

## SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISPERSIÓN DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EMANADAS DE UNA PLANTA INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE ENSENADA, ARGENTINA

### NUMERICAL SIMULATION OF THE DISPERSION OF SOLID PARTICLES FROM AN INDUSTRIAL PLANT IN THE CITY OF ENSENADA, ARGENTINA

César A. Aguirre<sup>a,b,c</sup>, Carlos G. Sedano<sup>a,c</sup>, Mariana Dezzutti<sup>b,d</sup>, Veronica Rafart<sup>d</sup>,  
Guillermo J. Berri<sup>b,d</sup> y Armando B. Brizuela<sup>a,b</sup>

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

<sup>d</sup>Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del  
Bosque s/n, B1900FWA, La Plata, Argentina

**Palabras clave:** Contaminación atmosférica, Emisiones industriales, Modelos de Simulación.

**Resumen.** Las dinámicas sociales han producido tanto una expansión de los ejidos urbanos hacia zonas industrializadas como así también la instauración de industrias en áreas urbanas. Esta problemática se acentúa en zonas donde existe una alta densidad poblacional como es el caso de la provincia de Buenos Aires. En este contexto se plantea la necesidad de estudiar la dispersión atmosférica de las partículas que son emitidas por las industrias a fin de determinar el posible alcance hacia zonas urbanizadas o recursos naturales. En este trabajo se presenta la simulación numérica mediante un modelo de dispersión de partículas sólidas emitidas desde una chimenea ubicada en la ciudad de Ensenada, provincia de Buenos Aires. Se puede observar que al término de 11 horas de simulación, las partículas recorren más de 200 kilómetros, alcanzando poblaciones y ciudades cercanas a la ciudad de La Plata.

**Keywords:** Atmospheric pollution, Industrial emissions, Simulation models.

**Abstract.** The social dynamics have produced both an expansion of urban areas towards industrialized areas and the establishment of industries in urban areas, with an increase in this process in areas where there is a high population density, such as the Buenos Aires province. This phenomenon led to the need to study the atmospheric dispersion of particles emitted by industries in order to determine the possible reach of urbanized areas or natural resources. In this work, the numerical simulation of solid particles dispersion emitted from a chimney located in the Ensenada city, Buenos Aires province is presented. It can be observed that after 11 hours of simulation, the particles travel more than 200 kilometers, reaching towns and cities near the city of La Plata.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las dinámicas sociales han producido tanto una expansión de los ejidos urbanos hacia zonas industrializadas como así también la instauración de industrias en áreas urbanas, observándose un incremento del citado proceso en zonas donde existe una alta densidad poblacional como es el caso de la Provincia de Buenos Aires. Este fenómeno suscitó la necesidad de estudiar la dispersión atmosférica de las partículas que son emitidas por las industrias a fin de determinar el posible alcance a zonas urbanizadas o recursos naturales.

Uno de los posibles abordajes a esta problemática es la utilización de técnicas de simulación numérica a fin de determinar el alcance de la dispersión de partículas sólidas originadas en industrias metalúrgicas de la Ciudad de Ensenada, Buenos Aires, Argentina. 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. 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) ha sido adaptado por Aguirre (2005) para la simulación de partículas fluidas acoplando un modelo estocástico lagrangiano a una partícula (STO). El modelo LES-STO ha sido contrastado tanto para situaciones de dispersión con variables controladas en túnel de viento como para situaciones de dispersión a escala real con buenos resultados. Fue validado con mediciones de concentración de un gas pasivo realizadas en túnel de viento por Fackrell and Robins (1982) en suelo plano rugoso. También se utilizaron las mediciones experimentales en túnel de viento realizadas con presencia de una colina de suave pendiente realizadas por Gong (1991). Posteriormente fue utilizado por Aguirre *et al.* (2006a, b) para obtener una descripción de los fenómenos de dispersión atmosférica, difusión y reacciones químicas de especies en fases gaseosa; Aguirre *et al.* (2012) para la simulación de la pluma de dispersión de gases desde una planta de fabricación de celulosa ubicada en la República Oriental del Uruguay en un día con viento prevalente de la dirección este, Aguirre *et al.* (2013) para una situación de dispersión de olores desde un basural a cielo abierto en la localidad de Paraná, Argentina. 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 *et al.* (2010) 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. Orcellet *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 en la margen del río Uruguay 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). En relación al transporte y dispersión atmosférica de partículas sólidas, Aguirre *et al.* (2014b) presentan el modelo LES-STO para la dispersión de partículas 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 (Vinkovic *et al.*, 2006b). Este trabajo presenta la simulación de un caso hipotético de dispersión de partículas sólidas emitidas desde una chimenea ubicada en la ciudad de Ensenada, provincia de Buenos Aires, el día 18 de noviembre de 2014. Se asume un caudal másico de eyección de  $350 \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$  a una temperatura de  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ . Las condiciones iniciales de la atmósfera son obtenidas a partir de datos de un sondeo aerológico del aeropuerto de Ezeiza. Las condiciones de borde fueron

