^{-1}$ ).
- $VSF$ : parametro adimensional que indica la uniformidad del tamaño-velocidad de gota, el cual se define como:

$$VSF = \frac{V_{vol\ 90} - V_{vol\ 10}}{V_{vol\ 50}}. \quad (15)$$

Asimismo, se realiza un análisis de sensibilidad de la varianza de los resultados de las diferentes simulaciones de la velocidad a fin de determinar la expresión del coeficiente de arrastre que mejor se ajusta los valores obtenidos de las mediciones de laboratorio.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Determinación del Coeficiente de arrastre

En el proceso de análisis de las expresiones de  $C_D$  se simularon 40 segundos de eyección de partículas líquidas, representando la emisión de 15.500.000 de partículas en condiciones de viento calmo. Se propuso un paso de tiempo de  $2 \times 10^{-4}$  s que surge de analizar la convergencia de la ecuación estocástica que simula la velocidad de las partículas. Se registraron los valores de diámetro y velocidad de las gotitas simuladas durante su trayectoria a 0,5 m debajo de la boquilla de eyección y se contrastaron con las mediciones de laboratorio aportados por Nuyttens (2007).

Se pudo comprobar que los modelos de *Clift et al. (1971)*, *Flemmer et al. (1986)*, *Turton et al. (1986)*, *Brown et al. (2003)* y *Cheng et al. (2009)* poseen similar nivel de ajuste a las velocidades medidas en laboratorio, pudiéndose apreciar estas diferencias en las Tablas II y Tabla III. Además, en estas tablas se observa la mayor velocidad debajo de la cual la velocidad máxima constituye el 10%, 25%, 50%, 75% y 90% del total del volumen de aplicación. Entre ellas, se observa que el modelo propuesto por *Turton et al. (1986)* posee mejor ajuste según el test de bondad  $\chi^2$  y de la razón de varianzas  $F$  de Snedecor (*Walpole et al., 2006*). Para esta opción de cálculo de  $C_D$  se ha obtenido un valor  $\chi^2 = 11,32$ ; la razón de varianzas resultó de  $F = 2,14$ ; el parámetro de uniformidad del tamaño-velocidad de la gota  $VSF = 1,98$  y la velocidad media de las mismas fue de  $1,69 \text{ m.s}^{-1}$ . Estos valores son mostrados junto con las demás opciones de cálculo de  $C_D$  en la (Tabla III). Además, en la misma tabla se observa la componente vertical de la velocidad de las partículas y el error de medición con PDPA registrado en laboratorio.

% Volume	Velocity (ms <sup>-1</sup> ) PDPA (Nuyttens, 2007)	Error PDPA (Nuyttens, 2007)	Velocity (ms <sup>-1</sup> ) with $C_D$ of Clift et al. (1971)	Velocity (ms <sup>-1</sup> ) with $C_D$ of Flemmer et al. (1986)	Velocity (ms <sup>-1</sup> ) with $C_D$ of Turton et al. (1986)	Velocity (ms <sup>-1</sup> ) with $C_D$ of Brown et al. (2003)	Velocity (ms <sup>-1</sup> ) with $C_D$ of Cheng (2009)	Velocity (ms <sup>-1</sup> ) with $C_D$ of Mikhailov et al. (2012)
10	1,1	0,2	0,9	0,82	1	0,88	0,9	0,73
25	2	0,3	1,43	1,23	1,45	1,45	1,36	1,05
50	3,9	0,4	3,78	3,87	3,17	3,95	3,89	7,2
75	6,6	0,4	6,43	6,86	6,87	6,65	6,7	11,46
90	9,5	0,6	8,31	8,74	7,29	8,47	8,56	13,7
VSF	2,1	0,3	1,96	2,05	1,98	1,92	1,97	1,80
V <sub>AVG</sub>	1,50	0,2	1,51	1,36	1,69	1,58	1,50	1,86

Tabla II: Velocidad debajo de la cual la velocidad máxima constituye el 10%, 25%, 50%, 75% y 90% del total del volumen de aplicación

