

# Análisis Espacial de la Dispersión de Ceniza Volcánica del Popocatepetl: Estimación de Probabilidades y Áreas de Influencia en un Contexto de Riesgo<sup>☆</sup>

## Spatial analysis of volcanic ash dispersion from Popocatepetl: probability estimation and influence area mapping in a risk context

José Agustín García Reynoso<sup>\*a</sup>, Bertha Mar Morales<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad de México, México

### Resumen

Se presentan mapas de probabilidad de depósito y tiempo de arribo de ceniza volcánica en superficie, herramientas clave para la gestión del riesgo volcánico en el Popocatepetl. Estos mapas se generaron a partir de pronósticos de dispersión de ceniza con Fall3D entre 2017 y 2022, considerando erupciones hipotéticas de 3, 5 y 10 km de altura, con una duración de una hora y una simulación de dispersión de nueve horas. Utilizando el código Hazardmaps, se estimó la probabilidad de depósito  $\geq 100 \text{ g/m}^2$  y su tiempo de arribo, visualizados mediante ArcGIS a partir de archivos NetCDF. Los mapas cubren un área de 400 x 400 km alrededor del cráter, excluyendo depósitos fuera de esta región. Las probabilidades mostradas son  $\geq 2 \%$ . Este estudio representa el análisis más exhaustivo realizado para la región, incorporando múltiples condiciones meteorológicas y escenarios de altura de columna eruptiva definidos a partir de la actividad eruptiva observada durante los últimos 30 años. Proporciona una descripción detallada de áreas de influencia de la ceniza volcánica no observadas previamente en campo, mejorando la comprensión del riesgo volcánico.

**Palabras clave:** Mapas de probabilidad, Tiempo de arribo, Dispersión de ceniza, Riesgo volcánico, Simulaciones, Popocatepetl

### Abstract

Maps of volcanic ash deposition probability and arrival time at the surface are presented, key tools for volcanic risk management at Popocatepetl. These maps were generated from Fall3D ash dispersion forecasts between 2017 and 2022, considering hypothetical eruptions of 3, 5 and 10 km height, with a duration of one hour and a dispersion simulation of nine hours. Using the Hazardmaps code, the probability of deposition  $\geq 100 \text{ g/m}^2$  and its arrival time were estimated, visualized using ArcGIS from NetCDF files. The maps cover an area of 400 x 400 km around the crater, excluding deposits outside this region. The probabilities shown are  $\geq 2\%$ . This study represents the most comprehensive analysis carried out for the region, incorporating multiple meteorological conditions and eruptive column height scenarios defined from observed eruptive activity over the past 30 years. It provides a detailed description of areas of volcanic ash influence not previously observed in the field, improving the understanding of volcanic risk.

**Keywords:** Probability maps, Arrival time, Ash dispersion, Volcanic risk, Simulations, Popocatepetl

## 1. Introducción

La evaluación del riesgo volcánico es un componente esencial para la toma de decisiones en regiones expuestas a actividad

volcánica (Alberico et al., 2011). Entre los fenómenos asociados a las erupciones del volcán Popocatepetl, la caída de ceniza representa una de las amenazas más extendidas y recurrentes, con impactos significativos en la salud humana, infraestructura, transporte y actividades económicas (Baxter et al., 2014; Martín-Del Pozzo & Nieto-Torres, 2024; Martín-Del Pozzo et al., 2008; Nieto-Torres & Martín-Del Pozzo, 2021; Phillips et al., 2019; Rivera-Tapia et al., 2006; Wilson et al., 2014). Para abordar esta problemática, el desarrollo de herramientas que permitan predecir y visualizar la dispersión de ceniza se con-

<sup>☆</sup> © J. A. García Reynoso and B. Mar Morales. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), which permits non-commercial sharing of the work and adaptations, provided the original work is properly cited and the new creations are licensed under identical terms.

\*E-mail address: [agustin@atmosfera.unam.mx](mailto:agustin@atmosfera.unam.mx)

vierte en una prioridad. En este contexto, presentamos mapas de probabilidad de depósito y tiempo de arribo de ceniza volcánica del volcán Popocatepetl, diseñados específicamente para apoyar a los tomadores de decisiones de la Ciudad de México en la gestión del riesgo.

Estos mapas se generaron a partir de pronósticos horarios de dispersión de ceniza (García-Reynoso et al., 2023) realizados entre 2017 y 2022, considerando escenarios hipotéticos de erupciones con alturas de columna eruptiva de 3, 5 y 10 km (seleccionadas a partir de eventos históricos de baja, media y alta intensidad), así como simulaciones de dispersión de hasta nueve horas. El procesamiento de datos incluyó la estimación de probabilidades de depósito  $\geq 100 \text{ g/m}^2$  mediante el código Hazardmaps (Bonasia et al., 2014), complementado con la generación de mapas en ArcGIS a partir de archivos netCDF (Rew & Davis, 1990).