aplicadas a intervalos regulares de una hora desde las 9:00 hs hasta las 20:00 hs mediante el acople con el Modelo de Capa Limite Atmosférica de Meso-escala (MCLM).

## 2 MÉTODOS DE SIMULACIÓN

### 2.1 Simulación Euleriana de la circulación atmosférica

Para obtener una descripción de la circulación atmosférica a través del viento ( $U_i$ ) y otras variables meteorológicas como presión atmosférica ( $p$ ), temperatura potencial ( $\theta$ ), humedad del aire en sus tres estados, vapor, líquido y sólido ( $q_v, q_l, q_h$ ); adoptamos el modelo de meso-escala de tipo no-hidroestático quasi-compresible ARPS 5.2.12 (Advanced Regional Prediction System) desarrollado por el CAPS (Center of Analysis and Prediction Storm) de la Universidad de Oklahoma (USA) <http://www.caps.ou.edu/ARPS> (Xue *et al.*, 2000). El código está especializado en la simulación de los flujos turbulentos a elevado número de Reynolds utiliza la técnica de simulación de los grandes torbellinos 'Large-eddy Simulation' (LES) que resuelve las ecuaciones de la mecánica de fluidos en cada nodo de una grilla espacial regular en el sentido horizontal e irregular en sentido vertical. La coordenada vertical sigue las ondulaciones del terreno gracias a una transformación conforme en coordenadas curvilíneas y a su vez, va disminuyendo el espesor de las celdas en la medida que se acerca al suelo con el fin de aumentar la precisión de la simulación en la zona de mayor turbulencia y esfuerzos de cizallamiento. La correlación de los términos de las escalas no resueltas por LES son modelados utilizando la formulación de Smagorinsky dinámico con ayuda de un filtro 'test' para evaluar en cada instante de la simulación y en cada lugar de la grilla de cálculo la transferencia de energía desde los grandes torbellinos hacia los pequeños siguiendo la técnica de Germano *et al.* (1991). Un acople entre el código ARPS y un modelo estocástico lagrangiano para simular las trayectorias de partículas fluidas (LES-STO) fue introducido por Aguirre *et al.* (2005) usando la Función de Densidad Filtrada del campo de Velocidad (VFDF) propuesta por Gicquel and Givi (2002). En el caso de la simulación de partículas sólidas se utiliza el mismo código acoplado pero, en este caso, se deben simular las partículas fluidas que están en la misma posición que las sólidas para considerar las ecuaciones de movimiento y fuerzas de arrastre entre el fluido y éstas últimas.

