

# Pronósticos de Dispersión de Ceniza Volcánica para la Aeronavegación

Soledad Osores<sup>(1)</sup>, Eliana Vazquez<sup>(1)</sup>, Micaela Maurizi<sup>(1)</sup>

(1) Servicio Meteorológico Nacional  
Av. Dorrego 4019, Buenos Aires, Argentina

**Abstract.** Los pronósticos de dispersión de cenizas volcánicas provistos por los Centros de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAAC) son esenciales para garantizar la seguridad aeronáutica. Con el fin de optimizar el uso del espacio aéreo ante la presencia de ceniza volcánica, OACI prevé la provisión del servicio de Información Cuantitativa de Ceniza Volcánica (QVA, por sus siglas en inglés), que los VAAC deberán proveer para finales de esta década según el acuerdo internacional. El QVA consiste en pronósticos de concentración de ceniza volcánica tanto determinístico como probabilístico. En este marco, en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) trabaja con el modelo numérico FALL3D 8.2 para generar ensambles de dispersión, determinando la mejor configuración para producir la información QVA. El pronóstico de QVA se encuentra en la etapa de capacidad operativa inicial, por lo que el desarrollo de las mejores prácticas permitirá estandarizar el proceso entre los VAAC.

**Keywords:** VAAC, QVA, FALL3D, pronóstico

## 1 Introducción

Tras la ocurrencia de serios incidentes de aeronaves en vuelo que ingresaron a nubes de ceniza volcánica en los últimos 40 años, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) consideró que los pilotos debían estar informados acerca de la amenaza volcánica y para ello en 1998 se crearon 9 Centros de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAAC), cuya área de responsabilidad se muestra en la Figura 1. Los VAAC tienen como responsabilidad vigilar la presencia de ceniza volcánica en la atmósfera, implementar y operar sistemas de pronóstico numérico para determinar la futura dispersión de ceniza en la atmósfera desde que son detectadas e informar acerca de la extensión y movimiento pronosticado a diversos usuarios aeronáuticos [1].

Por muchos años, dada la gravedad de los incidentes se implementó el criterio, regulado por la OACI, de no volar en regiones con ceniza volcánica. A este criterio se le conoció como criterio de “Tolerancia Cero”. En dicho contexto, los pronósticos numéricos de dispersión operativos tenían como objetivo estimar con la mayor precisión posible la localización de la nube volcánica para generar los avisos de ceniza volcánica. Pero en abril de 2010 el volcán Eyjafjallajökull (Islandia) hizo erupción y la ceniza cubrió gran parte del espacio aéreo europeo, uno



que los VAAC deberán proveer a lo largo de esta década [8] con una Capacidad Operativa Inicial (COI) para nubes de ceniza volcánica significativas, es decir nubes que generen un impacto generalizado en las operaciones de aeronaves y la navegación aérea.

La información QVA consiste en pronósticos numéricos de concentración de ceniza determinísticos y probabilísticos de dispersión de cenizas. Los pronósticos determinísticos consisten en una única simulación numérica de dispersión, mientras que los probabilísticos son resultados de simulaciones por ensambles y el cálculo de la probabilidad consiste en el cálculo de la frecuencia relativa de superar los umbrales acordados, de 10, 5, 2 y 0.2 mg m<sup>-3</sup>, en base a los estudios de impacto en las aeronaves [2]. La información QVA se proporcionará en dos formatos: uno reticulado NetCDF y el otro en esquema IWXXM como polígonos. QVA tendrán una resolución horizontal de 0.25°, 5000 pies de resolución vertical desde superficie hasta el nivel del vuelo 600 (~18200 m) y paso de tiempo cada 3 horas. QVA se actualizará como mínimo cada 6 horas. Se espera que la COI del QVA sea provista por aquellos VAAC que puedan a fines de 2025, como Práctica Recomendada a fines de 2026 y como Estándar hacia fines de la década.

A continuación, se describe el modelo numérico utilizado para el desarrollo de QVA que proveerá el VAAC Buenos Aires, la aplicación sobre un caso de estudio y conclusiones finales.