Aunque los mapas tienen limitaciones inherentes, como su cobertura restringida a una región de  $400 \times 400 \text{ km}$  alrededor del cráter y la exclusión de probabilidades inferiores al 2 %, constituyen un avance significativo en la caracterización de áreas de influencia no observadas previamente en campo. Este estudio representa un análisis exhaustivo que integra datos de múltiples estaciones climáticas y diferentes condiciones eruptivas, proporcionando una descripción detallada del impacto potencial de eventos volcánicos en la región.

## 2. Área de estudio

El Popocatepetl (del Náhuatl “Cerro que humea”) es un volcán activo localizado en el centro de México, en las coordenadas  $19.0231^\circ \text{ N}$  y  $98.6246^\circ \text{ W}$ , con una altitud de 5,452 msnm. Se encuentra entre los estados de Puebla, Morelos y el Estado de México, a aproximadamente 60 km de la Ciudad de México, (Figura 1). La población expuesta a la ceniza volcánica en un radio de 70 km del volcán es de más de 16 millones de habitantes (INEGI, 2020). El dominio espacial utilizado en este estudio se encuentra entre las latitudes  $21.028^\circ \text{ N}$  y  $17.012^\circ \text{ N}$  y longitudes  $-100.628^\circ \text{ W}$  y  $-96.612^\circ \text{ W}$ .

## 3. Método

A partir de los archivos generados por el pronóstico de dispersión de cenizas volcánicas (García-Reynoso et al., 2023), empleando Fall3D (Folch et al., 2009) se obtuvieron 24 simulaciones diarias para diferentes alturas de emisión. Estas simulaciones abarcan un período de nueve horas tras una erupción de una hora de duración. Para calcular la probabilidad de depósito de ceniza, se utiliza el código Hazardmaps. Este software permite especificar un umbral de depósito, en este caso,  $100 \text{ g/m}^2$ , y evalúa las celdas del dominio de simulación donde dicho umbral es superado. En el caso de tiempo de arribo se obtiene el tiempo máximo de arribo para obtener el depósito especificado.

Para cada simulación, se identifican las celdas donde el valor de 50, 100, 500, 1000 y  $5000 \text{ g/m}^2$  es excedido, en este trabajo solo se presentan las de  $100 \text{ g/m}^2$ . Al finalizar el análisis de

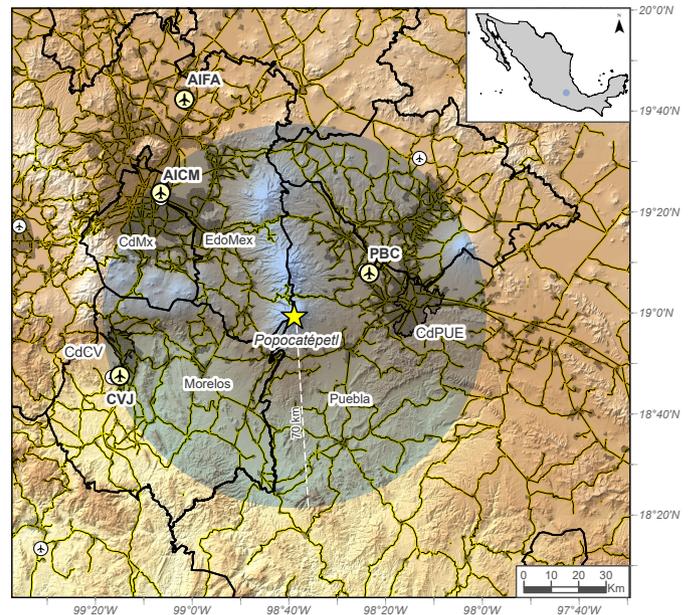


Figura 1: Área de Estudio. Ubicación del volcán Popocatepetl, Ciudad de México (CdMx), Ciudad de Puebla (CdPUE) y Ciudad de Cuernavaca (CdCV) (sombreado en gris). Se muestran algunos de los aeropuertos más importantes que rodean al volcán Popocatepetl: el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM, a 65 km), el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA, a 90 km), el Aeropuerto de la Ciudad de Cuernavaca (CVJ, a 70 km) y el Aeropuerto Internacional de Puebla (PBC, a 30 km). Las líneas gruesas negras representan la división estatal y las líneas negras con amarillo las carreteras. Figure 1. Study Area. Location of Popocatepetl Volcano, Mexico City (CdMx), Puebla City (CdPue) and Cuernavaca City (CdCV) (shaded in grey). Some of the most important airports surrounding Popocatepetl Volcano are shown: Mexico City International Airport (AICM, 65 km), Felipe Ángeles International Airport (AIFA, 90 km), Cuernavaca City Airport (CVJ, 70 km) and Puebla International Airport (PBC, 30 km). The thick black lines represent state boundaries, and the black-and-yellow lines represent roads.

las 720 simulaciones mensuales, se obtiene el número de veces que cada celda supera el umbral especificado. A partir del valor total de simulaciones se obtiene el porcentaje de veces que el umbral es superado en cada celda. Este valor se interpreta como la probabilidad de depósito de ceniza en dicha celda.