Diametro ( $\mu\text{m}$ )	Velocidad (ms <sup>-1</sup> ) Nuyttens PDPA	Error PDPA Nuyttens	Velocidad (ms <sup>-1</sup> ) con $C_D$ de Clift et al. (1971)	Velocidad (ms <sup>-1</sup> ) con $C_D$ de Flemmer et al. (1986)	Velocidad (ms <sup>-1</sup> ) con $C_D$ de Turton et al. (1986)	Velocidad (ms <sup>-1</sup> ) con $C_D$ de Brown et al. (2003)	Velocidad (ms <sup>-1</sup> ) con $C_D$ de Cheng (2009)	Velocidad (ms <sup>-1</sup> ) con $C_D$ de Mikhailov et al. (2012)
0-40	1,1	1,3	0,22	0,17	0,37	0,27	0,25	0,24
40-80	1,4	1,3	0,49	0,4	0,62	0,48	0,45	0,48
80-120	1,6	1,3	0,71	0,71	0,72	0,65	0,67	0,6
120-160	1,9	1,5	0,87	0,79	0,84	0,8	0,82	0,73
160-200	2,4	2	1,07	0,9	1,01	0,99	0,98	0,99
200-240	3,15	2,2	1,72	1,53	1,6	1,66	1,58	3,22
240-280	4,5	2,8	2,99	3,02	2,92	2,99	2,96	6,48
280-320	5,3	3	4,41	4,58	4,34	4,43	4,42	8,8
320-360	5,8	3	5,7	5,94	5,67	5,71	5,77	10,44
360-400	6,2	3	6,82	7,05	6,81	6,8	6,91	11,61
400-440	5,6	3	7,74	7,99	7,77	7,74	7,79	12,5
440-480	6,7	4,2	8,59	8,75	8,55	8,55	8,59	13,15
Bondad de Ajuste $\chi^2$			13,34	17,57	11,32	13,49	14,26	24,93
F-Test			2,16	2,37	2,14	2,18	2,23	6,35

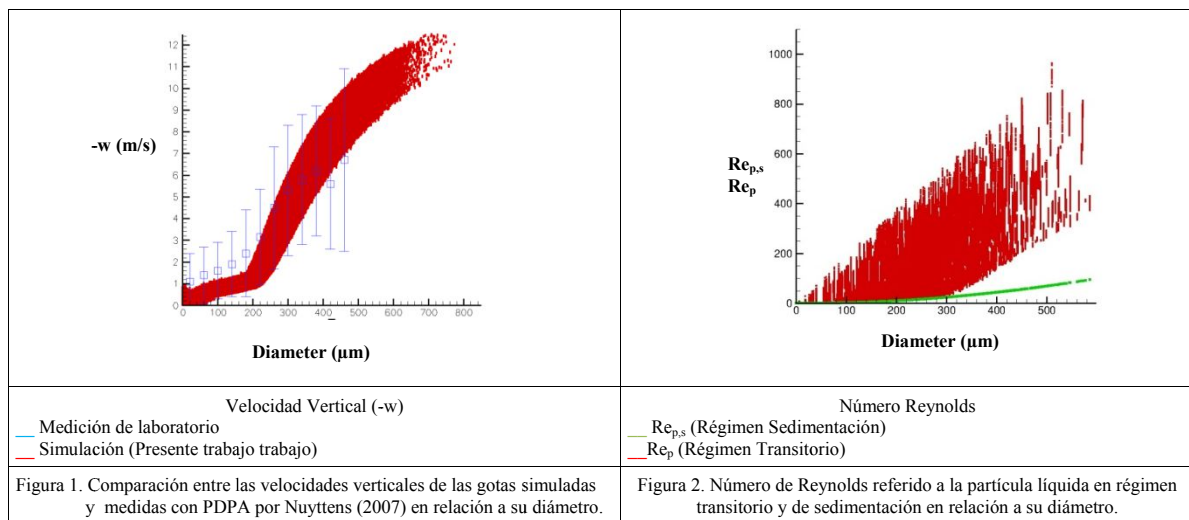
Tabla III: Velocidad media evaluada en intervalos de  $40 \mu\text{m}$  comparada con mediciones de laboratorio (Nuyttens, 2007).



Las simulaciones de velocidades de las partículas calculadas usando el  $C_D$  propuesto por Turton *et al.* (1986) muestran que las mismas no exceden los valores extremos de error de medición (Figura 1).

Por el contrario, el modelo propuesto por Mikhailov *et al.* (2012), fue el que mostró la menor variación de velocidad entre las partículas de un mismo diámetro, sobreestimando su velocidad a partir de aproximadamente 300  $\mu\text{m}$ .

En la Figura 2, se observan los valores de  $Re_p$  y  $Re_{p,s}$  con respecto al diámetro de las partículas simuladas con el  $C_D$  propuesto por Turton *et al.* (1986). Se puede apreciar que las partículas mayores a 300  $\mu\text{m}$  no alcanzan la velocidad de sedimentación, lo que significa que las mismas mantienen parte de la inercia provocada por la eyección y por ende son menos susceptible a la deriva antes de alcanzar el piso.



