

Modelado de la última erupción volcánica del Complejo Volcánico Puyehue–Cordón Caulle.

Modeling of last eruption from Puyehue-Cordon Caulle volcanic complex

C. Mulena^{1,2}, D. Allende^{1,2}, E. Puliafito^{1,2}

Resumen: El presente trabajo está centrado en la utilización y validación del modelo Euleriano FALL3D para la simulación de la dispersión de aerosoles, durante la erupción del complejo volcánico Puyehue–Cordón Caulle, ocurrida el 4 de junio de 2011 a las 14:45 LT (18:45 UTC). Este modelo fue configurado para modelar la pluma de cenizas durante un período de 10 días a lo largo de 1200 km de extensión territorial. FALL3D obtuvo sus condiciones meteorológicas del modelo de mesoescala Weather Research and Forecasting (WRF). El empleo de un algoritmo para la detección de ceniza volcánica sobre imágenes satelitales, verificó la evolución de la pluma señalada por el modelo de dispersión y transporte. El buen acuerdo entre las comparaciones cuantitativas entre las simulaciones con las mediciones sugiere una adecuada aproximación de modelado y permite la aplicación futura de estas herramientas para el estudio de los efectos radiativos de aerosoles volcánicos.

Palabras clave: *Complejo volcánico Puyehue–Cordón Caulle, modelo FALL3D, modelo de mesoescala WRF, métodos de detección de ceniza.*

Abstract: This paper focuses on the use and validation of FALL3D Eulerian model to simulate the dispersion of aerosols during the eruption of the Puyehue–Cordón Caulle Volcanic Complex which occurred on June 4 2011 at 14:45 LT (18:45 UTC). This was configured to model the ash plume over a period of 10 days over 1200 km downwind of the volcano. It obtained the meteorological conditions from Weather Research and Forecasting (WRF) model. A detection of volcanic ash method was applied on satellite images consequently It verified the plume evolution indicated by the transport and dispersion model. The good agreement between quantitative comparisons between simulations with measurements suggests an appropriate modeling approach and allows the future application of these tools to the study of the radiative effects of volcanic aerosols.

Keywords: *Puyehue–Cordón Caulle Volcanic Complex, FALL3D model, WRF model, ash detection method.*

¹ Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente (GEAA), Facultad Regional Mendoza – Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, (M5502AJE) Mendoza, Argentina. Tel: 54 261 5243003

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Correspondencia: celeste.mulena@gmail.com

INTRODUCCION

Las partículas volcánicas inyectadas a la atmósfera durante erupciones explosivas forman plumas y

lluvias de cenizas características, constituyendo una seria amenaza a las poblaciones cercanas, incluyendo daños por la inhalación, perjuicios en

zonas cultivada y en el ganado, interrupción de caminos y disminución en la seguridad del transporte (Connor et al., 2001; Spence, et al., 2005a; Spence, et al., 2005b). Asimismo, el componente fino de la ceniza volcánica puede dispersarse sobre áreas muy grandes, influenciando significativamente el balance energético radiativo de la tierra y causando cambios en el clima (Crutzen 2006; Kristiansen et al. 2010).

La mayor área geotérmica activa de la zona volcánica sur de los Andes es el Complejo Volcánico Puyehue–Cordón Caulle (CVPCC). Este es un clúster de centros eruptivos que se extiende entre la caldera de Cordillera Nevada (1799 msnm.) ubicada en el extremo Noroeste, y el estratovolcán Puyehue (2236 msnm.) al Sureste, ambos separados por el sistema de fisura Cordón Caulle (1793 msnm.) (Lara et al. 2006; Sepúlveda et al. 2004). El evento eruptivo más reciente del CVPCC ocurrió el 4 de junio de 2011 a las 18:45 UTC, con la apertura de un nuevo ducto (40 ° 31' 21.14" S, 72 ° 08' 50.23" W) ubicado a una distancia de aproximadamente de 7 km al Norte-Noroeste del borde del cráter del volcán Puyehue (Collini et al., 2012). El fenómeno dispersó materiales piroclásticos en la estepa patagónica, debido a una circulación predominante de vientos Oeste-Este. La actividad volcánica obligó al desalojo de más de 3.500 personas y al cierre de los pasos fronterizos. La nube de cenizas provocada por la erupción se extendió sobre varias ciudades argentinas, entre ellas San Carlos de Bariloche y Villa La Angostura. Posteriores incidencias de la pluma de cenizas en el espacio aéreo sudamericano ocurrieron hasta varios meses posteriores a la erupción, aunque cabe señalar que la mayor inyección de ceniza en de 1200 km de extensión. La comparación de las salidas del modelo se realiza con las imágenes

la atmósfera tuvo lugar los primeros 10 días posteriores al evento (BGVN, 2012).