La visualización y análisis de los resultados generados por el código Hazardmaps (con un dominio de  $100 \times 100$  celdas, aproximadamente de 4 km por celda) se realizan utilizando el software GIS ESRI ArcGIS Pro. El proceso comienza leyendo los archivos en formato NetCDF, con los cuales se genera una tabla que incluye las coordenadas geográficas (LAT, LONG) y la información correspondiente al tiempo de arribo para obtener el umbral de depósito y la probabilidad de depósito de ceniza por celda de simulación. Para cada altura de erupción, se consideran aproximadamente 52,590 simulaciones. Posteriormente, se utiliza la herramienta de geoprocésamiento Empirical Baye-

sian Kriging (EBK) para interpolar los datos y generar una superficie continua que represente la distribución espacial de las variables a desplegar.

## 4. Resultados

### 4.1. Mapas del tiempo de arribo y de la probabilidad de depósito de cenizas del Volcán Popocatepetl, México

La figura 2 incluye diversos mapas que muestran la probabilidad de depósito de  $\geq 100 \text{ g/m}^2$  de ceniza y los tiempos de llegada para tres posibles alturas de la columna eruptiva: a) y b) 3 km, c) y d) 5 km, y e) y f) 10 km. Estos mapas se generaron a partir de las simulaciones realizadas durante el período comprendido entre 2017 y 2022, considerando aproximadamente 52,596 simulaciones por cada altura de columna eruptiva.

Además, se integraron capas geográficas complementarias para contextualizar y analizar el impacto potencial en la población y la infraestructura. Estas capas incluyen:

- La **capa de población** correspondiente a los AGEB's urbanos (INEGI, 2020), que permite identificar geográficamente la ubicación de las zonas pobladas en riesgo.
- La **capa de red de carreteras** (INEGI, 2022), útil para evaluar el impacto en las vías de comunicación.
- La **capa de terreno** proporcionada por ESRI, empleada como mapa base para mejorar la interpretación espacial de los resultados.

## 5. Conclusiones

A partir del pronóstico de dispersión de cenizas y el análisis realizado con el código Hazardmaps, se generaron mapas (Ver Lámina) que permiten evaluar el riesgo asociado a la caída de ceniza volcánica para diferentes escenarios eruptivos. Estos mapas representan la probabilidad de depósito de  $\geq 100 \text{ g/m}^2$  de ceniza y los tiempos de arribo para columnas eruptivas de 3 km, 5 km y 10 km de altura, abarcando un período de simulación de 2017 a 2022. A continuación, se destacan las principales conclusiones derivadas de este trabajo:

- **Evaluación probabilística del peligro:** Los mapas de probabilidad de depósito de ceniza proporcionan una herramienta valiosa para identificar las áreas geográficas más susceptibles a recibir acumulaciones significativas de ceniza ( $\geq 100 \text{ g/m}^2$ ). Este umbral es particularmente relevante debido a su potencial impacto en infraestructuras, salud humana y actividades económicas.
- **Impacto de la altura de la columna eruptiva:** Los resultados muestran cómo la altura de la columna eruptiva influye directamente en la dispersión de cenizas. Las columnas más altas (10 km) presentan una mayor cobertura espacial y mayores probabilidades de depósito en regiones más alejadas del volcán, mientras que las columnas más

bajas (3 km) concentran los depósitos en áreas cercanas al cráter.

- **Integración de capas geográficas complementarias:** La incorporación de capas como la población urbana (AGEB's), la red de carreteras (RNC) y el mapa base de terreno (ESRI) permite contextualizar los resultados y priorizar zonas críticas. Esto facilita la identificación de áreas pobladas en riesgo, así como la evaluación del impacto en infraestructuras clave, como vías de comunicación.
- **Utilidad para la gestión del riesgo volcánico:** Los mapas generados constituyen una herramienta esencial para la toma de decisiones en la gestión del riesgo volcánico. Proporcionan información detallada sobre las áreas más vulnerables y los tiempos de arribo de las cenizas, lo que puede ser utilizado para diseñar planes de contingencia, evacuación y mitigación de impactos socioeconómicos.
- **Base para futuros estudios:** El análisis realizado con Hazardmaps y las simulaciones de dispersión de cenizas sientan las bases para estudios más avanzados. Futuras investigaciones podrían incluir la evaluación de concentraciones a nivel de vuelo ( $2 \text{ mg/m}^3$ ) y a nivel de superficie, la incorporación de datos meteorológicos en tiempo real y la modelización de escenarios eruptivos más complejos.

