

Revista Científica Agropecuaria 17(1-2): 17-25(2013)

© 2013 Facultad de Ciencias Agropecuarias - UNER

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE BORDE PARA MODELOS DE SIMULACIÓN DEL CAMPO DE VIENTO Y DISPERSIÓN AÉREA DE SUBSTANCIAS QUÍMICAS

César A. AGUIRRE^{1,2,*4}, Guillermo J. BERRI^{3,*}, Armando B. BRIZUELA^{1,2,*}, Alejandra KEMERER¹, Betiana TOFFOLI¹ y Emiliana E. ORCELLET³

¹ Cátedra de Climatología Agrícola – Facultad de Ciencias Agropecuarias – UNER. Ruta 11, Km 10,5 – (3101) Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

² Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción (CICyTTP) – CONICET. Materi y España s/n – (3105) Diamante, Entre Ríos, Argentina.

³ Servicio Meteorológico Nacional, 25 de Mayo 658 – (1002). Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

* Miembro del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas – CONICET, Argentina.

⁴ Autor para correspondencia (cesaraguirredalotto@gmail.com)

RESUMEN

Las emisiones antrópicas de compuestos químicos en la atmósfera son la principal causante de enfermedades respiratorias en la población que habita en lugares cercanos a fábricas o parques industriales, zonas densamente urbanizadas y basurales a cielo abierto. Las condiciones meteorológicas pueden favorecer o impedir la dispersión de estos compuestos en el aire por lo que es necesario fijar umbrales de emisión en función de estas condiciones. Los modelos de simulación del campo de viento y dispersión de gases en la atmósfera son una excelente herramienta para obtener los valores de concentración de especies químicas para diferentes condiciones meteorológicas. De todas formas, si se desean realizar simulaciones en períodos largos de tiempo, es necesario tener en cuenta los cambios de las condiciones meteorológicas externas al área de estudio. Este trabajo muestra los errores que pueden cometerse si no se consideran los cambios en las condiciones de borde externas comparando los resultados de la simulación numérica del campo de viento y temperatura con datos medidos por tres estaciones meteorológicas en dos niveles de altura. Se muestran también los resultados de los niveles de concentración de gases a nivel de respiración provenientes de una chimenea que fueron simulados por el modelo.

Palabras clave: *dispersión atmosférica - asimilación de datos externos - simulación, validación.*

SUMMARY

Influence of boundary conditions for simulation models of wind field and chemicals dispersion species

Anthropogenic emissions of chemical compounds in the atmosphere are the main cause of respiratory disease in the population living in places near factories or industrial parks, densely urbanized areas and open dumps. Weather

*Original recibido (31/05/13)

Original aceptado (20/11/13)

conditions can facilitate or prevent the spread of these compounds in the air so it is necessary to set emission thresholds depending on these conditions. Simulation models of the wind field and dispersion of gases in the atmosphere are an excellent tool for concentration values of chemical species for different weather conditions. However, for simulations over long periods of time, it is necessary to consider the changes of the weather outside the study area. This work shows the errors of the wind and temperature simulation if not considered changes in external boundary conditions. We compare the results of the numerical simulation of the wind field and temperature data measured by three meteorological stations in two heights. It also shows the simulation results of the gas concentration values to match human breath were emitted from a smokestack.

Key words: *atmospheric dispersion - external data assimilation – simulation - validation*

Introducción

Las emisiones de compuestos químicos en la atmósfera vienen causando numerosos problemas ecológicos y sanitarios. Hay evidencias de estos problemas no sólo en las grandes ciudades (Tong *et al.*, 2005), sino que también son afectadas las poblaciones vecinas a zonas industriales, ciudades con un parque vehicular deficiente u obsoleto y áreas cercanas a basurales a cielo abierto (Aguirre *et al.*, 2006, 2013). En latitudes medias y bajas, en días soleados y de poco viento, las grandes ciudades se encuentran envueltas de una capa de smog producto de las reacciones químicas entre los gases que emiten las industrias, automotores y la radiación solar (Magee *et al.*, 1999; Morris *et al.*, 2001; Sulochana and Moka Shekhu, 2010). En situaciones meteorológicas particulares de altas temperaturas y vientos suaves o calma, estos compuestos no son suficientemente dispersados y presentan concentraciones que exceden las normas de calidad del aire. Otras situaciones relacionadas con la dispersión atmosférica de gases emanados desde chimeneas afectan la calidad del aire en situaciones meteorológicas particulares de subsidencia y estabilidad atmosférica (Seinfeld, 1986). Una técnica que permita abordar el estudio de las diversas situaciones en los eventos de