## 2 Modelo de dispersión y depósito de cenizas

En el VAAC Buenos Aires se utiliza el modelo FALL3D [9] que es un modelo Euleriano tridimensional que resuelve la ecuación de advección, difusión y sedimentación para simular el transporte y depósito de partículas de tefra. También permite simular la resuspensión de ceniza volcánica y polvo mineral, la trayectoria de trazadores pasivos (SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) y el transporte de radionucleidos. A partir de la versión 8 de este modelo es posible correr el modelo en modo determinístico y ensamble.

### 2.1 Datos de entrada del modelo FALL3D

El modelo FALL3D requiere de condiciones iniciales y de borde de datos meteorológicos. Algunas de las variables meteorológicas que requiere el modelo de dispersión son la distribución tridimensional de viento y la temperatura, la distribución bidimensional de la velocidad de fricción, la altura de la capa límite, entre otras.

El modelo también requiere de la definición del término fuente, que consiste en datos propios del volcán tales como la ubicación geográfica del cráter y las características de la emisión. La localización del volcán se toma de la base de datos del Smithsonian Institution para los VAACs que centraliza la información provista por cada Estado. Para caracterizar la emisión el modelo es necesario determinar qué tipo de partículas se emiten, cuánta cantidad de material es inyectada a la atmósfera, y de qué manera esa masa se distribuye en la vertical. Para

definir el tipo de partículas que un volcán emite, se provee una distribución de tamaños de partículas (GSD por sus siglas en inglés), la densidad y un parámetro de forma para cada clase de tamaños de partículas. Dado que es difícil tener esta información en tiempo real estas características están tabuladas. Para definir la cantidad de material que se inyecta en la atmósfera, se estima el flujo de masa total, que es la cantidad de masa por unidad de tiempo emitida. Para definir de que manera se distribuye ese material en la vertical, el modelo permite seleccionar la forma del perfil vertical de emisión entre esquemas simples o modelos más complejos.

En el SMN se utilizan los campos meteorológicos del Global Forecasting System (GFS) del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) de  $0.25^\circ$  de resolución horizontal, 41 niveles verticales, con un plazo de pronóstico a 24 horas y pasos temporales cada 1 hora. La GSD se estima por análogos, considerando la fracción fina de ceniza (menor a  $64\ \mu\text{m}$ ) y se tienen tres categorías de GSD: Estándar, Gruesa y Fina, que dependen de la historia eruptiva de cada volcán. La distribución vertical de la masa es parametrizada por el esquema simple Suzuki [10]. Este esquema distribuye la masa de acuerdo a un perfil unidimensional con forma de hongo y depende de dos parámetros de forma, A y L, que determinan la forma en que el material se distribuye en la vertical sobre la fuente de emisión. En [11], se puede encontrar la configuración utilizada por el VAAC Buenos Aires, para la generación de los pronósticos de concentración determinísticos actual.

## 2.2 Ensamblajes

Para la generación de los pronósticos probabilísticos, el modelo FALL3D permite seleccionar qué parámetros se perturban para generar los ensambles de dispersión. Una vez generado el ensamble se realiza un Postprocesamiento que permite estimar la concentración 3D para cada miembro y para cada tiempo, la media, el desvío estándar, la probabilidad de superar umbrales, y otros parámetros estadísticos del ensamble.

## 2.3 Salidas del modelo FALL3D

El modelo FALL3D da como resultado la distribución tridimensional de la concentración de ceniza, y también provee la concentración en ciertos niveles verticales de interés para la aeronáutica, llamados niveles de vuelo (FL). Además, el modelo calcula la distribución bidimensional de la carga de masa total, es decir la integral en la vertical de la masa de ceniza suspendida en la atmósfera, que equivale a la vista en plano de la pluma. Este es el campo que usualmente se compara con las imágenes satelitales, utilizando el umbral de  $0.1$  a  $0.2\ \text{g}/\text{m}^2$ .