### 2.2 Modelo Estocástico Lagrangiano para la simulación de partículas sólidas

Para la dispersión de las partículas emitidas desde la chimenea de la industria metalúrgica se utilizó un modelo acoplado LES-STO (Large-eddy Simulation - Estocástico Lagrangiano a una partícula), donde la velocidad de una partícula fluida  $U_i$  (aire por ej.) que arrastra a una partícula sólida, es calculada mediante una ecuación de Langevin:

$$\frac{dU_i}{dt} = h_{ij}(U_j, t) + q_{ij}(U_j, t)\eta_j(t), \quad (1)$$

$h_{ij}$  es el coeficiente determinístico dinámico y  $q_{ij}$  es el coeficiente aleatorio dinámico (en analogía con el movimiento browniano) y está ligado a las propiedades estadísticas de la turbulencia.  $\eta_j$  indica una variable aleatoria cuyo valor medio es nulo y la covarianza espacio-temporal entre los instantes  $t'$  y  $t''$  vale:

$$\langle \eta_i(t')\eta_j(t'') \rangle = \delta_{ij}\delta(t'-t''). \quad (2)$$

Esta propiedad sugiere que  $\eta_j$  no está correlacionada espacialmente ni temporalmente.

La ecuación de movimiento (o aceleración) de una partícula sólida sumergida en el flujo de fluido puede escribirse como sigue:

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{F_i}{m}, \quad (3)$$

donde  $V_i$  es la velocidad de la partícula sólida,  $F_i$  denota la fuerza y  $m$  su masa.

Aguirre *et al.* (2016), describe que cuando las partículas sólidas que se simulan se encuentran en el orden de las decenas de micrón y su densidad es muy grande respecto al fluido que las transporta, se pueden plantear los siguientes supuestos:

- a) Las fuerzas debidas a la gravedad y la viscosidad son dominantes con respecto a las otras fuerzas sobre ellas.
- b) La forma de las partículas es aproximadamente esférica.

Además, si se considera que la concentración de las partículas no es lo suficientemente grande como para influir en las propiedades cinemáticas del fenómeno de transporte  $F_i$  depende sólo de la viscosidad y la gravedad. La suposición (a) ha sido probada cuando la densidad de las partículas sólidas es más de 1000 veces la densidad del aire que las transporta ( $\rho_s > 1000\rho$ ). Entonces (3) puede ser expresado como:

$$\frac{F_i}{m} = \underbrace{\frac{U_i - V_i}{\tau}}_{\text{Aceleración por Viscosidad}} - \underbrace{g_i \delta_{i3}}_{\text{Aceleración por Gravedad}}. \quad (4)$$

En (4)  $V_i$  representa la velocidad de la partícula sólida,  $U_i$  representa la velocidad del aire en la posición de la misma. El primer término del segundo miembro de (4) denota la aceleración debida a la fuerza de arrastre de la partícula sólida mientras que el segundo término es la aceleración debida a la fuerza de gravedad actuando en la dirección vertical.  $\tau$  denota una escala de tiempo de aceleración de la partícula. Esta escala depende de la diferencia de velocidades entre el aire y la partícula sólida, del diámetro de la partícula sólida  $d_s$ , de la relación de densidades  $\rho_s/\rho$  y del coeficiente de arrastre dinámico  $C_D$ :

$$\tau = \frac{4}{3} \frac{d_s \rho_s}{C_D \rho} \frac{1}{|U_i - V_i|}. \quad (5)$$

El supuesto (b) sugiere que el coeficiente de arrastre  $C_D$  es proporcional al diámetro de la partícula sólida  $d_s$  y la viscosidad del fluido ya que las partículas mantienen su forma esférica. Esta condición se evalúa generalmente calculando el número de Reynolds de la partícula sólida  $\Re e_p$ , el cual es obtenido en cada paso de tiempo y para cada partícula:

$$\Re e_p = d_s \frac{|U_i - V_i|}{\nu}, \quad (6)$$

donde  $\nu$  denota la viscosidad dinámica del aire. El modelo de cálculo del coeficiente de

arrastre utilizado es el propuesto por [Turton et al. \(1986\)](#):

$$C_D = \frac{24}{\Re e_p} (1 + 0,173 \Re e_p^{0,657}) + \frac{0,413}{1 + 16300 \Re e_p^{-1,09}}, \quad \Re e_p < 2 \times 10^5. \quad (7)$$

Considerando que la fuerza de arrastre de una partícula sólida en régimen turbulento como la suma de las fuerzas aerodinámicas que se oponen al movimiento de dicha partícula:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_l |U_i - V_i|^2. \quad (8)$$

siendo  $A_l$  el área proyectada de la partícula en dirección normal al flujo de aire.