contaminación es la utilización de herramientas de simulación numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos junto con herramientas informáticas de alto desempeño. Esta técnica se conoce como simulación en mecánica de fluidos computacional o más conocido por su sigla en inglés CFD (Computational Fluid Dynamics). Mediante ella se pueden simular los mecanismos de transporte turbulento de gases y partículas sólidas microscópicas acoplados a modelos de difusión y reacción química (Aguirre, 2005; Silvester *et al.*, 2009). De esta manera se podrían evaluar geográficamente los niveles de concentración de especies y considerar diferentes alternativas para la ubicación de parques industriales y basurales a cielo abierto (o erradicar definitivamente los mismos), revisar y proponer normas de control de emisiones gaseosas provenientes de la industria o contaminación vehicular simulando diferentes condiciones meteorológicas (Aguirre *et al.*, 2013). En tal sentido existen avances importantes en la utilización de estas herramientas con trabajos orientados a la simulación de flujos confinados en túnel de viento (Deardorff, 1970; Moin and Kim, 1982; Aguirre *et al.*, 2002) y en la atmósfera libre (Klemp and Wilhelmson, 1978; Xue *et al.*, 2000; Aguirre *et al.*, 2003). Uno de

los numerosos códigos de simulación de fenómenos meteorológicos es el ARPS (Advanced Regional Prediction System) desarrollado por CAPS (Center of Analysis and Prediction of Storm) de la Universidad de Oklahoma – USA. Este modelo es muy completo ya que simula no sólo el campo de viento sino que posee submodelos de balance de calor y agua en la interfaz suelo-atmósfera, simula la formación de nubes, precipitación y demás fenómenos meteorológicos. Aguirre *et al.* (2003) adicionó a este modelo los algoritmos que simulan el transporte y dispersión de especies químicamente reactivas acoplado un modelo estocástico lagrangiano. En trabajos posteriores, se realizaron varias validaciones del código con resultados de mediciones experimentales en túnel de viento (Aguirre, 2005; Aguirre *et al.*, 2008). Sin embargo, es conveniente además realizar validaciones a escala real. En tal sentido, Aguirre *et al.* (2012) presentaron los resultados del campo de viento y temperatura simulados para un día de verano en cercanías de la ciudad de Gualeguaychú y los compararon con los datos medidos por tres estaciones meteorológicas. Del mismo se desprende que si bien el campo de temperatura es bien simulado por el modelo, el viento debe ser corregido teniendo en cuenta los cambios en la circulación con el transcurrir del día. En este trabajo se presentan los resultados de la simulación del campo de viento y temperatura en capas bajas para un día de verano en la región cercana a la fábrica de celulosa de papel Botnia. Se comparan los resultados de la dirección y velocidad del viento y de temperatura con datos medidos por las tres estaciones meteorológicas mencionadas en dos niveles de altura (10 metros y 40 metros). Se analizan dos simulaciones: La primera es la mencionada en Aguirre *et al.* (2012) donde sólo se tuvieron en cuenta las condiciones iniciales de la superficie del terreno (temperatura del suelo y del agua,

relieve y vegetación) y datos de un sondeo aerológico para inicializar las variables meteorológicas en la atmósfera. En la segunda simulación se tienen en cuenta las condiciones iniciales como en la primera, pero además, se adicionan datos del campo de viento en los bordes del área de estudio para considerar los cambios en la circulación con el transcurrir del día. Estos últimos datos son brindados por el Modelo de Capa Límite de Meso-escala meteorológico operativo MCLM (Berri, 1987; Berri *et al.*, 2010) del Servicio Meteorológico Nacional.