## 3 Caso de estudio

Dentro de la región de el VAAC Buenos Aires, se encuentra el volcán Ubinas, ubicado en el sur de Perú con una elevación de  $5672\ \text{m}$  sobre nivel del mar. El

19 de julio de 2019, este volcán entró en erupción y su inicio se detectó a las 7:30 UTC con un pulso que alcanzó una temperatura de tope mínima entre los  $-60$  y  $-50^{\circ}\text{C}$  en la longitud de onda de  $10.3\text{ }\mu\text{m}$  del satélite GOES-16. A las 8:00 UTC se produjo una nueva emisión que persistió por varias horas, con variaciones en la temperatura de tope mínima permitiendo inferir variaciones en la altura de tope (Fig. 2). A partir de las 13:00 UTC se redujo la intensidad de la emisión. A las 16:00 UTC comenzó a detectarse el ingreso de nubosidad meteorológica en la zona de emisión, la cual dificultó la detección de la pluma de ceniza en las horas posteriores. Según el registro de el VAAC Buenos Aires, el volcán siguió emitiendo ceniza en niveles bajos. Durante el 19 de julio, en superficie se registró la llegada de la ceniza a partir de las 12:00 UTC en las estaciones meteorológicas de Cobija, Santa Ana, Cochabamba, Concepción, Oruro y Vallegrande localizadas en Bolivia. A las 16:00 UTC la estación de La Paz, Bolivia (a unos 240 km corriente abajo del volcán Ubinas) registró 4 km de visibilidad. El 20 de julio la pluma de ceniza llegó con baja concentración sobre el este de Brasil, cubriendo el espacio aéreo sobre los aeropuertos de Río de Janeiro y San Pablo.

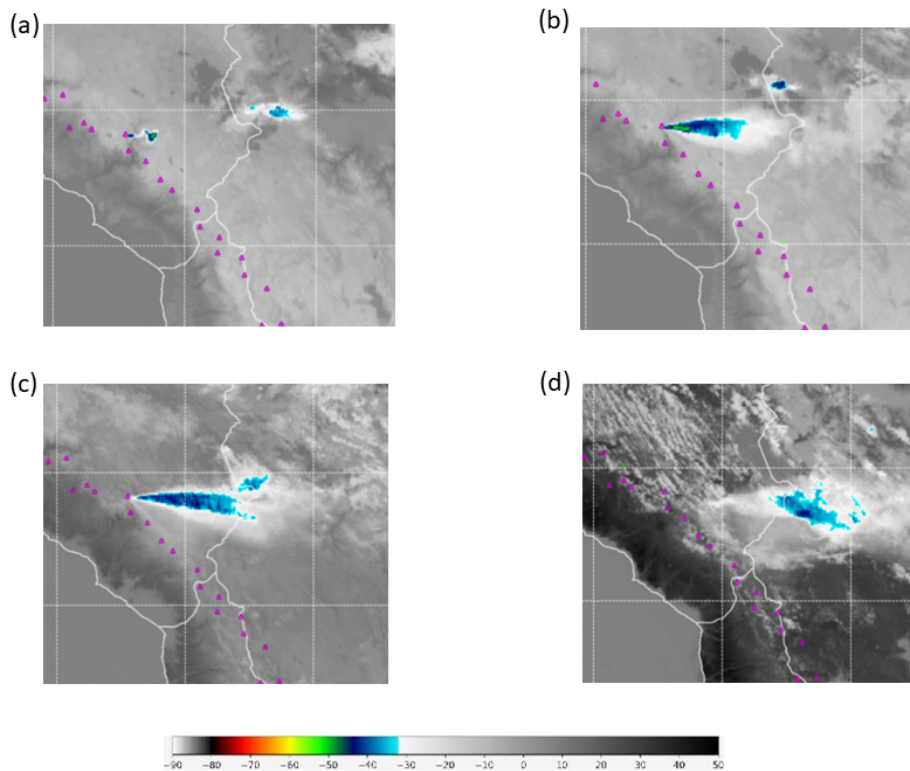


Fig. 2: Temperatura de tope en  $10.3\text{ }\mu\text{m}$  estimada con datos del satélite GOES-16 para el 19 de julio del 2019 a las (a) 8:00, (b) 11:00 (c) 13:00 y 15:00 (d) UTC.

