

# Construcción de mapas calibrados de probabilidad de inundación de corrientes de densidad piroclástica para el Complejo Volcánico San Salvador, El Salvador

Alvaro Aravena<sup>1</sup>, Raffaello Cioni<sup>2</sup>, Andrea Bevilacqua<sup>3</sup>, Augusto Neri<sup>3</sup>, Dolores Ferrés<sup>4</sup>, Demetrio Escobar<sup>5</sup> y Alessandro Aiuppa<sup>6</sup>

1 Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Católica del Maule, Talca, Chile.

2 Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli studi di Firenze, Florencia, Italia.

3 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa, Pisa, Italia.

4 Centro de Geociencias, UNAM, Ciudad de México, México.

5 Dirección del Observatorio Ambiental, MARN, San Salvador, El Salvador.

6 Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Università degli studi di Palermo, Palermo, Italia.

Palabras clave: flujos piroclásticos, modelación numérica, mapas de peligros volcánicos

Presentamos una evaluación probabilística de los peligros volcánicos asociados a corrientes de densidad piroclástica (CDP) en el Complejo Volcánico San Salvador (CVSS). Este campo volcánico se compone por el estratovolcán El Boquerón (VB) y al menos 25 volcanes monogenéticos ubicados en los alrededores de San Salvador, capital de El Salvador. En particular, definimos un conjunto de escenarios eruptivos, incluyendo desde eventos de pequeña escala con una incerteza significativa en la posición del centro de emisión hasta eventos de alta intensidad alimentados desde el cono central (i.e. VB). En el primer caso, adoptamos mapas ya publicados de probabilidad de apertura de nuevos centros eruptivos para la construcción de los mapas de peligro. La metodología adoptada se basa fundamentalmente en la modelación numérica. Específicamente, los modelos utilizados son las versiones con ramificación del cono de energía (ECMapProb) y del box model (BoxMapProb). Estos modelos permiten describir el área de inundación de CDPs friccionales e inerciales, respectivamente, considerando la ocurrencia de procesos de canalización de material piroclástico. Las condiciones de entrada adoptadas en nuestras simulaciones derivan de la aplicación de estrategias de calibración reproducibles que consideran información volcanológica (e.g. distancia de runout o área de inundación) de eventos de referencia para cada escenario eruptivo.

Los resultados muestran que CDPs de gran escala, como aquellas asociadas al evento formador de caldera G-1, presentan altas probabilidades condicionales de invadir parcialmente la ciudad de

San Salvador (10 a 70% de probabilidad de invasión al interior de la ciudad, en función de la posición). Es importante destacar, sin embargo, que la probabilidad de ocurrencia de este escenario eruptivo es extremadamente baja. Respecto a CDPs generados por el colapso parcial de columnas eruptivas durante eventos sub-Plinianos (e.g. Talpetate-I), las máximas probabilidades de inundación se obtienen en los flancos norte, oeste y sur del volcán. El Cerro El Picacho, que corresponde a un alto topográfico ubicado en el flanco este del VB, muestra un importante efecto de escudo en la propagación de este tipo de CDPs, produciendo bajas probabilidades de inundación en San Salvador. Finalmente, respecto a erupciones de flanco capaces de producir CDPs de pequeña escala, el acoplamiento de mapas de probabilidad de apertura de nuevos centros eruptivos con el modelamiento numérico de CDPs da lugar a probabilidades de inundación máximas en el flanco noroeste del volcán, alcanzando valores de hasta 10%.

## INTRODUCCIÓN

La evaluación de peligros volcánicos permite generar información fundamental para el diseño de medidas efectivas de reducción del riesgo asociado. El desarrollo de este tipo de estudios requiere del análisis de la historia eruptiva del sistema volcánico de interés, lo que permite definir los escenarios que las comunidades probablemente enfrentarán en el futuro y los peligros que se derivan (e.g. Cioni et al., 2008). Este tipo de información ha sido integrada frecuentemente con simulaciones numéricas para definir el impacto esperado de futuras erupciones. En

efecto, se han presentado evaluaciones de peligro volcánico basadas en modelación numérica para un gran número de volcanes en el mundo, incluyendo Vesubio (Italia; Macedonio et al., 2008), Campos Flegreos (Italia; Orsi et al., 2004; Bevilacqua et al., 2017), El Misti (Perú; Sandri et al., 2014), y Cotopaxi (Ecuador; Pistolesi et al., 2014). En el caso específico del Complejo Volcánico San Salvador (CVSS), que representa el foco de este estudio, actualmente no se dispone en la literatura de una evaluación probabilística del peligro volcánico, aun cuando se han desarrollado numerosos estudios abordando su evolución e historia eruptiva.