Materiales y métodos

1. La simulación de las grandes escalas de la turbulencia (SGE).

El modelo ARPS resuelve las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento, energía y utiliza la ecuación de estado del aire húmedo para resolver la ecuación de la presión (Xue *et al.*, 2000). Este modelo ha sido diseñado específicamente para el seguimiento y descripción de tormentas, posee submodelos de flujo de calor y vapor de agua, formación de nubes y precipitación. Para ello, tiene en cuenta la orografía y cobertura del terreno como así también las condiciones iniciales tanto del suelo como del estado de la atmósfera. Este modelo es de tipo semicomprimible ya que tiene en cuenta que la densidad del aire varía sólo con la altura en las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento y transporte de escalares pero admite la compresibilidad en la resolución de la ecuación de la presión utilizando un paso de tiempo más reducido que para las ecuaciones anteriores. Es decir, este código trabaja con dos pasos de tiempo, uno más grande para las ecuaciones de balance y otro reducido para la presión. Las ecuaciones de balance de masa, de cantidad de movimiento y de energía son resueltas utilizando el esquema de diferencias finitas centradas sobre una celda de tipo *Arakawa C-grid* y utiliza un sistema de coordenadas curvilíneo que sigue las ondulaciones de terreno. El esquema numérico utilizado para obtener la solución de las ecuaciones diferenciales integradas en el paso de tiempo grande es de 4° orden centrado de tipo explícito mientras que el

utilizado para integrar las ecuaciones de presión y componente vertical de la velocidad del aire es implícito de tipo *Crank-Nicholson*. Aguirre (2005) realizó algunas modificaciones al mismo introduciendo la opción de cálculo para el coeficiente de Smagorinsky (Smagorinsky, 1963) siguiendo la técnica de Germano et al. (1991) para el término no lineal en la ecuación de balance de cantidad de movimiento y de transporte de magnitudes escalares.

2. El Modelo Estocástico Lagrangiano (MEL) acoplado a la SGE.

En la atmósfera el aire circula en régimen turbulento de modo que para simular el campo de viento alcanza con la SGE siempre que la escala de corte se encuentre dentro del rango inercial de la cascada de energía de *Kolmogorov*. Sin embargo, las escalas simuladas son demasiado grandes para modelar adecuadamente los fenómenos de transporte, mezcla, dispersión o difusión de especies químicamente reactivas. Para lograr este objetivo debe realizarse la simulación de las pequeñas escalas no resueltas por SGE. Es decir, se simula el movimiento de las mismas al interior de un elemento de la malla de cálculo SGE. Para esto puede ser utilizada la ecuación de *Langevin* haciendo una analogía con el movimiento *Browniano*. Esta ecuación consta de dos términos, un término determinista y un término aleatorio, ligados ambos a las propiedades estadísticas de la turbulencia. Este modelo de dos términos posee dos constantes que deben ser calculadas en función de la energía cinética turbulenta del flujo. Las consideraciones teóricas referidas a la obtención de estas constantes pueden encontrarse en Aguirre y Brizuela (2008).

3. Asimilación de las condiciones de borde a partir del modelo de pronóstico regional MCLM.

Las condiciones de borde del área de estudio están referidas a los valores que toman las variables simuladas por el modelo fuera de la citada área. Estas pueden ser de tipo *Neumann* (o flujo cero) que impone que las mismas no se modifican cuando el flujo atraviesa el borde del área de estudio. Este tipo de condición puede ser válida para períodos cortos de tiempo (del orden de 1 hora) con viento persistente desde una dirección y velocidad moderada. Sin embargo, si se desea simular períodos de tiempo más largos

(días) la dirección y velocidad del viento fuera del área de estudio pueden variar por lo que se hace necesario asimilar condiciones de borde externas para tener en cuenta estas variaciones dentro del dominio de la simulación. En este trabajo se muestra la forma en que se realiza la asimilación de la velocidad y dirección del viento a partir del modelo de pronóstico operativo que utiliza el Servicio Meteorológico Nacional denominado Modelo de Capa Límite de Meso-escala (MCLM). Este modelo es a su vez condicionado a una escala regional a partir del modelo ETA-CPTEC (Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos de Brasil).

Para este fin se utilizan las salidas de los valores de velocidad y dirección del viento del modelo MCLM que están organizados en una grilla espacial de resolución de 1 kilómetro para cada hora (cada 3600 segundos) durante un día. Estas condiciones son impuestas en los bordes del área de estudio utilizando una función de relajación para evitar discontinuidades espaciales fuertes e inestabilidades en la resolución numérica de las ecuaciones.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -K_b (\phi - \phi_e) \quad [1]$$

Estos términos son adicionados a las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento y energía que resuelve ARPS. En la ecuación [1], ϕ representa el valor que toma una variable al interior del dominio de cálculo mientras que ϕ_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 (cada 10 segundos) y ϕ_e sólo está disponible cada 3600 segundos se realiza una interpolación lineal temporal para su resolución.