## 4 Configuración del modelo FALL3D para la generación de la Información QVA

Se utilizaron cuatro ciclos diarios del GFS, con su respectivo análisis y pronósticos a 3 y 6 horas, para actualizar el estado del campo meteorológico al seguir el transporte de la pluma de ceniza. La corrida control se configuró considerando el perfil de emisión Suzuki con valores de  $A=6$  y  $L=5$ . Se estimaron las alturas de tope a cada hora, combiando los datos de temperatura de tope provenientes del satélite GOES-16, el movimiento de la pluma observado y el perfil atmosférico del punto más cercano del modelo meteorológico. La granulometría para este volcán corresponde a una GSD gruesa de acuerdo a la configuración determinística.

Para evaluar la sensibilidad del evento a los parámetros más sensibles de acuerdo a [12] se generaron tres simulaciones por ensamble, perturbando la altura de tope (que afecta al flujo de masa fuertemente), la forma del perfil de emisión ajustando el parámetro  $A$  del perfil Suzuki (que modifica la fracción de masa que se inyecta en cada nivel vertical), la media de la distribución granulométrica (que afecta al tiempo de residencia de las partículas en la atmósfera), el viento (que cambia el patrón de dispersión) y cambiando la cantidad de miembros en el ensamble (lo que impacta en el costo computacional). Las perturbaciones de cada parámetro se generaron tomando muestras al azar en un rango determinado por un valor relativo o absoluto respecto del valor del parámetro control, considerando distribuciones uniformes de cada uno de los parámetros mencionados. En la Tabla 1 se muestra la configuración de cada simulación.

La simulación S1 tiene en cuenta los parámetros que tienen un mayor impacto sobre los resultados y el menor número de miembros del ensamble, la simulación S2 aumenta ligeramente la cantidad de miembros en el ensamble y la simulación S3 perturba la granulometría y no el viento.

Parametros (Perturbación)	S1	S2	S3
Miembros	20	30	30
H (relativa %)	30	30	30
Suzuki-A (absoluta)	2	2	2
Media de granulometría (absoluta)	-	-	2
Viento (relativa %)	20	20	-

Table 1: Parámetros perturbados en cada simulación S1, S2 y S3 y cantidad de miembros.

Para validar los resultados de estas simulaciones se utilizó el producto RGB de cenizas, teniendo en cuenta que en tonos magenta se detecta la ceniza, en tonos amarillos la mezcla de ceniza y  $SO_2$  y tonos verdes el  $SO_2$ , siendo  $0.1 \text{ g m}^{-2}$  el límite de detección satelital de ceniza. Además, se compararon los resultados con una clasificación satelital que realizaron [13] permitiendo hacer

una primera comparación categórica y calculando índices tales como el BIAS, el False Alarm Ratio (FAR) y el Probability of Detection (POD). También se evaluó la distribución tridimensional de la pluma buscando identificar los niveles verticales que explicaban mejor el patrón de dispersión.

## 5 Resultados

Inicialmente los resultados fueron muy similares, pero al avanzar el tiempo se comenzaron a detectar mayores diferencias. A las 18:00 UTC del 19 de julio, la pluma de cenizas observada en la imagen del producto RGB de cenizas se extendía hacia el este en niveles altos y hacia el sudeste en niveles más bajos de la atmósfera. Al comparar el producto satelital con la frecuencia relativa de superar el umbral de  $0.1 \text{ g m}^{-2}$ , se observó que las tres simulaciones representaron adecuadamente la extensión de la pluma, conteniendo la pluma de ceniza con valores altos de frecuencia relativa y mostrando una mayor variabilidad en el frente de avance hacia el este de la pluma. La simulación S2 presentó una mayor dispersión de los resultados en el margen este de la pluma, mientras que la S3 presentó una menor dispersión. Esto se explica con la menor sensibilidad que tiene el modelo a las perturbaciones en el rango de la granulometría utilizada, respecto a la sensibilidad que tiene a las perturbaciones en el viento, acorde a [12].