Fairbrother et al. (1978) estudió la evolución del CVSS a través del análisis de la geoquímica y petrología de flujos de lava. Sofield (1998) estudió la estratigrafía e historia eruptiva del CVSS con énfasis en las erupciones de flanco, y cuantificó la recurrencia asociada a estos eventos. Major et al. (2001) describieron los principales peligros que podrían afectar a las comunidades que circundan el CVSS y presentó mapas de peligro determinísticos para eventos alimentados desde el cono central (i.e. VB). En la misma línea, Sofield (2004) definió cinco escenarios eruptivos para el CVSS incluyendo eventos alimentados tanto desde el VB como desde los flancos. Ferrés et al. (2011) estudiaron la estratigrafía de los últimos 3,000 años sobre la base de excavaciones arqueológicas del sitio El Cambio. Ferrés et al. (2013) revisaron la estratigrafía e historia eruptiva del CVSS, definiendo tres escenarios eruptivos para el cono central y presentando mapas determinísticos de peligros, incluyendo aquellos asociados a corrientes de densidad piroclástica (CDP). Finalmente, Bevilacqua et al. (2021) presentaron mapas temáticos de apertura de nuevos centros eruptivos para distintos fenómenos volcánicos en el CVSS, enfocándose en aquellos procesos cuya probabilidad de ocurrencia se distribuye sobre una porción significativa del campo volcánico (e.g. flujos de lava, CDPs de pequeña escala, y depósitos de caída de pequeña escala). Los eventos de mayor intensidad, capaces de producir CDPs y depósitos de caída de gran volumen y que también se encuentran presentes en el registro geológico del CVSS, han sido alimentados exclusivamente desde el cráter central en el pasado, por lo que la construcción de mapas de apertura de nuevos centros eruptivos no

se consideró relevante para tales escenarios (Bevilacqua et al., 2021). Diferentes autores han mencionado la importancia crítica de las erupciones de flanco en el CVSS. Esto se debe a la alta y creciente densidad poblacional que presentan los flancos del VB y a la recurrencia de este tipo de eventos (Sofield, 2004; Ferrés et al., 2011). Apesar de esto, casi todos los estudios de evaluación del peligro volcánico se han enfocado en eventos alimentados desde el cono central (Sofield, 2004; Ferrés et al., 2013), con la única excepción de Bevilacqua et al. (2021). Sin embargo, dado que el propósito de Bevilacqua et al. (2021) fue mostrar el efecto crítico que tiene el uso de mapas temáticos de probabilidad de apertura de nuevos centros eruptivos, los autores impusieron de forma determinística las condiciones de formación de las CDPs modeladas.

En este contexto, en este estudio presentamos una evaluación probabilística de los peligros volcánicos asociados a CDPs en el CVSS, considerando erupciones alimentadas desde el cráter central y eventos generados en los flancos del volcán. En contraste con evaluaciones previas del peligro volcánico en el CVSS, en este estudio adoptamos un enfoque probabilístico que nos permite considerar la incerteza en las condiciones eruptivas y de generación de CDPs y una serie de estrategias de calibración para las entradas de los modelos empleados, que se basan en el registro volcanológico de algunos eventos de referencia.

## REGISTRO VOLCANOLÓGICO Y ESCENARIOS ERUPTIVOS

El CVSS (Pleistoceno-Holoceno, Figura 1) se ubica en la zona central de El Salvador y es considerado uno de los complejos volcánicos que conllevan mayor riesgo para la población en El Salvador y en América Central. Este campo volcánico, que es parte del Arco Volcánico de América Central (CAVA por su sigla en inglés), se compone de un estratovolcán central y al menos 25 edificios monogenéticos. Estos edificios monogenéticos incluyen cráteres de explosión, flujos de lava y conos de escoria, que se disponen preferencialmente a lo largo de dos sistemas de falla normales de rumbo NW (Figura 1).