El coeficiente de relajación K_b está definido como,

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

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.

4. Caso de estudio.

La zona de estudio comprende la margen argentina y uruguaya del Río Uruguay en cercanías de las ciudades de Gualeguaychú - Argentina y Fray Bentos - Uruguay. En esta zona se ubican tres estaciones meteorológicas sobre la margen argentina del río. Las mismas están indicadas como Torre NORTE, Torre ESTE y Torre SUR en la Figura 1. Las estaciones pertenecen al Programa de Vigilancia Ambiental

del Río Uruguay que desarrolla el Servicio Meteorológico Nacional mediante un convenio firmado con la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Las mismas poseen sensores de viento y temperatura a dos niveles: 2 m y 40 m para la temperatura; 10 m y 40 m para la velocidad y dirección del viento. En este trabajo se realizó la simulación del campo de viento, temperatura, humedad y presión usando el modelo ARPS y paralelamente se simuló la evolución espacio-temporal de la pluma de dispersión de gases emanada de la chimenea de la fábrica de pasta de celulosa Botnia utilizando el acople ARPS-MEL. La simulación correspondió al día 01 de enero de 2011 entre las 09:00 hs y las 15:00 hs (12:00 UTC a 18:00 UTC).



Figura 1. Zona de estudio y ubicación de las estaciones meteorológicas automáticas

5. Fuente de los datos de las condiciones iniciales del modelo.

En ARPS pueden utilizarse datos de las características de la superficie del suelo para ser incluidas como condiciones iniciales. Éstos fueron obtenidos a partir de un procesamiento de imágenes del satélite LANDSAT 5 y del satélite TERRA para el día 01 de enero de 2011. Con estos datos se procedió a realizar una clasificación no supervisada de los elementos existentes en el área de estudio en seis categorías. Posteriormente, cada categoría fue identificada realizando un muestreo a campo. La banda del infrarrojo térmico del mismo sensor permitió

obtener datos de la temperatura de la superficie del suelo. El modelo de elevación de terreno (MDE) fue obtenido del banco de datos de U.S. Geological Survey (<http://srtm.usgs.gov>). A partir de la imagen clasificada se obtuvieron datos de la cobertura del terreno como el tipo de vegetación en zonas rurales, zonas urbanas y zonas cubiertas por agua. Estos tipos de vegetación fueron llevados a categorías según la tipología de *Olson World Ecosystem Classes* (Olson *et al.*, 1985) y a partir de la correspondencia que proponen los autores, se obtuvo el mapa del parámetro de rugosidad del suelo.