A medida que la partícula sólida se desplaza en un flujo de aire, la diferencia de velocidades entre la partícula y el aire comienza a disminuir debido a la pérdida de energía cinética por rozamiento. Luego de un lapso de tiempo, la partícula alcanza el régimen de sedimentación que representa el estado en el cual la velocidad relativa entre la partícula sólida y el aire se estabiliza en un valor  $|U_i - V_i| \delta_{i3} = V_s$ . Con las expresiones (4-8) es posible obtener:

$$V_s = \left( \frac{4 \rho_s d_s g_i \delta_{i3}}{3 \rho C_{D,s}} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Note que  $C_{D,s}$  es el coeficiente de arrastre para el régimen de sedimentación. Este coeficiente depende de  $\Re e_p$  y de la velocidad de sedimentación  $V_s$  según (6). Por lo tanto  $V_s$  debe ser calculado en forma iterativa.

El tiempo transcurrido hasta que la partícula sólida alcance su velocidad de sedimentación  $\tau_s$  puede ser calculado siguiendo (4), cuando ambas fuerzas se equilibran, junto con (9):

$$\tau_s = \frac{V_s}{g_i \delta_{i3}}. \quad (10)$$

Este es un importante parámetro que caracteriza el tiempo transcurrido hasta que la partícula sólida logre el equilibrio de fuerzas (gravedad y arrastre aerodinámico). Para pequeñas partículas, este tiempo es muy corto, por lo tanto, éstas son las que quedan expuestas a la dirección e intensidad de viento viajando grandes distancias.

Las ecuaciones de gobierno de las trayectorias de partículas sólidas en su forma discreta son las siguientes:

$$\begin{cases} V_{i(n+1)} = V_{i(n)} + \frac{\Delta t}{\tau} (U_{i(n)} - V_{i(n)}) - g_i \Delta t \delta_{i3}, & \text{si } \tau > \Delta t, \\ V_{i(n+1)} = U_{i(n)} - V_s \delta_{i3}, & \text{si } \tau \leq \Delta t, \end{cases} \quad (11)$$

$$X_{i(n+1)} = \frac{V_{i(n+1)} - V_{i(n)}}{2} \Delta t.$$

Las dos primeras son utilizadas para el cálculo de la velocidad en el próximo paso de tiempo. Se utiliza una u otra dependiendo de las características antes mencionadas de forma

tal que si el paso de tiempo de la simulación es menor que el tiempo característico propio de la partícula sólida ( $\Delta t < \tau$ ) se utiliza la primer ecuación, caso contrario se utilizará la segunda de ellas atendiendo a que antes del transcurrido  $\Delta t$  la partícula sólida entró en régimen de sedimentación. La tercera ecuación es utilizada para calcular las posiciones de las partículas sólidas en su forma discreta.

Para la simulación de eyección de partículas sólidas se consideraron las características físicas de las mismas como el diámetro medio y su desvío estándar, la temperatura de emisión de los gases que las transportan y su densidad. Para simular la eyección se utilizó un algoritmo que ajusta una distribución de densidad de probabilidad de tipo gaussiano para asignar los diámetros de las partículas y un algoritmo de aleatorización de posiciones y diámetros a la salida de la chimenea (Sedano *et al.*, 2017). Además, en la eyección, se tuvo en cuenta la velocidad vertical con la que son impulsadas por efecto de la temperatura de los gases en el interior de la chimenea y efecto de succión debido al tiraje según se muestra en Aguirre *et al.* (2014b) y Aguirre and Brizuela (2016).