El 20 de julio a las 06:00 UTC (Fig. 3) la pluma de ceniza se diluyó bastante, pero se pudo continuar observando en el norte de Paraguay y el sudeste de Brasil, aunque fue difícil su detección en Bolivia y la nubosidad meteorológica dificultó aún más la detección sobre Perú. Los tres ensambles representaron la extensión de la pluma hacia el este, conteniendo en gran parte la ceniza detectada en el RGB de cenizas. La simulación S3 presentó las mayores discrepancias, dejando píxeles de ceniza y SO<sub>2</sub> por fuera de la pluma modelada. Sobre Bolivia la carga de masa pudo ser inferior al límite de detección satelital (i.e  $0.1 \text{ g m}^{-2}$ ), y la pluma de ceniza modelada pareció sobreestimarla.

Al analizar la estructura vertical de la pluma de la simulación S1 (Fig. 4) se observó que la señal de ceniza en el sudoeste de Brasil fue explicada por la concentración de ceniza en niveles altos de la atmósfera, FL350 a FL400 ( $\sim 10600$  a  $\sim 12000 \text{ m}$ ), mientras que en el norte y noroeste de Paraguay por la concentración entre el FL150 ( $\sim 4500 \text{ m}$ ) y FL400 ( $\sim 12000 \text{ m}$ ) y la dispersión cercana a la fuente fue explicada por la concentración de ceniza de niveles bajos de la atmósfera.

Por otro lado, se realizó una comparación categórica del resultado de la carga de masa simulada respecto de la clasificación de ceniza y píxeles mixtos (ceniza y SO<sub>2</sub>) utilizando los datos del sensor VIIRS del satélite NOAA-20 [13]. También se comparó dicha observación con la simulación reducida en un 10%. Para la comparación se consideró la máscara de la carga de masa media del ensamble tomando el umbral de  $0.1 \text{ g/m}^2$  de cada simulación, se generó la respectiva tabla de contingencia y se calcularon los índices que se presentan en la Tabla 2. Cabe aclarar que en esta comparación no se filtraron los píxeles con presencia

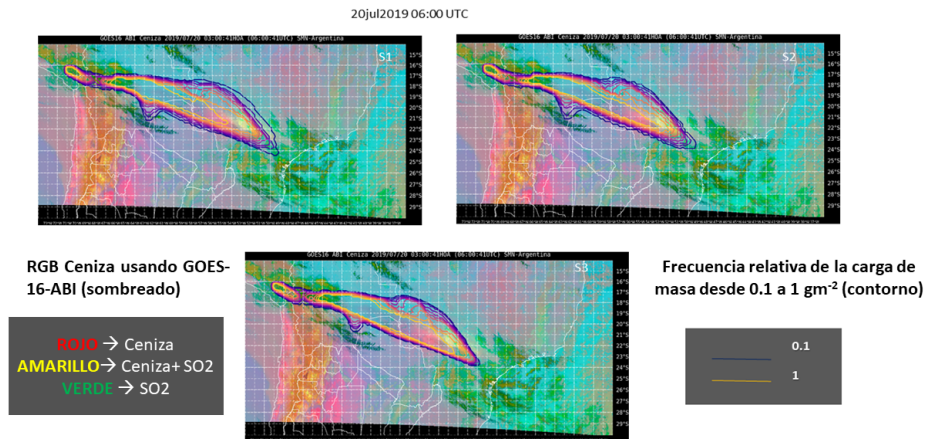


Fig. 3: Producto RGB de cenizas estimado a partir de datos del satélite GOES-16 (sombreado) y la frecuencia relativa de superar el umbral de 0.1 g/m<sup>2</sup> de cada ensamble S1, S2 y S3 (contornos) para el 20 de julio a las 06:00 UTC.