Actualmente, las plumas volcánicas son monitoreadas generalmente usando técnicas de identificación basadas en satélites. Sin embargo, estos métodos, están limitados tanto por las condiciones meteorológicas, como por la frecuencia de pasada del satélite. Una manera de complementar la información del sensor remoto consiste en usar modelos de dispersión, que pueden simular la concentración de ceniza en la atmósfera y la sedimentación de partículas en el suelo. FALL3D es un modelo Euleriano dependiente del tiempo, en tres dimensiones, para simular el transporte y deposición de cenizas volcánicas. El modelo resuelve la ecuación de advección-difusión-sedimentación en una grilla estructurada que sigue las elevaciones del terreno utilizando un esquema explícito de diferencias finitas de segundo orden (Costa et al. 2006; Folch et al. 2009). FALL3D ha sido empleado para el seguimiento de la evolución de nubes de ceniza del volcán islandés Eyjafjallajökull en abril-mayo de 2010 (Folch et al. 2012), el transporte y depósito de tefra de la erupción de 1982 del volcán El Chichón en el sur de México (Bonasia et al. 2012), el transporte y el depósito de tefra en diferentes escenarios de la erupción del volcán Concepción en Nicaragua (Scaini et al. 2012) y diferentes escenarios comparativos sobre el volcán Etna (Scollo et al. 2008), entre muchos otros.

El objetivo de este trabajo es mostrar la habilidad del modelo FALL3D para simular eventos eruptivos. Como caso de prueba, se utiliza la última erupción del CVPCC desde el 4 al 13 de Junio de 2011 a lo largo resultantes de aplicar un método de detección de ceniza volcánica que consiste en el uso de dos

canales del infrarrojo de las imágenes del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).

METODOLOGÍA

Modelado del transporte de ceniza

La simulación de la evolución de la nube de ceniza volcánica derivada del CVPCC, es simulada por el modelo FALL3D. Los datos de entradas del modelo de dispersión consisten en datos geográficos (topografía y localización del volcán), meteorológicos (campos de viento y otras variables como temperatura de aire, densidad y humedad relativa) y vulcanológicos (granulometría y término fuente). La granulometría implica la definición de cada clase de partículas, y porción de ellas (fracción de masa), distribución total de ceniza, densidad de cada clase de partículas y factor de forma de partículas (esfericidad). En tanto que el término fuente, refiere a la duración de la erupción, altura de la columna eruptiva, flujo de masa de partículas inyectadas en la atmósfera y distribución vertical de masa.

En FALL3D, un modelo basado en la Teoría de Pluma de Buoyant (Bursik 2001; Carazzo et al. 2006) determina el flujo de masa de partículas inyectadas en la atmósfera. Para determinar el caudal másico se toman datos de altura de columna de los reportes del el Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (OVDAS-SERNAGEOMIN, 2011) los cuales en algunos de los días detallan la imposibilidad de medición o estimación de los parámetros. Por otra parte, se eligen valores de la mezcla de propiedades de la abertura volcánica (temperatura de salida, velocidad, contenido de agua y distribución total de ceniza) compatibles

con una erupción subpliniana, las mismas fueron tomadas de otros trabajos (Sulpizio et al. 2005).