Durante los últimos 3,000 años, el volcanismo en el CVSS se concentró en los flancos del volcán y en la

llanura adyacente, involucrando frecuentemente interacción con aguas freáticas. La mitad de los centros volcánicos monogenéticos formados durante este período son cráteres de explosión, conos de toba, anillos de toba o maars, mientras que el resto corresponde a conos de escoria, eventualmente con presencia de flujos de lava (Ferrés et al., 2011). Sofield (2004) estimó un período de recurrencia de alrededor de 133 años para las erupciones de flanco recientes. Respecto al volcanismo desde el cono central durante los últimos 3,000 años, se han reconocido tres eventos explosivos: Talpetate-I, Talpetate-II y la última erupción en AD 1917.

Sobre la base del registro eruptivo del CVSS, Sofield (2004) propuso cinco escenarios eruptivos: (1) erupciones magmáticas monogenéticas en los flancos del volcán (VEI 1-3), (2) erupciones hidromagmáticas en los flancos del volcán (VEI 1-3), (3) erupciones de pequeña escala en el cono central (VEI 1-3), (4) erupciones sub-Plinianas en el cono central (VEI 4-5) y (5) erupciones Plinianas en el cono central (VEI 6). Ferrés et al. (2013) usaron este esquema para crear

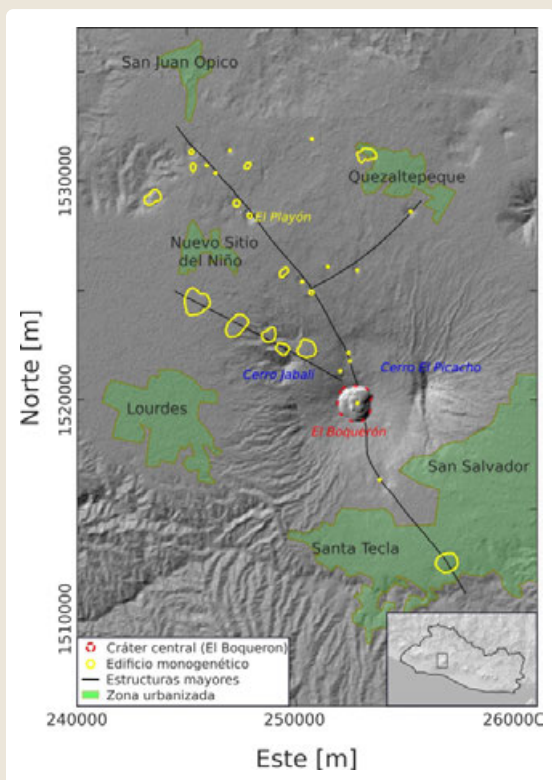
mapas determinísticos de peligro volcánico asociados a eventos alimentados desde el cráter central. En el presente trabajo, que complementa los resultados presentados por Ferrés et al. (2013) al considerar un enfoque probabilístico, se consideran tres escenarios para la generación de CDPs: (EE1) CDPs de pequeña escala derivados de erupciones monogenéticas, (EE2) CDPs de escala intermedia generados por el colapso parcial de columnas eruptivas durante eventos sub-Plinianos (referencia: Talpetate-I) y (EE3) CDPs de gran escala generados por el colapso de columnas eruptivas Plinianas (referencia: G-1).

## MÉTODOS

### 1. Escenario eruptivo Ee1

Para abordar CDPs de pequeña escala (i.e. EE1), adoptamos el modelo ramificado del cono de energía (Aravena et al., 2020). Esto se debe a que se espera que tales CDPs sean fundamentalmente friccionales. Con el objetivo de extender el análisis presentado por Bevilacqua et al. (2021), en lugar de definir las entradas del modelo de manera determinística, seguimos una de las estrategias de calibración propuestas por Aravena et al. (2022) e implementadas en el programa EMapProb. Estas estrategias se basan en el registro geológico del sistema volcánico en estudio y permiten reducir los sesgos derivados de la definición arbitraria de las entradas de modelos numéricos. En particular, desarrollamos un conjunto de simulaciones de calibración con entradas variables dentro de rangos específicos, usando una posición de colapso fija situada en el sector de El Playón. Para cada una de estas simulaciones, EMapProb calcula la distancia de runout. Por otro lado, debido a la carencia de datos detallados sobre los depósitos de este tipo de eventos en el CVSS y considerando los valores típicos descritos en la literatura, asumimos que una distribución uniforme entre 1 y 3 km es capaz de describir el rango de distancias de runout asociado a este escenario eruptivo.