#### 4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se segmentó el proceso físico de eyección de las partículas líquidas en un Estado Transitorio (ET) y un Estado de Sedimentación (ES). Se simularon y contrastaron con datos de laboratorio seis expresiones para la determinación de coeficiente de arrastre aerodinámico permitiendo comprobar que el propuesto por Turton *et al.* (1986) posee mayor ajuste en la simulación de la componente vertical de la velocidad de las partículas. Asimismo, se observó que las partículas mayores a 300  $\mu\text{m}$  no alcanzan la velocidad de sedimentación durante toda su trayectoria.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo, se encuentra financiado a través del Proyecto PIO CONICET-UNER 2015-2016 “Desarrollo de metodologías y software específico para la asimilación de datos provenientes de sensores remotos y redes de medición orientados a la producción agropecuaria en la Provincia de Entre Ríos” y el Proyecto de Investigación FCyT – UADER “Desarrollo de un modelo de simulación para el estudio de la deriva de las pulverizaciones agrícolas, utilizando una boquilla de abanico plano, desde un equipo de arrastre”.

#### REFERENCIAS

Aguirre C. A. Dispersión et Mélange Atmosphérique Euléro-Lagrangien de Particules Fluides

- Réactives. Application à des cas simples et complexes. *Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon I, France*. **115-2005**, 323 pp. 2005.  
URL: <http://venus.ceride.gov.ar/twiki/pub/Cimec/RepositorioDeInformesTesis/aguirre-phd-thesis.pdf>
- Aguirre C. A., Brizuela A. B., Vinkovic I. and Simoëns S. A sub-grid Lagrangian stochastic model for turbulent passive and reactive scalar dispersion. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. Ed. Elsevier Science. **27 (4)**, pp: 627-635. 2006a.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.02.011>.
- Aguirre C. A., Brizuela A. B., Vinkovic I. y Simoëns S. Modelo acoplado Eulero-Lagrangiano de simulación de la dispersión atmosférica de especies químicamente reactivas en la capa límite. *Serie Mecánica Computacional Vol XXV*, pp: 185-205. 2006b.
- Aguirre C. A., Brizuela A. B., Berri G. J. y Orcellet E. E. Dispersión de gases emanados desde la fábrica Botnia utilizando un modelo de simulación de las grandes escalas acoplado a un modelo estocástico lagrangiano. *II Congreso Latinoamericano de Ingeniería del Viento (CLIV2)*. 5 al 7 de diciembre de 2012, La Plata, Argentina. 2012.  
doi: 10.13140/2.1.3596.1283.  
URL: <http://www.cliv2.ing.unlp.edu.ar/public/actas%20congreso/18.Aguirre.CLIV2.pdf>
- Aguirre C. A. Brizuela A. B. y Hildt L. E. Computational tools for the simulation of atmospheric pollution events. Ed. *Scientia Interfluvius*. **4 (1-2)**. Ed: Universidad Autónoma de Entre Ríos. ISSN on line: 1853-4430. ISSN printed: 1853-4422, pp: 7-29. 2013.  
URL: <http://www.youblisher.com/p/948280-Scientia-Interfluvius-Vol-4-1-2-2013>
- Aguirre C. A., Berri G. J., Brizuela A. B and Orcellet E. E. External Weather Data Assimilation to Simulate Wind and Temperature Fields in the Region of Gualaguaychú, Argentina. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. **4**. Ed: David Publishing Company. Print ISSN 2159-5275; Online ISSN 2159-5283, USA, pp: 887 – 899. 2014a.  
URL: <http://www.davidpublisher.org/Public/uploads/Contribute/5509138ac37fd.pdf>
- Aguirre C. A., Aceñolaza P. G., Brizuela A. B. y Sedano C. G. Simulación Computacional de la Dispersión de Partículas Sólidas en la Atmósfera utilizando un Modelo Acoplado. *Revista Científica de Mecánica Computacional*. **XXXIII (52)**. Ed: Asociación Argentina de Mecánica Computacional AMCA. ISSN 1666-6070, pp: 3431 – 3453. 2014b.  
URL: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4928/4857>
- Aguirre C. A. and Brizuela A. B. Computational Tools for the Simulation of Atmospheric Pollution Transport During a Severe Wind Event in Argentina. *Atmospheric Hazards*. **Chapter 6 - INTECH Open Science, Open Minds**. Ed. Jill Coleman. ISBN: 978-953-51-4680-3, pp: 111-136. 2016. URL: <http://www.intechopen.com/books/atmospheric-hazards-case-studies-in-modeling-communication-and-societal-impacts>
- Berri G. J. Estudio del comportamiento termo-hidrodinámico de la capa límite atmosférica sobre la región del Río de La Plata con un modelo de simulación numérica. *Tesis doctoral, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires*. 189 p. 1987.
- Brown P., Lawler D., Sphere drag and settling velocity revisited, *Journal of Environmental Engineering, ASCE Library*. 2003.  
doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2003\)129:3\(222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:3(222)).
- Cheng N. S., Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles, *Powder Technology* **189** (2009) 395-398, doi: 10.1016/j.powtec.2008.07.006, 2009.
- Clift R., Gauvin W., Motion of Entrained Particles in Gas Streams, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, doi: 10.1002/cjce.5450490403, 1971.
- Fackrell J. E. and Robins A. G. Concentration Fluctuation and Fluxes in Plumes from Point