Asimismo, suponemos una distribución de tamaño de grano de cenizas Gauss Bimodal con diámetros medios de 0,5 mm - 700 μm y valores de dispersión de 125 μm - 500 μm , respectivamente. Asumimos y agrupamos la distribución total de cenizas en 7 clases de partículas. Hemos establecido la esfericidad de las partículas a 0,90 para todas las clases de partículas. Para la estimación de la velocidad de sedimentación de las partículas elegimos el modelo de Ganser (1993). Para el cálculo del coeficiente de difusión horizontal utilizamos el modelo Community Multiscale Air Quality (Byun & Schere 2006). El coeficiente de difusión vertical se calcula usando la opción Similarity (una extensión de la teoría de similitud de Monin-Obukhov) (Costa et al. 2006, Ulke, 2000, Monin and Obukhov 1954).

Con el objeto de reconstruir los campos meteorológicos durante la erupción, las simulaciones incluyen datos meteorológicos generados con el modelo de meoscala Weather Research and Forecasting (WRF: Skamarock et al., 2008). El modelo WRF es configurado con un dominio que comprende el sur de Argentina y Chile, con una resolución de 27 km, centrado en 45° 37'S y 66° 56'O, con un tamaño de 2700 x 2700 km² (dominio más externo de la Fig.1). Para la coordenada vertical, se utilizan 27 niveles sigma hasta 50 hPa. Las condiciones iniciales y de contorno para el modelo meteorológico se toman de datos de reanálisis del European Centre for Medium Range Forecasts (ECMWF) ERA-Interim (Dee et al. 2011) en una resolución de 0,7 grados cada 6 horas.

El modelo meteorológico se configuró para correr desde el 3 al 13 de junio de 2011 con las configuraciones que se muestran en la tabla I. Notar que existe un spin-up de 24 horas antes de ingresarse los datos meteorológicos al modelo de dispersión, el cual corre del 4 al 13 de junio de 2011. El dominio volcánico (dominio interno de

Fig.1) es localizado entre las longitudes 82° 0' 0" E a 57° 0' 0" E y las latitudes comprendidas entre 50° 35' 24" S a 28° 35' 23.9" S. La discretización posee un grillado horizontal de 22km de resolución, mientras que 500 m ha sido establecida para la vertical. La altura máxima de la vertical es de 15 km.

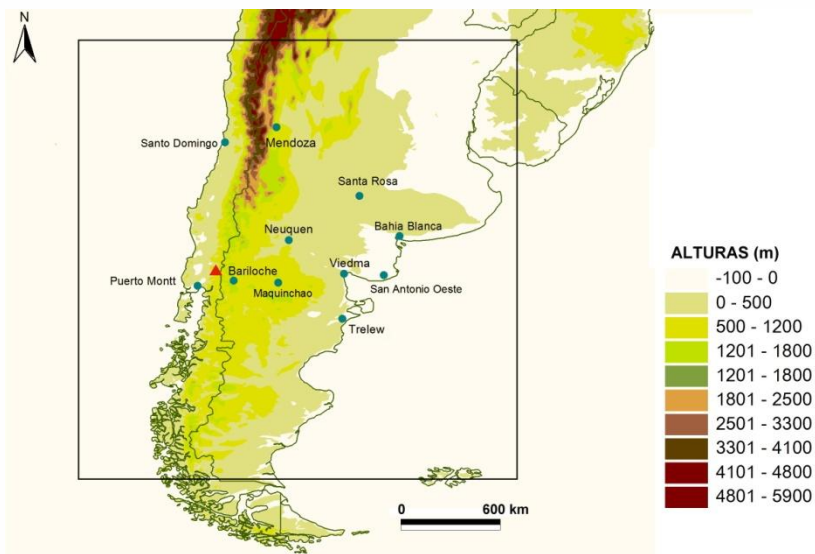


Figura I: Vista esquemática del dominio de modelado, incluyendo la topografía, y la ubicación del volcán Puyehue en rojo. Los puntos azules indican la ubicación de sitios meteorológicos de superficie y altura utilizados para la validación meteorológica (no mostrada en este artículo).

PROCESO ATMOSFÉRICO	ESQUEMAS/MODELOS EMPLEADOS EN WRF
Radiación de onda larga	Rapid Radiative Transfer
Radiación de onda corta	Dudhia
Microfísica de nubes	WRF Single Moment 5 class microphysics
Capa superficial	Difusión Térmica
Capa límite planetaria	Yonsei University
Cúmulos	Kain-Fritsch

Tabla I: Opciones de configuración seleccionadas para la simulación con WRF.