A partir de la información de las simulaciones de calibración, se extrajo una muestra de 10,000 conjuntos de parámetros de entrada de modo de reproducir la distribución preestablecida de distancias de runout. Por otro lado, para muestrear las posiciones de generación de las CDPs, utilizamos los mapas



► Fig. 1 – Mapa topográfico del Complejo Volcánico San Salvador (CVSS).

temáticos de apertura de nuevos centros eruptivos presentados por Bevilacqua et al. (2021). Acoplado ambos elementos, desarrollamos 10,000 simulaciones numéricas considerando la incerteza en la posición y las condiciones de formación de CDPs de pequeña escala en el CVSS. Los resultados son descritos en términos de probabilidad de inundación. Estos valores están naturalmente condicionados a la ocurrencia de este escenario eruptivo, sin asunciones relacionadas a la posición del centro eruptivo.

## 2. Escenarios eruptivos EE2 y EE3

Para abordar CDPs de mediana escala (i.e. EE2), utilizamos tanto la formulación ramificada del cono de energía como la formulación ramificada del box model. Esto se debe al eventual carácter transicional de este tipo de fenómenos. Por otro lado, utilizamos exclusivamente la formulación ramificada del box model para estudiar el escenario eruptivo EE3. En ambos casos, para calibrar los parámetros de entrada de los modelos, seguimos los procedimientos presentados por Aravena et al. (2022). En particular, en este estudio consideramos los depósitos de CDP de las erupciones Talpetate-I y G-1 para calibrar los escenarios eruptivos EE2 y EE3, respectivamente (Sofield, 2004).

En cada caso, desarrollamos un conjunto de simulaciones de calibración usando valores variables para todos (ECMapProb) o algunos (BoxMapProb) de los parámetros de entrada (Tabla 1), y una posición de colapso fija en la zona cratérica. En el caso de la formulación con ramificación del box model, se asumieron valores fijos para las entradas del modelo cuya variabilidad esperada es menos relevante en los resultados numéricos (Tabla 1). Las áreas de inundación de las simulaciones de calibración fueron comparadas con polígonos de inundación de referencia (i.e. Talpetate-I y G-1; Sofield, 2004). Esta comparación se realizó utilizando tres métricas: raíz cuadrada de la distancia cuadrada media entre los contornos de ambos polígonos (RMSD), distancia de Hausdorff (HD) e índice de Jaccard (JI). Estas métricas permiten cuantificar el grado de coincidencia entre las simulaciones de calibración y los eventos de referencia, siendo posible definir funciones de probabilidad para muestrear las entradas de los modelos (Aravena et al., 2022). Usando este procedimiento, para cada modelo y escenario, extrajimos tres conjuntos de 1,000

parámetros de entrada que fueron usados en un segundo conjunto de simulaciones con el objetivo de construir mapas de probabilidad de inundación calibrados. En cada mapa de inundación, los resultados se describen en términos de la probabilidad de invasión, calculada como la fracción de simulaciones que alcanzan cada píxel del mapa.

**Tabla 1** – Rangos de variación de los parámetros de entrada usados en las simulaciones de calibración. Más detalles se presentan en Aravena et al. (2022).

Cono de energía con ramificación		
Parámetro	EE1	EE2
Altura de colapso ( $H_{o,o}$ [m])	100 - 1000	100 - 2000
Pendiente de los conos de energía ( $\tan(\Phi)$ )	0.2 - 1.0	0.2 - 1.0

Box model con ramificación		
Parámetro	EE1	EE2
Volumen inicial ( $V_{o,o}$ [ $m^3$ ])	$10^5 - 10^{10}$	$10^6 - 10^{11}$
Concentración inicial ( $\Phi_{o,o}$ )	0.005 - 0.04	0.005 - 0.04
Número de Froude (Fr)	1.1	1.1
Velocidad de sedimentación ( $w_s$ [m/s])	0.3	0.3
Densidad de piroclastos ( $\rho_p$ [ $kg/m^3$ ])	1500	1500
Densidad del aire ( $\rho_a$ [ $kg/m^3$ ])	1.0	1.0