En resumen, este estudio subraya la importancia de integrar modelos de dispersión de cenizas, análisis probabilísticos y datos geográficos para mejorar la comprensión y gestión de los riesgos asociados a las erupciones volcánicas. Los resultados obtenidos son un recurso clave para autoridades, planificadores y comunidades en la preparación ante posibles eventos eruptivos.

## Software

Los mapas presentados fueron creados con el software ESRI ArcGIS Pro v.3.3.2. Se emplea el código en fortran Hazardmaps (Bonasia et al., 2014) para la obtención de probabilidades de depósito, tiempos de arribo y fue proporcionado por Arnau Folch del Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona.

## Datos

La información utilizada para la elaboración de los mapas proviene de simulaciones obtenidas mediante un pronóstico de dispersión de ceniza, que integra el modelo meteorológico Weather Research Forecast (WRF) (Skamarock et al., 2019) y el modelo FALL3D (v.7.1), diseñado específicamente para simular el transporte y depósito de ceniza volcánica. El sistema de pronóstico empleando el FALL3D para el caso específico del volcán Popocatepetl, ha sido documentado en estudios previos García-Reynoso et al. (2023, 2019)

El análisis consideró tres escenarios eruptivos hipotéticos con alturas de columna de 3 km, 5 km y 10 km sobre el nivel