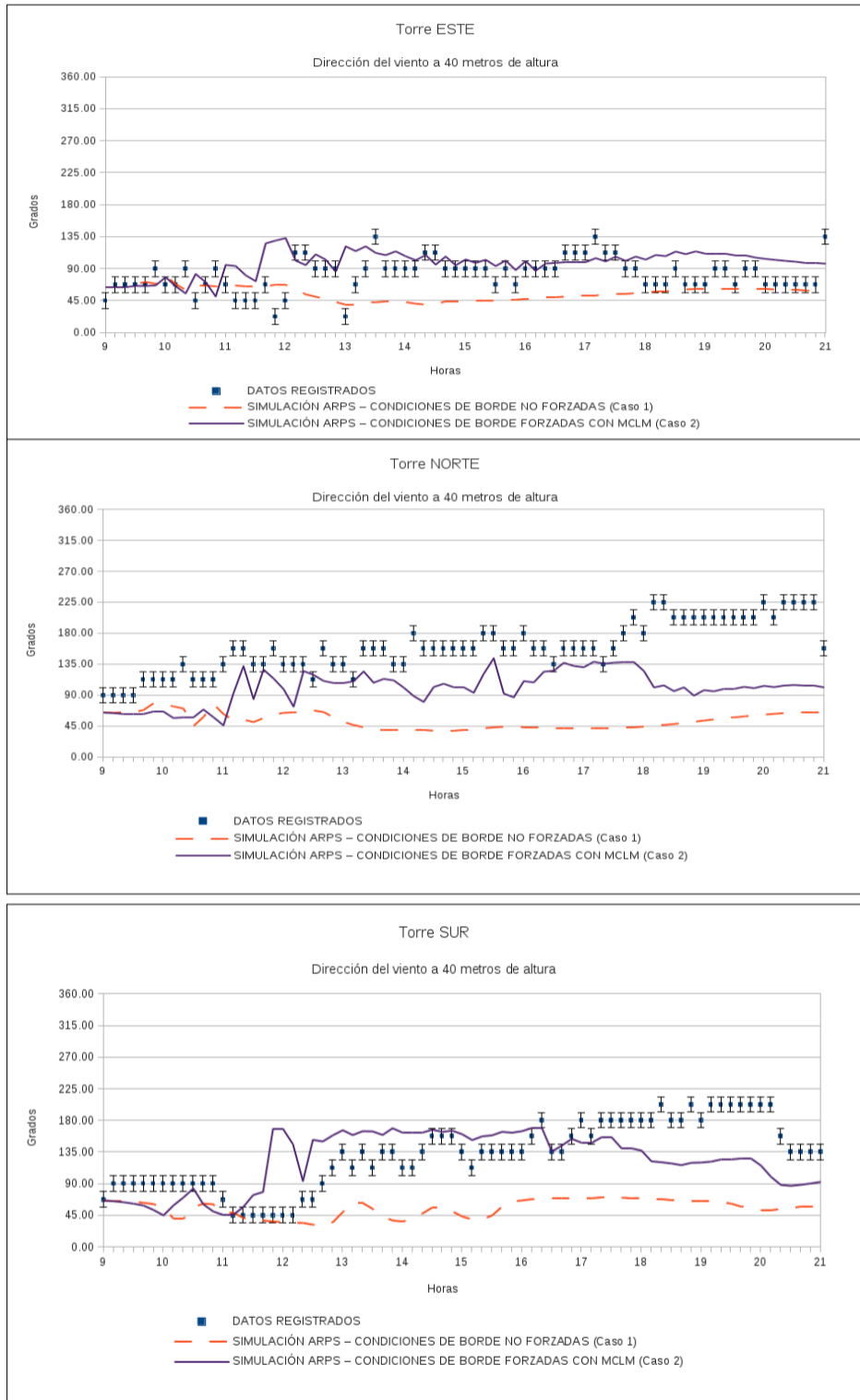


Figura 2. Marcha diaria de la dirección del viento para las torres ESTE, NORTE y SUR.

Para la obtención del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) se utilizaron los datos del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) montado en el satélite TERRA. Éstos fueron adquiridos del banco de datos de Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) de USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (http://lpdaac.usgs.gov/get_data). Todos los datos obtenidos de las imágenes de satélite fueron llevados a una resolución espacial de 1 Km. Para inicializar los perfiles de las variables meteorológicas se utilizaron datos obtenidos de un radiosondeo de Ezeiza correspondiente a las 12 UTC (9:00 hora local argentina) del 01 de enero de 2011. Para el modelo de partículas se

procedió a lanzar 100 partículas por paso de tiempo desde la boca de la chimenea, es decir 600 partículas por minuto. La chimenea tiene una altura de 120 metros sobre el terreno y está ubicada cerca de la ciudad de Fray Bentos. Cada partícula fluida transporta una concentración C de gas. Cuando las mismas llegan a la superficie del suelo quedan inmóviles en esa posición. Puede obtenerse la concentración de gas contando la cantidad de partículas en un volumen de aire. En este trabajo se utilizaron volúmenes cuyas dimensiones son: 300 metros x 300 metros en dirección horizontal y 5 metros en la vertical. Los resultados de la concentración de gas son expresados en forma relativa respecto de la concentración a la boca de chimenea C_0 .