Detección de ceniza volcánica

Debido a que el componente ácido de la ceniza volcánica posee propiedades de absorción opuestas al agua y al hielo en las longitudes de onda comprendidas entre 10-12 μm , es común la utilización de datos de satélites en las longitudes del infrarrojo para estudiar el transporte de cenizas en las erupciones explosivas y diferenciarlo de nubes meteorológicas. En este trabajo, se utilizaron dos algoritmos diferentes para el reconocimiento de patrones asociados a aerosoles volcánicos con el objeto de validar y complementar los resultados de la simulación.

Prata (1989; 2009) desarrolló su método basándose en la diferencia entre la temperatura de brillo entre dos canales del satélite de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) centrados alrededor de 11 y 12 μm . La Diferencia de Temperatura de Brillo (DTB) entre los dos canales es generalmente negativa para plumas volcánicas (mayor absorción en 11 que en 12 μm) y positiva para nubes meteorológicas (mayor absorción en 12 que en 11 μm). En este trabajo, se utilizaron los canales 31 y 32 del producto MOD02-Level 1B de MODIS (Guenther et al., 1998) centrados en 11 y 12 μm . Se computó la DTB en las imágenes obtenidas para los días de simulación,

de acuerdo con la fecha y hora de pasada de los satélites Terra y Aqua, con resolución de 1 km.

RESULTADOS

La erupción del PCCVC comenzó el 4 de junio a las 18.45 UTC y continuó los días subsiguientes. El episodio fue observado por primera vez por MODIS a bordo del satélite Terra a las 04:15 UTC del 05 de junio de 2011. Se utilizó esta primera imagen y las principales imágenes posteriores para aplicar el algoritmo de Prata basado en dos canales infrarrojos de MODIS.

La Fig.2 correspondiente al 5 de Junio a las 04:15 UTC, muestra que la pluma siguió una dirección Sur-Sur Este. El método de Prata señala la presencia de ceniza en $\text{DTB} < 0$ principalmente en la zona cercana al sitio volcánico, entre 40-45°S y los 60-65°W, pudiéndose observar dos ramas con color marrón que muestran la mayor presencia de ceniza en aquella franja (Fig.2A). También, el método detecta falsos positivos alrededor de los 50°S. En la modelación de la columna volcánica con FALL3D se puede ver la misma dirección de pluma observada por la discriminación, sin embargo, la rama izquierda del penacho principal no se observa (Fig.2B).

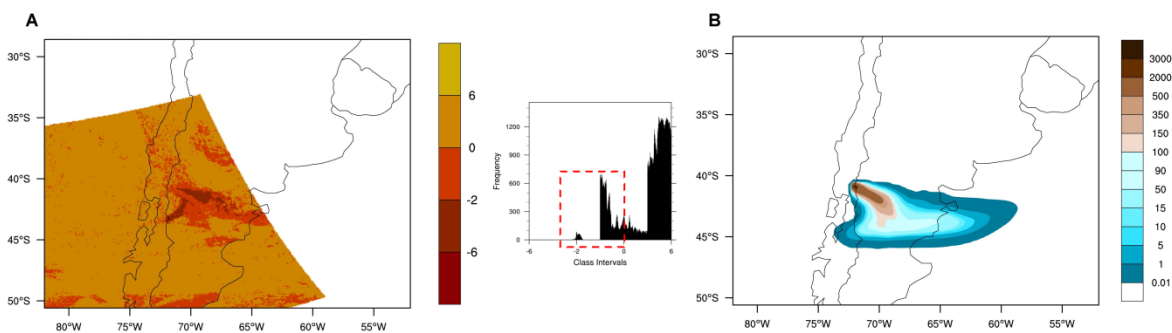


Figura 2: Comparación cualitativa para el 5 de junio de 2011 a las 04:15 UTC entre la discriminación de aerosoles volcánicos utilizando el método de Prata (izquierda) y entre la columna de ceniza volcánica (en g/m^2) simulada con FALL3D (derecha). Se muestra también el correspondiente histograma de frecuencias determinado por Prata.