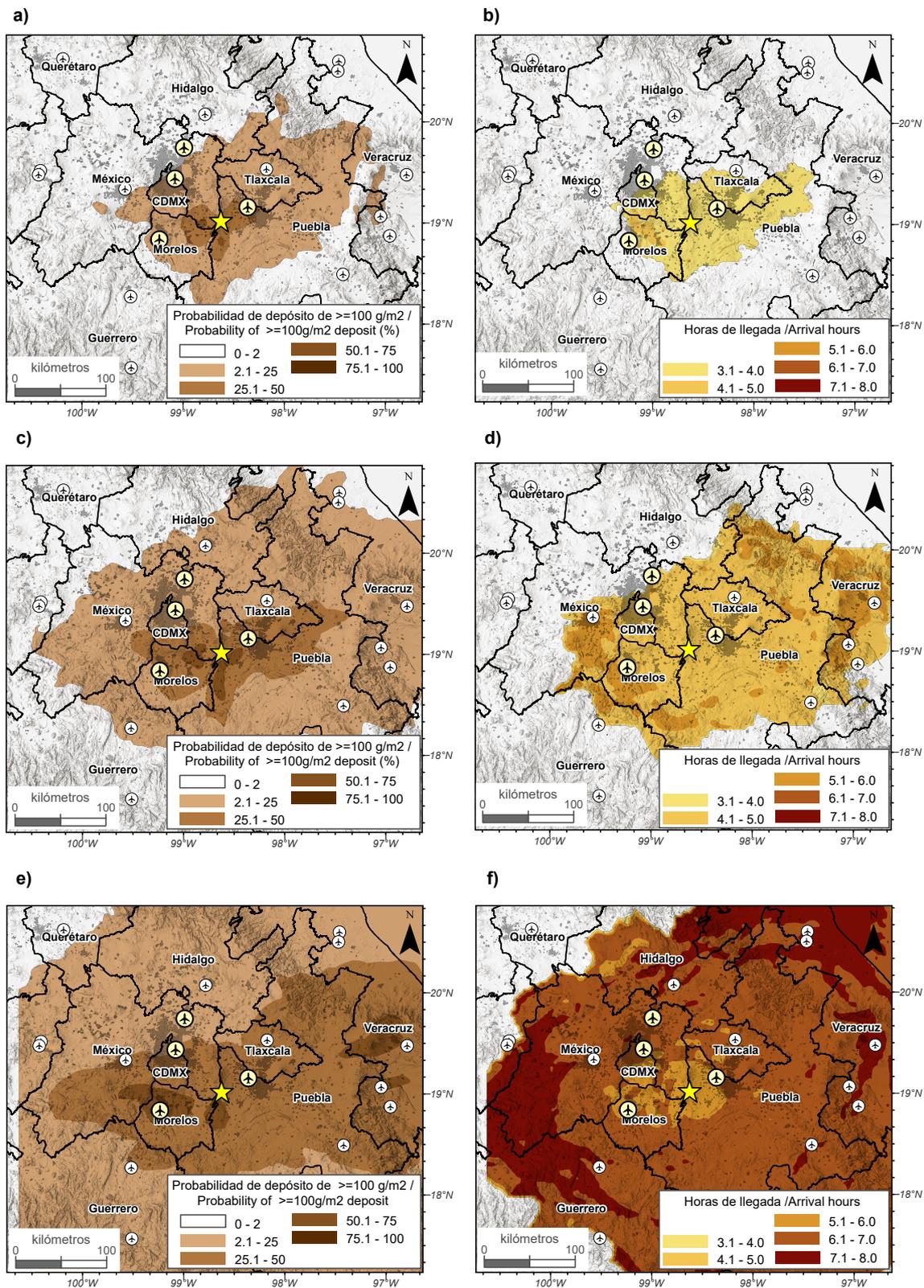
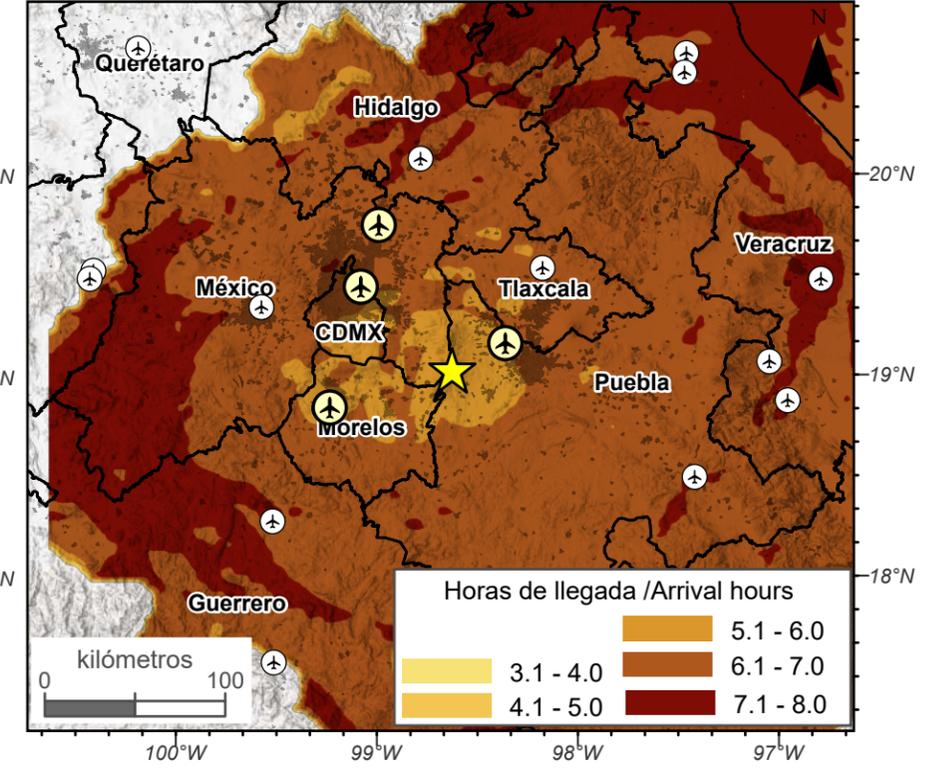