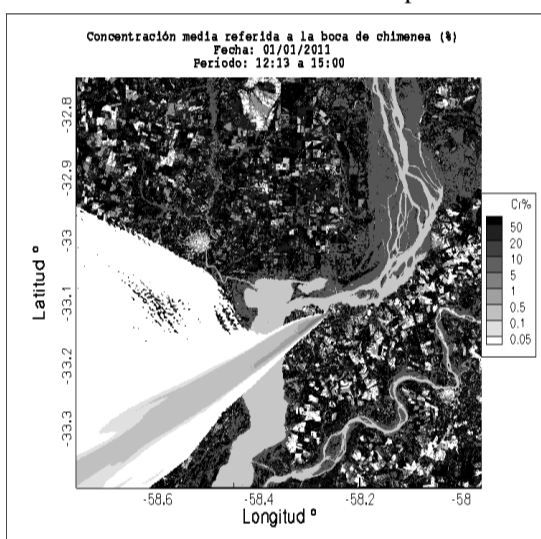


Figura 3. Concentración relativa media porcentual a nivel de respiración (2 metros). Caso 1: Sin asimilar los cambios en la circulación de viento externas al dominio de estudio

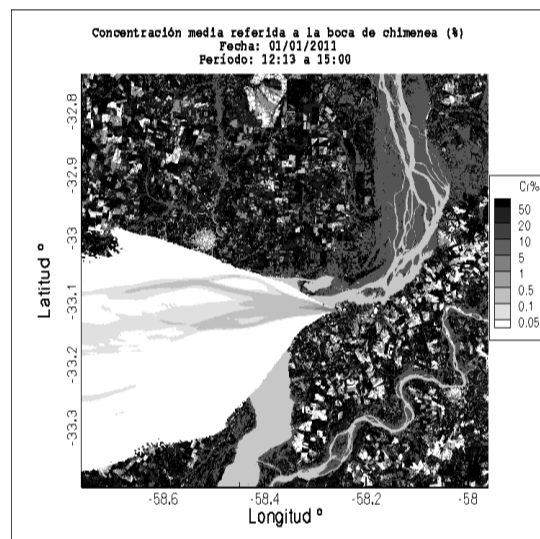


Figura 4. Concentración relativa media porcentual a nivel de respiración (2 metros). Caso 2: Asimilación de los cambios en la circulación del viento externas al dominio de estudio.

Resultados

Se comparan dos casos de simulación versus los datos medidos en las estaciones meteorológicas. En la primera simulación (caso 1) no se impusieron condiciones de borde externas mientras que en la segunda simulación (caso 2) se imponen condiciones

externas asimiladas del modelo MCLM. En la Figura 2 se observa marcha diaria de la dirección del viento a 40 metros de altura para las torres ESTE, NORTE y SUR. La Figura 3 muestra la concentración media a nivel de respiración (2 metros de altura) para el caso 1 mientras que la Figura 4 presenta el caso 2.

Conclusiones

La dirección del viento es mejor representada por la simulación cuando se tienen en cuenta condiciones de borde externas al dominio de estudio.

Es preciso tener en cuenta los cambios en la circulación del viento externas al dominio de estudio para simulaciones mayores a 2 horas para este caso de estudio.

Para el caso de simulación de dispersión de gases en el que no se asimilan las condiciones externas, la dirección del eje de la pluma de concentración es de Suroeste a Nordeste y no cambia en toda la simulación aunque se nota una ligera desviación al Este por un muy corto período de tiempo, en cambio, cuando se considera los cambios de la circulación externos al área de estudio se observa que el eje de la pluma rota tomando una dirección Este-Oeste. Además, la pluma es más dispersa que en primer caso.