- Sources in a Turbulent Boundary Layers. *Journal of Fluid Mechanics*. **117**, pp: 1-26, 1982.
- Fernandez-Turiel J. L., Aceñolaza P., Medina M. E., Llorenz J. F. and Sardi F. Assesment of a smelter impact area using surface soils and plants. *Environmental Geochemistry and Health*, **23**, pp: 65 – 78, 2001.
- Flemmer R., Blanks C., On the drag coefficient of a sphere, *Powder Technology* **48 (3)**, pp: 217–221, 1986. doi: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(86\)80044-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(86)80044-4).
- Gong W. A Wind Tunnel Study of Turbulent Dispersion over two – and three- dimensional Gentle Hills from Upwind Point Sources in Neutral Flow. *Boundary Layers Meteorology*, **54**, pp: 211-230. 1991.
- Holterman H. J. Kinectic and evaporation of waterdrops in air. *Wageningen: IMAG. Report 2003-12/Wageningen UR, InstituutvoorvMilieu – en Agritechniek*; ISBN 90-5406-234-7. 2003.
- Mikhailov M., Silva Freire A., The drag coefficient of a sphere: An approximation using Shanks transform, *Powder Technology* **237**, pp: 432-435, 2012.  
URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/e34e/b8701255bff610c6e13f8f7a57ecbe193cdb.pdf>.
- Nuyttens D. Drift from field crops prayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means. *Doctoral Thesis. Faculteit Bio-ingenieurs wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven*. ISBN 978-90-8826-039-1. 2007.
- Orcellet E. E., Berri G. J., Aguirre C. A. and Müller G. V. Atmospheric dispersion study of TRS compound semitted from a pulp mill plant in coastal regions of the Uruguay River, South America. *Aerosol and Air Quality Research*, **16**. Ed. Taiwan Association for Aerosol Research. ISSN: 1680-8584 print / 2071-1409 online. pp: 1473 – 1482, 2016.  
doi: 10.4209/aaqr.2015.02.0112. Taiwan.  
URL: <http://www.aaqr.org/article/detail/AAQR-15-02-OA-0112>
- Sedano C., Aguirre C., Brizuela A., Simulación de la Eyección de Spray Líquido desde un Pico de Pulverizadora para Aplicación de Herbicidas, Asociación Argentina de Mecánica Computacional AMCA - *Mecánica Computacional Vol XXIII*, pp: 1049-1068, 2017.  
URL: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/5325/5269>.
- Sidahmed M., Brown R. B. and Darvishvand M.. Drop-size/velocity correlations at formation of sprays from fan nozzles. *Transactions of the ASAE*, **42 (1)**, pp: 1557-1564. 1999.
- Tuck C. R., Butler Ellis M. C. and Miller P. C. H. Techniques for measurement of droplet size and velocity distributions in agricultural sprays. *Crop Prediction*. **16 (7)**, pp: 619-629. 1997.
- Turton R., Levenspiel O., A short note on the drag correlation for sphere, *Powder Technology* **47(1)**, pp: 83-86, 1986. doi: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(86\)80012-2](https://doi.org/10.1016/0032-5910(86)80012-2).
- Vinkovic I., Aguirre C. A., Simoëns S. and Gorokhovski M. Large-Eddy Simulation of Droplet Dispersion for Inhomogeneous turbulent Wall flow. *International Journal of Multiphase Flow*. **32**, pp: 344-364. 2006a.
- Vinkovic I., Aguirre C. A., Ayrault M. and Simoëns S. Large-Eddy Simulation of the Dispersion of Solid Particles in a Turbulent Boundary Layers. *Boundary-Layer Meteorology*. *Srpinger*, pp: 1-29. 2006b.
- Walpole R., Myers R. and Myers S. Probabilidad y Estadística para Ingenieros. *Prentice Hall. Hispanoamericana S. A.* Sexta Edición. México, 739 p, 2006.
- Xue M., Droegemeier K. K. and Wong V. The Advanced Regional Prediction System and Real-time Storm Weather Prediction. *International Workshop on Limited-area and Variable Resolution Models. Beijing, China. Word Meteorology Organization*. 1995.