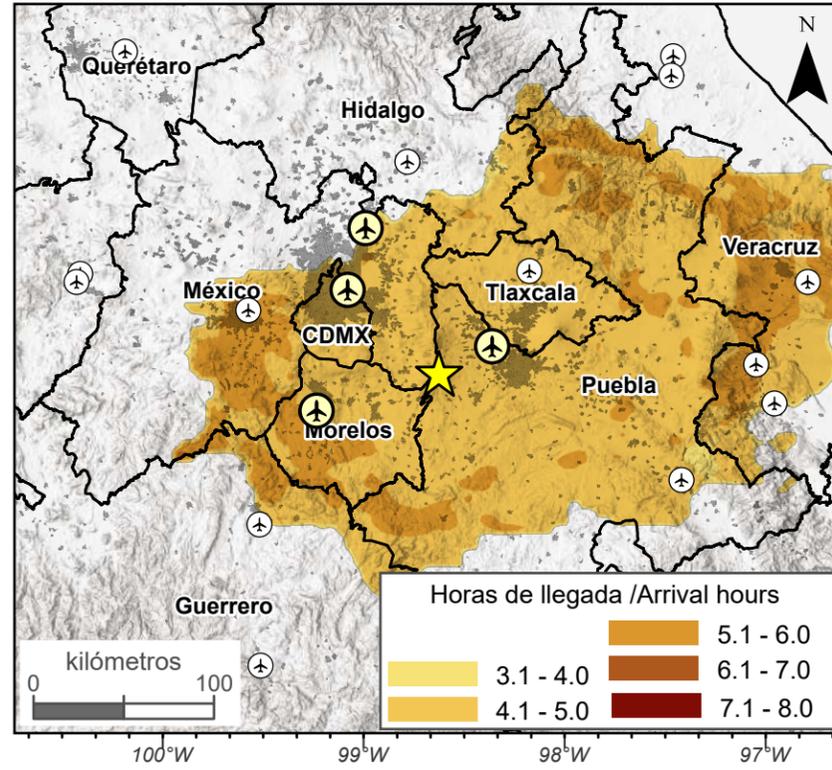
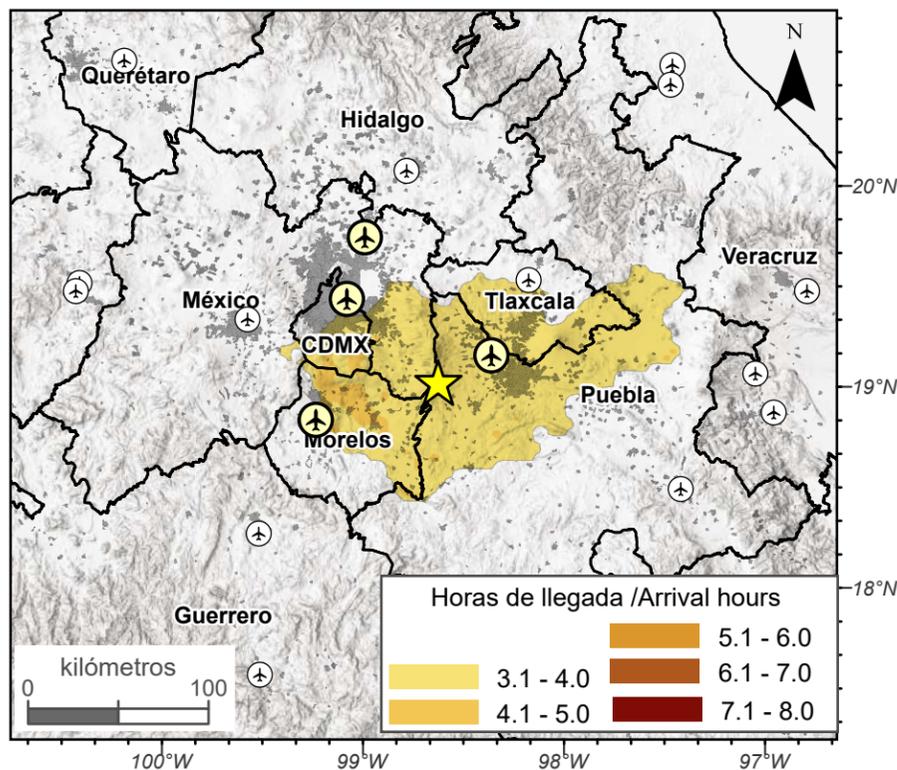
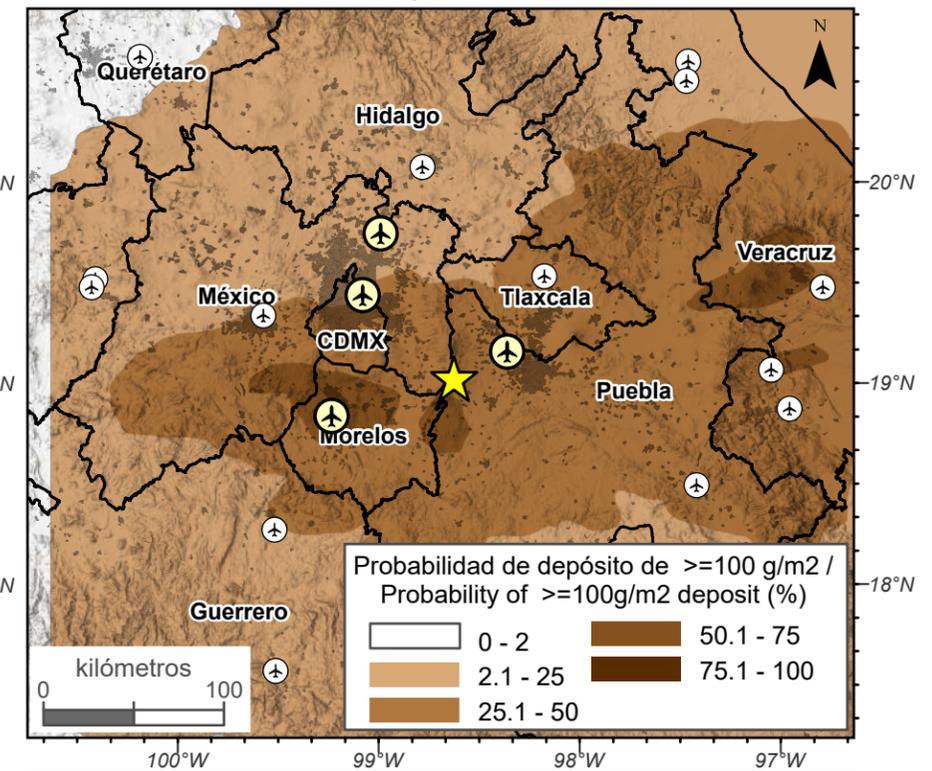