Para el día 6 de junio existen áreas en la Patagonia argentina cubiertas por nubes de cenizas volcánicas, junto con algunas nubes meteorológicas (discriminadas con valores positivos para el método de Prata). Tanto en el caso del método de discriminación (Fig.3A) como en el caso de la modelación (Fig.3B), se muestra

claramente el penacho en forma de “V invertida” con la dirección Norte-Norte-Sur. A diferencia del histograma de la Fig.3A que muestra que la mayor frecuencia se encuentra en las categorías -1 y 0, en este caso el histograma de la Fig.3B está en la clase -2.

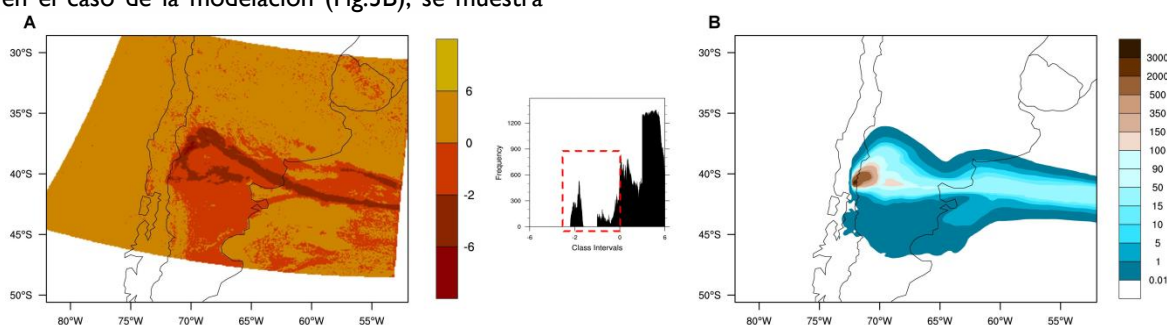


Figura 3: Comparación cualitativa para el 6 de junio de 2011 a las 14:15 UTC entre la discriminación de aerosoles volcánicos utilizando el método de Prata (izquierda) y entre la columna de ceniza volcánica (en g/m^2) simulada con FALL3D (derecha). Se muestra también el correspondiente histograma de frecuencias determinado por Prata.

En el caso del día 8 de junio de 2011 a las 18:25 UTC, no se produce un cambio notorio en la dirección de viento. El método de discriminación resulta efectivo a partir de $DTB < -2$ (Fig.4A) y la

modelación (Fig.4B) muestra una pluma más extensa que la de MODIS. Este último puede representar la rotación de pluma entre $55^\circ W$ y $70^\circ W$.

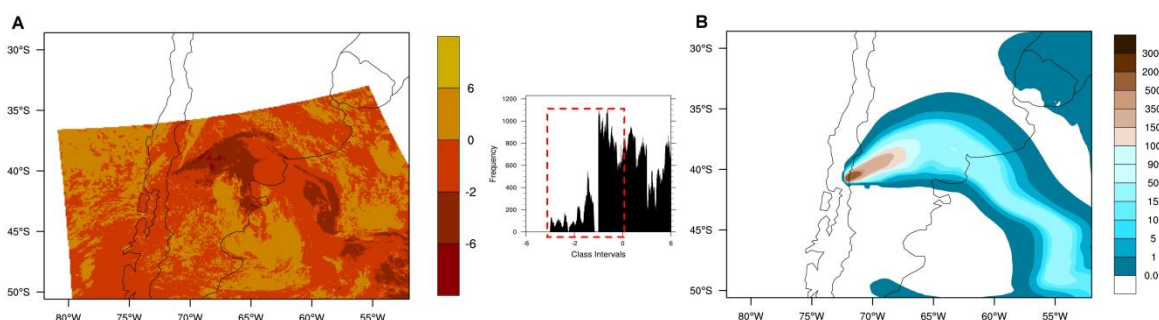


Figura 4: Comparación cualitativa para el 8 de junio de 2011 a las 18:25 UTC entre la discriminación de aerosoles volcánicos utilizando el método de Prata (izquierda) y entre la columna de ceniza volcánica (en g/m^2) simulada con FALL3D (derecha). Se muestra también el correspondiente histograma de frecuencias determinado por Prata.