### 2.3 Condiciones de borde externas forzadas

En el caso la simulación de las condiciones meteorológicas para un período de tiempo relativamente largo (11 horas), es necesario considerar los cambios en la circulación atmosférica (velocidad y dirección del viento) ocasionados por las diferencias en las propiedades térmicas del agua y del suelo ante la radiación solar. La variación en la altura del sol sobre el horizonte con el correr de las horas del día provoca fenómenos locales de brisas de mar y tierra en zonas costeras. Es necesario tener en cuenta estos eventos como condiciones de borde forzadas al dominio de la simulación. Para ello se utiliza un acople con el Modelo de Capa Límite de Meso-escala (MCLM). La técnica de acoplamiento ARPS-MCLM fue implementada en ARPS por Aguirre *et al.* (2014a). Estas condiciones son impuestas en los bordes del área de estudio utilizando una función de relajación para evitar discontinuidades e inestabilidades en la resolución numérica al interior del dominio:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -K_b (\varphi - \varphi_e). \quad (12)$$

Estos términos son adicionados a las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento y energía que resuelve ARPS. En la ecuación (12),  $\varphi$  representa el valor que toma una variable al interior del dominio de cálculo ( $U_i, p, \theta, q_v, q_l, q_h$ ) mientras que  $\varphi_e$  es el valor externo que es impuesto desde el modelo MCLM. Como esta ecuación se resuelve para todos los pasos de tiempo de la simulación y  $\varphi_e$  es el valor para la hora siguiente, se realiza una interpolación lineal temporal para su resolución. En (12), el coeficiente de relajación  $K_b$  está definido como,

$$K_b = \begin{cases} \frac{K_{b0}}{1 + \left[ \frac{2(i - i_b)}{(n_b - 1)} \right]^2}, & \text{para } |i - i_b| \leq n_b - 1, \\ 0.0 & \text{para } |i - i_b| > n_b - 1, \end{cases} \quad (13)$$

donde  $K_{b0}$  es el valor máximo del coeficiente de relajación adoptado en el borde y  $n_b$  es el ancho de la zona de relajación en unidades de celdas de la grilla de simulación ( $i$  indica la

posición de la celda en la grilla e  $i_b$  en la zona de relajación). Esta relajación provoca que los valores de las variables cercanos a los bordes del dominio de cálculo tiendan a los valores impuestos en los bordes del mismo con el transcurso del tiempo de simulación.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio se centra en el Río de La Plata y las coordenadas de sus límites son las siguientes:  $33,20^{\circ}\text{S} - 36,10^{\circ}\text{S}$  límites Norte – Sur y  $56,10^{\circ}\text{W} - 60,05^{\circ}\text{W}$  límites Este – Oeste. En esta zona se encuentran las principales ciudades de La Plata, Ciudad Autónoma de Buenos Aires y Montevideo. La [Figura 1](#) muestra una imagen de dicha zona. La fuente de emisión de partículas sólidas se ubica al norte de la ciudad de La Plata, donde se encuentra la zona industrial. La altura de la chimenea se estima en 45 m y su diámetro de 4 m. Se estima que las partículas son eyectadas a una velocidad de  $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y a una temperatura de  $950^{\circ}\text{C}$  con un caudal másico de  $350 \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ . La emisión es simulada comenzando a las 9:00 hora local utilizando un sondeo de Ezeiza para definir las condiciones iniciales de las variables. El diámetro medio de las partículas sólidas se estima en  $10 \mu\text{m}$ , con un desvío estándar de  $1 \mu\text{m}$  y densidad de  $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .



Figura 1. Zona de estudio

#### 3.2 Resultados de la simulación

La [Figura 2](#) muestra una secuencia de instantes de tiempo. A la izquierda se observan las vistas superiores y a la derecha las vistas laterales desde el Sur a la latitud de la fuente de emisión estimada en  $34,85^{\circ}\text{S}$ . En las vistas superiores se aprecia el Río de La Plata en color azul mientras que en el suelo firme, los colores indican el valor que toma el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI). En estas vistas se aprecia la extensión horizontal de la pluma de partículas sólidas en puntos de color negro. En las vistas laterales se aprecia en una gama de colores el valor de la temperatura potencial  $\theta$ . Es de hacer notar que la escala vertical está aumentada 46 veces respecto de la horizontal. Las flechas negras indican la dirección de los vectores de velocidad del aire. Se puede apreciar que a medida que transcurre el tiempo, la pluma de dispersión de partículas se desplaza hacia el Noroeste. A partir de las 16:00 hs aproximadamente comienza a producirse una elevación de la pluma por corrientes ascendentes de aire que se originan debido al calentamiento de la tierra por la radiación solar. Estas circulaciones se intensifican con el correr de las horas del día llegando a ser intensas a las 20:00 hs. Las partículas sólidas se dispersan alcanzando 180 kilómetros en dirección Este-Oeste y más de 200 kilómetros en dirección Norte-Sur, mientras que son elevadas hasta alcanzar unos 2500 m de altura aproximadamente.