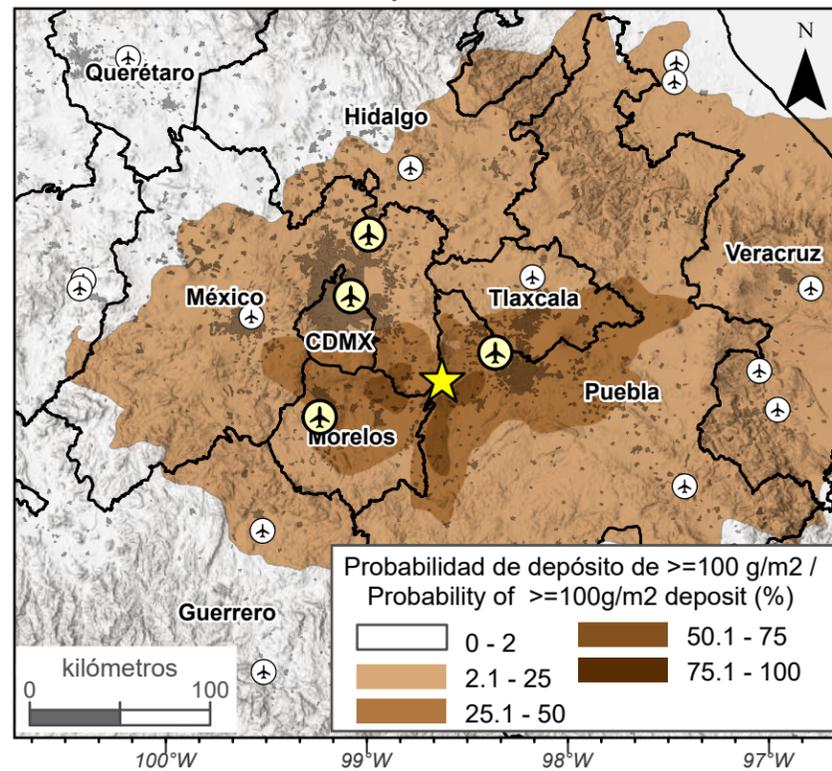
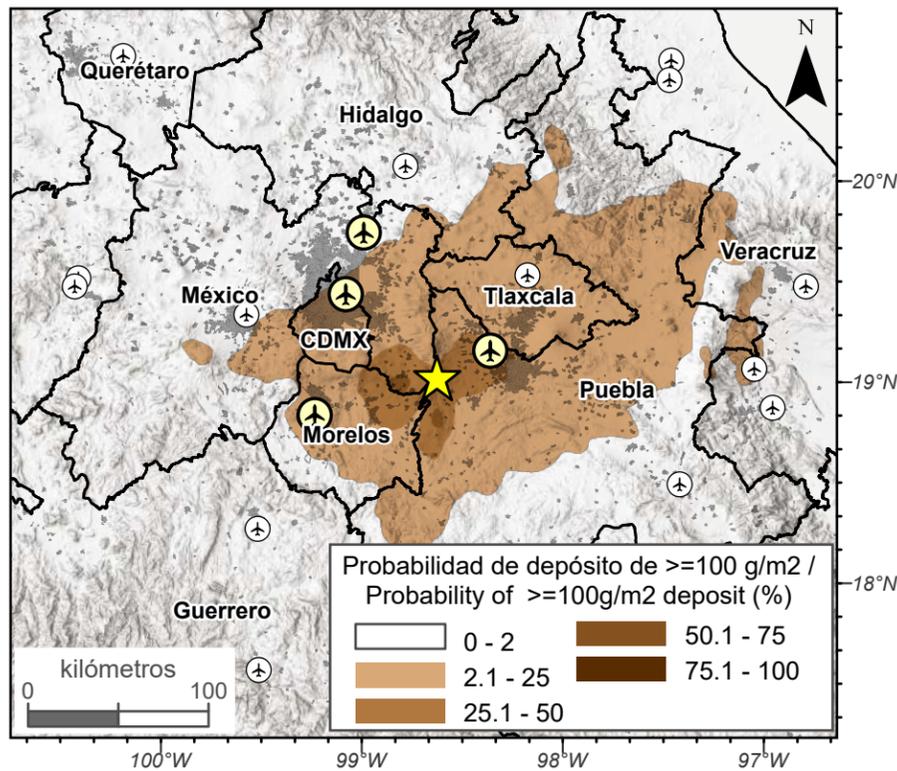