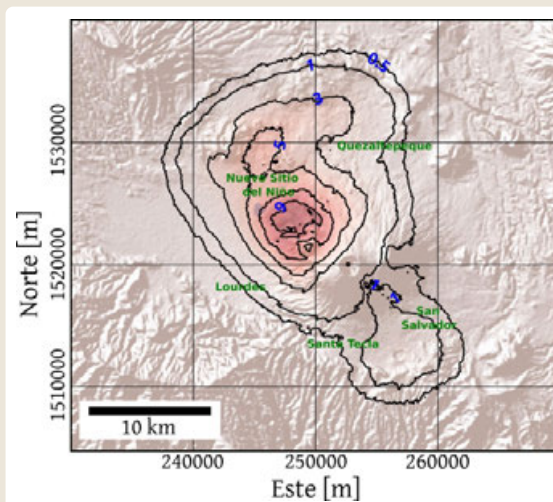
## Resultados

La Figura 2 muestra el mapa de inundación asociado a CDPs de pequeña escala producidos durante erupciones de flanco. La máxima probabilidad condicional de invasión se observa en el flanco noroeste del volcán, alcanzando valores máximos del orden de 10%, con valores no despreciables en la localidad de Nuevo Sitio del Niño (~5%). La

probabilidad de inundación en el área metropolitana de San Salvador es muy baja ( $<1\%$ ). Estas probabilidades de invasión son menores a las presentadas por Bevilacqua et al. (2021), lo que deriva del uso de estrategias distintas para fijar las entradas del modelo. Por un lado, Bevilacqua et al. (2021) impusieron las entradas del modelo de modo determinístico y, como mencionan los autores, sus resultados son válidos para un conjunto específico de condiciones de formación de CDPs. Por otro lado, en este trabajo hemos fijado las entradas del modelo de modo de reproducir una distribución específica de distancias de runout, permitiendo considerar condiciones variables de formación de las CDPs modeladas.

Respecto a CDPs similares a las producidas durante la erupción Talpetate-I (Figura 3), nuestros resultados muestran una dinámica de propagación de material piroclástico fuertemente controlada por la topografía proximal del volcán. La mayoría de las simulaciones solo alcanzan los flancos del volcán, mientras que una porción menor es capaz de invadir zonas periféricas de San Salvador y Santa Tecla, con probabilidades condiciones menores al 5%. En este caso, el efecto de escudo del Cerro El Picacho reduce significativamente la probabilidad de inundación en la capital de El Salvador.

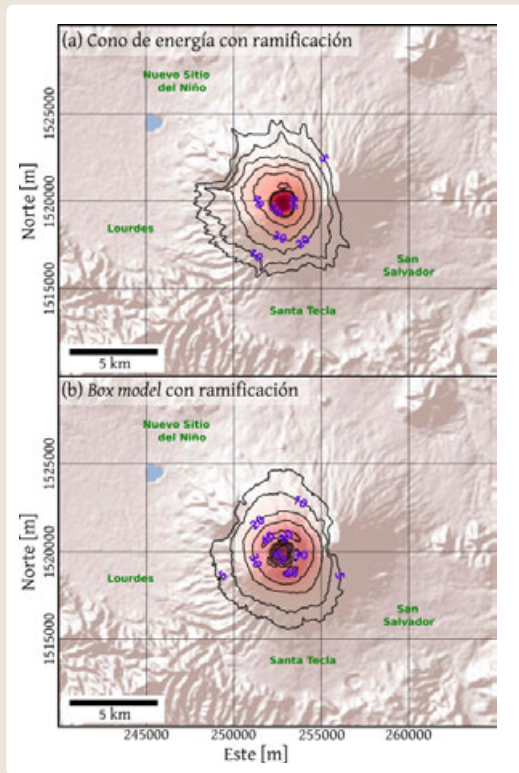
Finalmente, CDPs similares a aquellas generadas durante la erupción G-1 son capaces de invadir una porción significativa de los flancos del volcán y las llanuras cercanas, involucrando ciudades como San Salvador (10-70% de probabilidad condicional, en función de la calibración adoptada y la posición), Santa Tecla (20-70%), Quezaltenango (10-30%), Nuevo Sitio del Niño (10-30%), Lourdes (15-40%) y Apopa ( $<5-15\%$ ).