El 11 de junio de 2011 a las 14:45 UTC, muestra una de las últimas fases de la erupción con dirección Este. Al igual, que el caso anterior, el

método de discriminación mejora con $DTB < -2$ (Fig.5A). Otra vez la modelación muestra mayor extensión que la detección (Fig.5B).

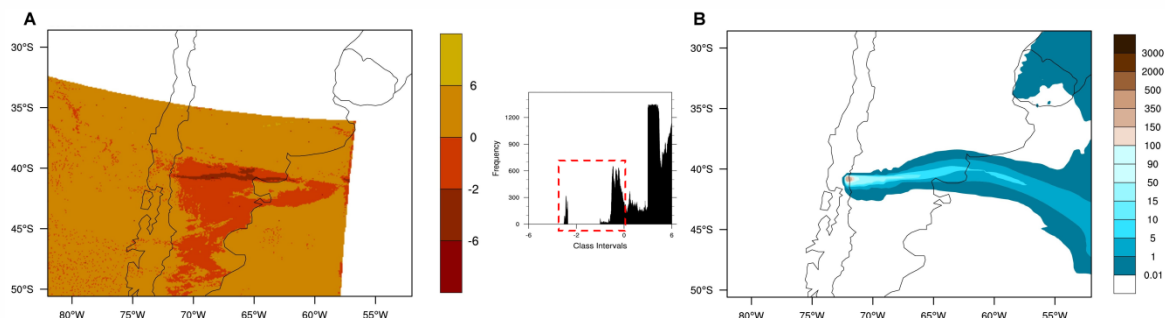


Figura 5: Comparación cualitativa para el 11 de junio de 2011 a las 14:45 UTC entre la discriminación de aerosoles volcánicos utilizando el método de Prata (izquierda) y entre la columna de ceniza volcánica (en g/m^2) simulada con FALL3D (derecha). Se muestra también el correspondiente histograma de frecuencias determinado por Prata.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se aplicó el modelo Euleriano FALL3D para estudiar la dispersión de ceniza volcánica de la erupción del Puyehue para 10 días de junio de 2011 a lo largo de 1200 km de extensión territorial. El modelo fue inicializado con datos meteorológicos generados por el modelo de mesoescala WRF, alimentado con datos de reanálisis ERA-Interim. Para evaluar cualitativamente la dispersión de aerosoles, se probó los métodos de discriminación de ceniza de Prata utilizando datos de MODIS para todo el período de simulación.

Las comparaciones entre las salidas del modelo con las mediciones de MODIS poseen un acuerdo razonable. Las ventajas del modelado pueden enmarcarse en: alta resolución espacial (horizontal y vertical) y temporal. Sin embargo, el modelado posee incertidumbres inherentes especialmente a los parámetros volcánicos, tales como distribución total de cenizas y tamaño de las mismas que afectan en definitiva los resultados finales de simulación. Mientras, que los datos estimados por satélite están disponibles con una baja resolución temporal y, en muchos casos, espacial, son un de los pocos datos disponibles para validar las salidas del modelo.

En conclusión, el diagnóstico y/o pronóstico de plumas volcánicas requiere el uso de modelos volcánicos de ceniza. Una simulación realista de los procesos involucrados en la emisión, transporte, dispersión y transformación de esos aerosoles es fundamental para responder esas preguntas. El sistema de modelado WRF-FALL3D con la configuración y parametrizaciones detalladas aquí representa adecuadamente la dispersión de cenizas volcánicas y permitirá en un futuro, la realización de estudios sobre los efectos radiativos de aerosoles y su realimentación en procesos atmosféricos. Sin embargo, su uso necesita ser complementado con mediciones y/o estimaciones como los datos satelitales.

REFERENCIAS

Bonasia, R. et al., 2012. Numerical simulation of tephra transport and deposition of the 1982 El Chichón eruption and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 231-232, 39–49 p.