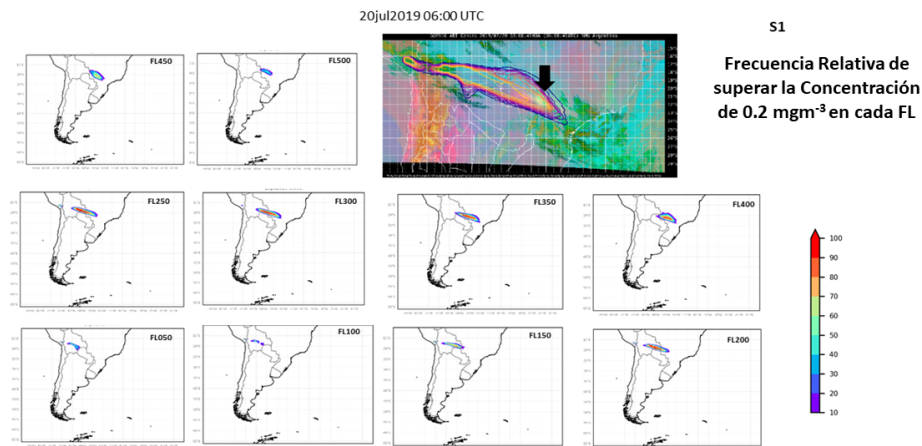


Fig. 4: Concentración de ceniza por nivel de vuelo para el 20 de julio a las 6:00 UTC.

de nubosidad meteorológica en la escena, por lo que los píxeles sin ceniza fueron sobreestimados en la observación.

De acuerdo al POD la media del ensamble tuvo buen desempeño en la detección de los píxeles con ceniza observados, aunque tuvo bastantes falsas alarmas de acuerdo al FAR y el BIAS es coherente con la sobreestimación de la pluma. Esto en parte puede ser explicado por la resolución gruesa de la retícula utilizada que generó plumas más anchas que lo observado. Al reducir la carga de masa media, el BIAS y el FAR mejoraron, reduciendo la sobreestimación y las



	Carga de masa media $\geq 0.1 \text{ g/m}^2$			Frecuencia relativa de carga de masa de superar $0.1 \text{ g/m}^2$
Simulación	POD (1)	FAR (0)	BIAS (1)	Brier Score (0)
1	1	0.89	8.73	0.37
0.1	0.98	0.83	5.91	0.13

Table 2: Índices de verificación categórica comparando la clasificación satelital de píxeles de ceniza y mixtos respecto de la carga de masa media original y aplicando un factor de reducción. Además se compara el ensamble S1 respecto de la misma clasificación satelital. Entre paréntesis se muestra el valor óptimo de cada índice.

falsas alarmas aunque comenzó a presentar algunas faltantes en la detección de acuerdo al POD. Por otro lado, se evaluó el resultado probabilístico de superar el umbral de  $0.1 \text{ g/m}^2$  respecto de la clasificación satelital calculando el índice Brier Score. Al analizar el ensamble respecto de la clasificación satelital mediante el Brier Score, se observa un buen desempeño del ensamble original y una mejora en el resultado al escalar el ensamble.

## 6 Conclusiones

La información QVA se encuentra en su etapa inicial, y el Servicio Meteorológico Nacional está avanzando para lograrlo. Será necesario mucho trabajo de coordinación entre los 9 VAACs para armonizar el producto final, así como también para avanzar en la implementación operativa completa, que contemplará todas las emisiones volcánicas incluyendo la removilización de ceniza depositada, que actualmente no se incluye. En esta primera etapa, el trabajo de colaboración entre los 9 VAACs en sus diferentes grupos de trabajo, operaciones MOG-IAVW de OACI, el grupo de modeladores de los VAAC y el apoyo del Grupo Asesor sobre Ciencias Volcánicas para Aplicaciones de la Organización Meteorológica Mundial y la Unión de Geofísicos y Geodestas, será fundamental para lograr un producto armónico y de calidad entre los diferentes VAACs.