Referencias bibliográficas

- AGUIRRE, C. A. (2005). Dispersión et mélanges atmosphériques euléro-lagrangien des particules fluides réactives. Application à des cas simples et complexes. *Tèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon 1*. N° ordre 115-2005. Lyon, France, pp. 1–329. <http://venus.ceride.gov.ar/twiki/pub/Cimec/RepositorioDeInformesTesis/aguirre-phd-thesis.pdf>
- AGUIRRE, C. A.; SIMOËNS, S.; AYRAULT, M. (2002). Dispersion of solid heavy particles in homogeneous turbulence. *X International Congress of Air Pollution*. Editorial: Wessex Institute of Technology (WIT). *Ecology and Environment* **53**. Paper DOI: 10.2495/AIR020591. Print, pp: 591–600. Disponible en: http://library.witpress.com/pages/listPapers.asp?q_bid=31
- AGUIRRE, C. A.; SIMOËNS, S.; AYRAULT, M. (2003). Chemically reactive dispersion into atmospheric boundary layer. *International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena*. Proceeding of PHYSMOD 2003. Prato, Italy, pp. 154–158.
- AGUIRRE, C. A.; BRIZUELA A. B., VINKOVIC I. y SIMOËNS S. (2006). Modelo Acoplado Eulero-Lagrangiano se Simulación de la Dispersión Atmosférica de Especies Químicamente Reactivas en la Capa Límite. *Revista Científica de Mecánica Computacional*. XXV (2). Asociación Argentina de Mecánica Computacional AMCA. ISSN 1666-6070. pp 185–205. Disponible en: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/issue/view/74/showToc> .
- AGUIRRE, C. A.; BRIZUELA, A. B. (2008). Simulación Numérica de la Dispersión Atmosférica de Gas Pasivo sobre una Colina utilizando un Modelo Acoplado. *Revista Científica de Mecánica Computacional*. XXVII (4). Asociación Argentina de Mecánica Computacional AMCA. pp. 217–237. Disponible en: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/issue/view/229>
- AGUIRRE, C. A.; BERRI, G. J.; BRIZUELA A. B.; ORCELLET, E. E. (2012). Simulación de la Circulación de Viento y Temperatura en Capas Bajas en la Región de la Ciudad de Gualeguaychú, Argentina. *Revista Científica de Mecánica Computacional*. XXXI (2) Asociación Argentina de Mecánica Computacional AMCA. pp. 21–36. Disponible en: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/issue/view/672>
- AGUIRRE, C. A., BRIZUELA A. B. HILDT, L. E. (2013). Computational Tools for the Simulation of Atmospheric Pollution Events. (2013). *Scientia Interfluvius*, In press. ISSN 1853-4422 (printed) ISSN 1853-4430 (online).
- BERRI, G. J. (1987). 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 pp.
- BERRI, G. J.; SRAIBMAN, L.; TANCO, R.; BERTOSSA, G. (2010). Low-level wind field climatology over the La Plata River region obtained with a mesoscale atmospheric boundary layer model forced with local weather observations. *J. App. Meteorol. And Climat.*, 49 (6), pp. 1293–1305.
- RCA. Rev. cient. agropecu. 17(1-2): 17-25 (2013)

- DEARDORFF, J. W. (1970). A Numerical Study of three-dimensional Turbulent Channel Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 41, pp. 453–480.
- GERMANO, M.; PIOMLLI, U.; MOIN, P.; CABOT, W. H. (1991). A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. *Journal of Physics Fluids*, A 3, pp. 1760–1765.
- KLEMP J. B.; WILHELMSON, R. B. (1978). The Simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 35, pp. 1070–1096.
- MAGEE, N.; CURTIS, J.; WENDLER, G., 1999. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska. *Theoretical and Applied Climatology*, 64 (1–2), pp. 39–47.
- MORRIS, C. J. G.; SIMMONDS, I.; PLUMMER, N., 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology*, 40 (2), pp. 169–182.
- MOIN, P.; KIM, J. (1982). Numerical Investigation of Turbulent Channel Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 118, pp. 341–377.
- OLSON, J. S.; WATTS, J. A.; ALLISON, L. J. (1983). Carbon in live vegetation of major world ecosystems. *Oak Ridge National Laboratory*, ORNL-5862, Oak Ridge TN, 240 pp.
- SEINFELD, J. H. (1986). Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. John Wiley and Sons. Editions. 460 pp.
- SILVESTER, S. A.; LOWNDES, I. S. and HARGREAVES D. M. (2009). A computational study of particulate emissions from an open pit quarry under neutral atmospheric conditions. *Atmospheric Environment*, 43, pp. 6415–6424.
- SMAGORINSKY, J. (1963). General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiments. *Mon. Weather Rev.* 91, pp. 99–164.
- SULOCHANA, C and MOKA SHEKHU (2010). Unsteady state mathematical model of chemically reactive pollutants from an instantaneous line source into a stable atmospheric boundary layer. *Applied Mathematics and Computation*, 217, pp. 2757–2767.
- TONG H.; WALTON A.; SANG J. and CHANG J. C. L. (2005). Numerical simulation of the urban boundary layer over the complex terrain of Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 39:3549–3563.
- XUE, M.; DROEGEMEIER, K.; WONG, V. (2000). The Advanced Regional Prediction System (ARPS). A Multi-Scale Nonhydrostatic Atmospheric Simulation and Prediction Model. Part I: Model Dynamics and Verification. *Meteorology Atmospheric Physics*, 75, pp. 161–193.