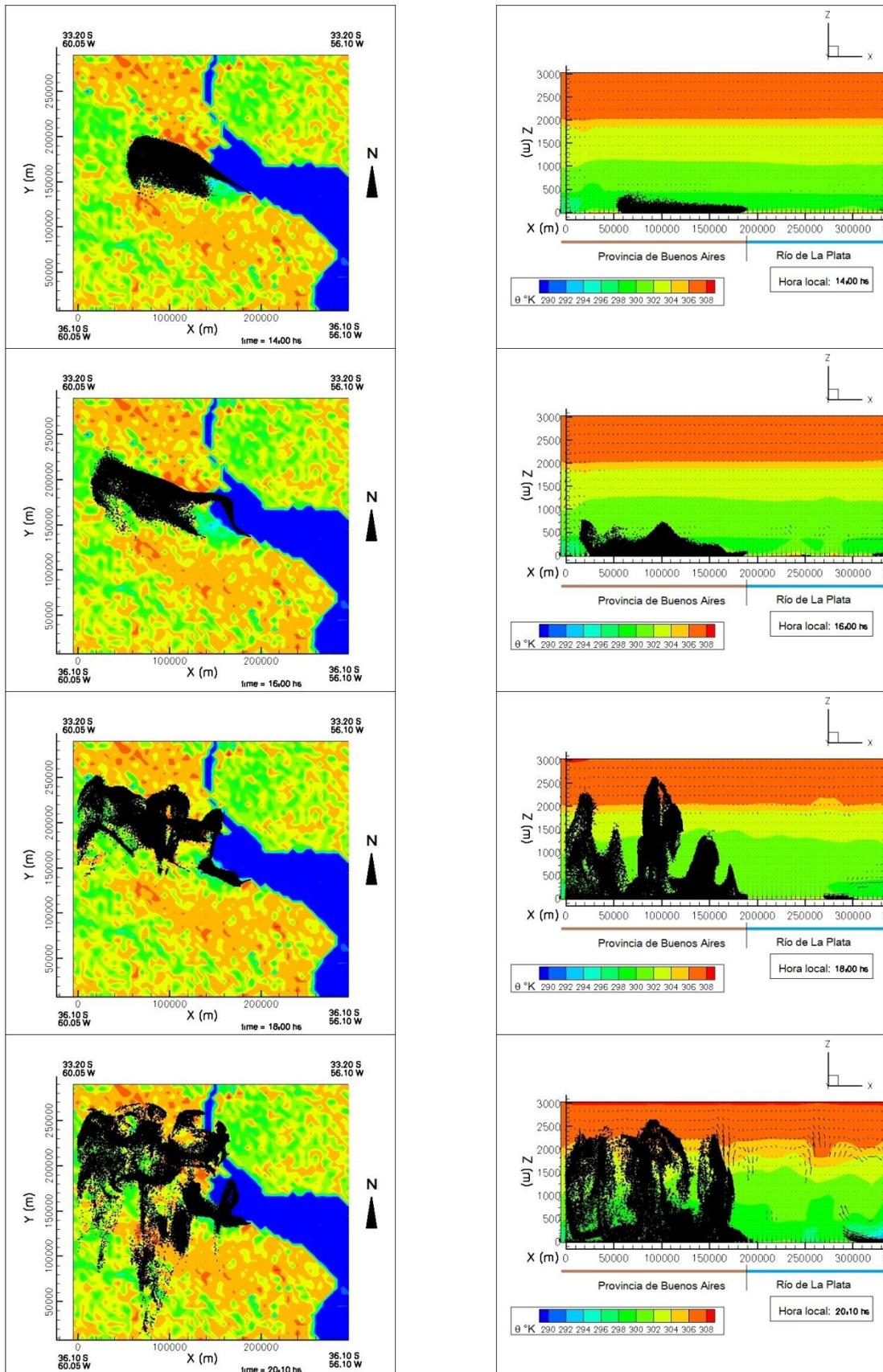


Figura 2. Vistas superiores y laterales de la pluma de partículas sólidas con el transcurrir de las horas del día.

## 4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha simulado la dispersión de partículas sólidas que son emitidas por una chimenea para un día del mes de enero. Se evidencia el efecto de las celdas verticales que se originan con el transcurso del día debido al efecto de la radiación solar y el calentamiento diferencial del agua respecto al suelo firme. Las celdas de circulación vertical provocan la elevación de la pluma de partículas sólidas llegando a 2500 m de altura aproximadamente. La extensión horizontal de la pluma de partículas llega a superar los 200 km. Según lo observado en la presente simulación y considerando el posible alcance de la emisión de partículas sólidas, resulta importante el desarrollo de trabajos de campo que permitan validar los presentes resultados de la simulación posibilitando la implementación de políticas para su mitigación como así también el desarrollo de tecnologías específicas para mitigar estos efectos.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se encuentra financiado por los Proyectos: PIO CONICET-UNER 2015-2016, PICT2012-1667 “Desarrollo de un sistema de modelado numérico atmosférico sobre el Río de La Plata y sur del Litoral, empleando modelos de capa límite en mesoescala acoplados a modelos de pronóstico regional y su aplicación al estudio de problemas ambientales” y de la 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 1, France*. **115-2005**, 323 pp. 2005.
- 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.
- 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.  
<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.  
<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 Gualeguaychú, 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.  
<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. <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 Argentine. *Atmospheric Hazards*. **Chapter 6 - INTECH Open Science, Open Minds**. Ed. Jill Coleman. ISBN: 978-953-51-4680-3, pp: 111–136. 2016. <http://www.intechopen.com/books/atmospheric-hazards-case-studies-in-modeling-communication-and-societal-impacts>
- Berri G. J. Sraibman L, Tanco RA and Bertossa G. Low-level wind field climatology over the La Plata River region obtained with a mesoscale atmospheric boundary layer model forced with local weather observations. *Journal of Applied Meteorology* 49: 1293-1305. 2010.
- 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.
- Germano M., Piomelli U., Moin P. and Cabot W. H. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physic of Fluids*. A (3), pp:1760–1765. 1991.
- Gicquel L. and P. Givi. Velocity filtered Density Function for Large-Eddy Simulation of Turbulent flow. *Journal of Physics Fluids*. **14 (3)**, pp: 1196–1213. 2002.
- 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.
- Orcellet E. E., Berri G. J., Aguirre C. A. and Müller G. V. Atmospheric dispersion study of TRS compound emitted 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. Taiwan, pp: 1473–1482. 2016. doi: 10.4209/aaqr.2015.02.0112. <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. <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/5325/5269>
- Turton R., Levenspiel O., A short note on the drag correlation for sphere, *Powder Technology* **47**, 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.
- 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. *World Meteorology Organization*. 1995.
- Xue M, Droegemeier K, Wong V. The Advanced Regional Prediction System (ARPS). A Multi-Scale Nonhydrostatic Atmospheric Simulation and Prediction Model. Part I: Model Dynamics and Verification. *Meteorology Atmospheric and Physics*. **75**, pp: 161–193. 2000.