Bulletin of the Global Volcanism Network: BGVN (2012). [online] <http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1507-15=&volpage=var> (Accessed February 2012)

- Bursik, M., 2001.** Effect of wind on the rise height of volcanic plumes. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28 (18), pp.3621–3624 p.
- Byun, D. & Schere, K.L., 2006.** Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 59, 51–77 p.
- Carazzo, G., Kaminski, E. & Tait, S., 2006.** The route to self-similarity in turbulent jets and plumes. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 547, 137–148 p.
- Collini, E. et al., 2012.** Volcanic ash forecast during the June 2011 Cordón Caulle eruption. *Natural Hazards*, Vol. 66(2), 389–412 p. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11069-012-0492-y> [Accessed November 18, 2013].
- Connor, C.B. et al., 2001.** Estimation of volcanic hazards from tephra fallout. *Natural Hazards Review*, Vol. 2(1), 33–42 p.
- Costa, A., Macedonio, G. & Folch, A., 2006.** A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 241(3-4), 634–647 p.
- Crutzen, P.J., 2006.** Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, Vol. 77(3-4), 211–220 p.
- Dee, D.P. et al., 2011.** The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 137(656), 553–597 p.
- Folch, A., Costa, A. & Basart, S., 2012.** Validation of the FALL3D ash dispersion model using observations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash clouds. *Atmospheric Environment*, Vol. 48, 165–183 p.
- Folch, A., Costa, A. & Macedonio, G., 2009.** FALL3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. *Computers & Geosciences*, Vol. 35(6), 1334–1342 p.
- Ganser, G.H., 1993.** A rational approach to drag prediction of spherical and nonspherical particles. *Powder Technology*, Vol. 77(2), 143–152 p.
- Guenther, B. et al., 1998.** Prelaunch algorithm and data format for the Level I calibration products for the EOS-AM1 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36(4), 1142 – 1151 p.
- Kristiansen, N.I. et al., 2010.** Remote sensing and inverse transport modeling of the Kasatochi eruption sulfur dioxide cloud. *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, D00L16 p.
- Lara, L.E. et al., 2006.** Magmatic evolution of the Puyehue–Cordón Caulle Volcanic Complex (40° S), Southern Andean Volcanic Zone: From shield to unusual rhyolitic fissure volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 157(4), 343–366 p. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027306001788>.
- Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (OVDAS-SERNAGEOMIN) (2001).** [online] <http://www.sernageomin.cl/volcanobservatorio.php> (Accedido Junio 2011)
- Prata, A., 2009.** Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic. *Natural Hazards*, Vol. 51(2), 303–324 p.
- Prata, A.J., 1989.** Observations of volcanic ash clouds in the 10-12 μm window using AVHRR/2 data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10(4-5), 751–761 p.
- Scaini, C., Folch, a. & Navarro, M., 2012.** Tephra hazard assessment at Concepción Volcano, Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 219-220, 41–51 p.
- Scollo, S., Folch, a. & Costa, a., 2008.** A parametric and comparative study of different tephra fallout models. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 176(2), 199–211 p.
- Sepúlveda, F. et al., 2004.** Chemical and isotopic composition of geothermal discharges from the Puyehue-Cordón Caulle area (40.5°S), Southern Chile. *Geothermics*, Vol. 33(5), 655–673 p.
- Skamarock, W.C. et al., 2008.** A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research.
- Spence, R.J.S., Kelman, I., Calogero, E., et al., 2005.** Modelling expected physical impacts and human casualties from explosive volcanic eruptions. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 5(6), 1003–1015 p.

Spence, R.J.S., Kelman, I., Baxter, P.J., et al., 2005. Residential building and occupant vulnerability to tephra fall. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 5(4), 477–494 p.

Sulpizio, R. et al., 2005. A complex, Subplinian-type eruption from low-viscosity, phonolitic to tephri-phonolitic magma: the AD 472 (Pollena) eruption of Somma-Vesuvius, Italy. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 67(8), 743–767 p.

Recibido/Submitted: 18/11/2013

Aceptado/Accepted: 07/10/2013

Reviewers/ Revisores: 2

PUBLICA CON
NOSOTROS

PF

- *Revista seriada*
- *Revisión por pares*
- *Acceso abierto*
- *Sin cargos para los autores*
- *Formato en línea*
- *editor@pyflow.geohiggins.com*