El cambio de paradigma en la toma de decisión, que pasará del polígono actual a un volumen de información mucho mayor, será un gran desafío para la industria aeronáutica. Este cambio permitirá optimizar el uso del espacio aéreo en condiciones de baja concentración de ceniza, contando con la información de susceptibilidad de los motores de cada aeronave y la capacidad de integrar la información con el plan de vuelo.

La mejora continua de la información QVA vendrá de la mano con la generación de mejores prácticas de los VAACs, el desarrollo de metodologías estándares de verificación para asegurar la calidad del producto y la contribución de la ciencia en las operaciones.

## References

1. OACI, 2018. Anexo 3 al convenio sobre aviación civil internacional - Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional.
2. Clarkson, R. J., Majewicz, E. J., & Mack, P. (2016). A re-evaluation of the 2010 quantitative understanding of the effects volcanic ash has on gas turbine engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 230(12), 2274-2291.
3. Beckett, F. M., Witham, C. S., Leadbetter, S. J., Crocker, R., Webster, H. N., Hort, M. C., Jones A., Devenish, B., & Thomson, D. J. (2020). Atmospheric dispersion modelling at the London VAAC: A review of developments since the 2010 Eyjafjallajökull volcano ash cloud. *Atmosphere*, 11(4), 352.
4. Kristiansen, N. I., Stohl, A., Prata, A. J., Bukowiecki, N., Dacre, H., Eckhardt, S., Henne S., Hort M. C., Johnson B. T., Marenco F., Neininger B., Reitebuch O., Seibert P., Thomson D. J., Webster H. N. and Weinzierl, B. (2012). Performance assessment of a volcanic ash transport model mini-ensemble used for inverse modeling of the 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D20).
5. Dare, R. A., Smith, D. H., & Naughton, M. J. (2016). Ensemble prediction of the dispersion of volcanic ash from the 13 February 2014 eruption of Kelut, Indonesia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(1), 61-78.
6. Chai, T., Crawford, A., Stunder, B., Pavolonis, M. J., Draxler, R., & Stein, A. (2017). Improving volcanic ash predictions with the HYSPLIT dispersion model by assimilating MODIS satellite retrievals. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(4), 2865-2879.
7. Osore, S., Ruiz, J., Folch, A., & Collini, E. (2020). Volcanic ash forecast using ensemble-based data assimilation: an ensemble transform Kalman filter coupled with the FALL3D-7.2 model (ETKF-FALL3D version 1.0). *Geoscientific Model Development*, 13(1), 1-22.
8. OACI, 2024. Quantitative Volcanic Ash (QVA) Information.
9. Folch, A., Mingari, L., Gutierrez, N., Hanzich, M., Macedonio, G., & Costa, A. (2021). FALL3D-8.0: A computational model for atmospheric transport and deposition of particles, aerosols and radionuclides—Part 1: Model physics and numerics. *Geoscientific Model Development*, 13(3), 1431-1458.
10. Pfeiffer, T., Costa, A., & Macedonio, G. (2005). A model for the numerical simulation of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140(4), 273-294.
11. Beckett, F. M., Bensimon, D., Crawford, A., Deslandes, M., Guidard, V., Hort, M. C., Jeoffrion, M., Kristiansen, N., Lucas, C., Nishijo, A., Osore, S., Renard, E., Servranckx, G., Snee, E., Trancoso, R., & Vazquez, E. (2024). VAAC Model Setup Tables 2023. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10671098>
12. Osore, M. S. (2017). Evaluación de estrategias para el pronóstico numérico por ensambles de dispersión de ceniza volcánica en Sudamérica. (Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.). Recuperado de [https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis\\_n6378-Osore](https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6378-Osore).
13. Rodriguez. D., L. Vidal y S. Osore, 2021: Algoritmo de identificación de nubes de ceniza volcánica en imágenes satelitales - Parte 1: sensor VIIRS. Nota Técnica SMN 2021-116.