Figura 2. Probabilidad de depósito de  $\geq 100 \text{ g/m}^2$  de ceniza y los tiempos de llegada para tres posibles alturas de la columna eruptiva: a) y b) 3 km , c) y d) 5 km , e) y f) 10 km. / Figure 2. Deposit Probability of  $\geq 100 \text{ g/m}^2$  of ash and arrival times for three possible heights of the eruptive column: a) and b) 3km, c) and d) 5 km and e) and f) 10 km.

**a) 3km**

**b) 5km**

**c) 10km**



Probabilidad de depósito de  $\geq 100 \text{ g/m}^2$  y llegada de ceniza para tres posibles alturas de la columna eruptiva/Probability of  $\geq 100 \text{ g/m}^2$  ash deposition and arrival times for three possible heights of the eruptive column:  
a) 3km, b) 5km y c) 10km

- ★ Volcán Popocatepetl/Popocatepetl Volcano
- ✈ Aeropuertos Principales/Main Airports
- ✈ Aeropuertos, Helipuertos y Aeródromos/Airports, Heliports and Airfields
- Población Urbana/Urban Population (INEGI, 2020)
- Límite Estatal/State Limit
- Radio de 70 km/Radius of 70 km

DATUM WGS 1984  
Scale: 1:4,000,000  
Terrain Elevation, ESRI  
Software: ESRI, ArcGIS Pro 3.4.2

del cráter, cada uno con una duración de erupción de una hora. La dispersión de ceniza se simuló durante ocho horas de transporte atmosférico para cada escenario. Se analizaron un total de 157,788 archivos de salida que contienen los resultados de depósito y transporte de ceniza para el período evaluado de seis años.

## Agradecimientos

Este trabajo contó con el apoyo parcial del programa PAPIIT-UNAM, a través del proyecto «Evolución de la actividad reciente del volcán Popocatepetl: Comportamiento e impacto» (código BG101023). Se agradece a la Unidad de Cómputo y Supercómputo del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático por el apoyo técnico en el acceso y análisis de la información del pronóstico de dispersión de cenizas.

## Referencias

- Alberico, I., Petrosino, P., Lirer, L., 2011. Volcanic hazard and risk assessment in a multi-source volcanic area: the example of Napoli city (Southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11 (4), 1057–1070, <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1057-2011>.
- Baxter, P. J., Searl, A. S., Cowie, H. A., Jarvis, D., Horwell, C. J., 2014. Evaluating the respiratory health risks of volcanic ash at the eruption of the Soufrière Hills Volcano, Montserrat, 1995 to 2010. *Geological Society Memoirs* 39 (1), 407–425, <https://doi.org/10.1144/M39.22>.
- Bonasia, R., Scaini, C., Capra, L., Nathenson, M., Siebe, C., Arana-Salinas, L., Folch, A., 2014. Long-range hazard assessment of volcanic ash dispersal for a Plinian eruptive scenario at Popocatepetl volcano (Mexico): implications for civil aviation safety. *Bulletin of Volcanology* 76 (1), 789, <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0789-z>.
- Folch, A., Costa, A., Macedonio, G., 2009. FALL3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. *Computers and Geosciences* 35 (6), 1334–1342, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.08.008>.
- García-Reynoso, A., Zavala-Hidalgo, J., Delgado-Granados, H., García-Escalante, J., Gómez-Ramos, O., Herrera-Moro, D., 2023. An automated ash dispersion forecast system: case study Popocatepetl volcano, Mexico. *Journal of Applied Volcanology* 12 (9), <https://doi.org/10.1186/s13617-023-00135-4>.
- García-Reynoso, A., Zavala-Hidalgo, J., Delgado-Granados, H., Herrera-Moro, D. R., 2019. The Use of HPC on Volcanic Tephra Dispersion Operational Forecast System. En: Torres, M., Klapp, J., Gitler, I., Tcherykh, A. (Eds.), *Supercomputing*. Springer International Publishing, pp. 110–117, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-10448-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10448-1_10).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2020. Marco Geostadístico. Censo de Población y Vivienda 2020. [Archivo shapefile] <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807469>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2022. Red Nacional de Caminos RNC. [Archivo shapefile] <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770558>.
- Martin-Del Pozzo, A. L., González-Morán, T., Espinasa-Pereña, R., Butron, M. A., Reyes, M., 2008. Characterization of the recent ash emissions at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170 (1-2), 61–75, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.09.004>.
- Martin-Del Pozzo, A. L., Nieto-Torres, A., 2024. Ashfall characteristics and development of the ash monitoring network during three decades of the long-lived eruption of Popocatepetl Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 454, 108176, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108176>.
- Nieto-Torres, A., Martin-Del Pozzo, A. L., 2021. Ash emission from a long-lived eruption at Popocatepetl volcano and mapped respiratory effects. *Bulletin of Volcanology* 83 (68), <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01490-z>.
- Phillips, J., Barclay, J., Pyle, D., Armijos, T., Hicks, A., Few, R., 2019. Dynamic and extensive risk arising from volcanic ash impacts on agriculture. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR 2019)*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- Rew, R., Davis, G., 1990. NetCDF: an interface for scientific data access. *IEEE Computer Graphics and Applications* 10 (4), 76–82, <https://doi.org/10.1109/38.56302>.
- Rivera-Tapia, A., Yáñez-Santos, A., Cedillo-Ramírez, L., 2005. Emisión de ceniza volcánica y sus efectos. *Ecosistemas* 14 (3), 107–115.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., Huang, X.-Y., 2019. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. National Center for Atmospheric Research.
- Wilson, G., Wilson, T. M., Deligne, N. I., Cole, J. W., 2014. Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 286, 148–182, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>.

### This article accompanies the following material:

Static map: [10.22201/igg.25940694e.2025.1.125.28](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2025.1.125.28)