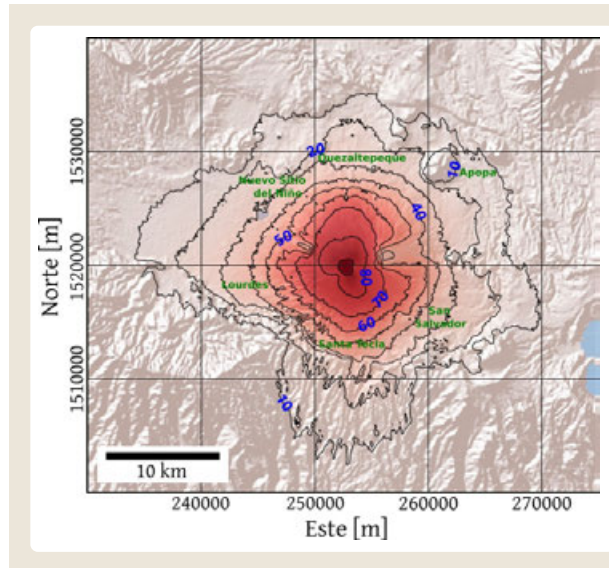
► Fig. 2 – Mapa probabilístico de inundación por CDPs, condicionado a la ocurrencia de CDPs de pequeña escala producto de erupciones de flanco en el CVSS (EE1).

## CONCLUSIONES

En este trabajo, hemos evaluado los peligros asociados a CDPs en el CVSS, El Salvador, considerando un conjunto adaptado de los escenarios eruptivos propuestos por Sofield (2004) y discutidos por Ferrés et al. (2013). Este trabajo, que se construyó sobre la base de resultados presentados en una serie de estudios previos (Sofield, 1998, 2004; Major et al., 2011; Ferrés et al., 2011, 2013; Bevilacqua et al., 2021), representa un paso crítico para robustecer nuestro conocimiento de este complejo volcánico, debido a que se incluye el análisis del peligro derivado de volcanismo monogenético, lo que es particularmente relevante en el CVSS (Sofield, 1998; 2004), y a que hemos adoptado un enfoque probabilístico que permite considerar adecuadamente la intrínseca variabilidad en las condiciones de formación de CDPs. Se sugiere que el refinamiento en la definición de los escenarios eruptivos esperables, la determinación de sus probabilidades de ocurrencia y el desarrollo de análisis de exposición al peligro y de susceptibilidad representan pasos críticos para caracterizar de mejor manera los riesgos que implica el CVSS para la población de San Salvador y sus alrededores.



► Fig.3 – Mapa probabilístico de inundación por CDPs condicionado a la ocurrencia de CDPs de escala mediana producto del colapso parcial de una columna eruptiva durante eventos sub-Plinianos en el VB (EE2; referencia: Talpetate-I). Esta figura muestra la media aritmética de los mapas obtenidos utilizando las distintas métricas de calibración con los dos modelos empleados en este trabajo.



► Fig.4 – Mapa probabilístico de inundación por CDPs condicionado a la ocurrencia de CDPs de gran escala producto del colapso de una columna eruptiva durante eventos Plinianos en el VB (EE3; referencia: G-1). Esta figura muestra la media aritmética de los mapas obtenidos utilizando las distintas métricas de calibración.

## REFERENCIAS

- Sabancaya et al. Aravena, A., Cioni, R., Bevilacqua, A., de' Michieli Vitturi, M., Esposti Ongaro, T., Neri, A. (2020). Tree-branching-based enhancement of kinetic energy models for reproducing channelization processes of pyroclastic density currents. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7), e2019JB019271.
- Aravena A., Bevilacqua A., de' Michieli Vitturi, M., Esposti Ongaro, T., Neri, A., Cioni R. (2022). Calibration strategies of PDC kinetic energy models and their application to the construction of hazard maps. *Bulletin of Volcanology* 84(3), 1-21.
- Bevilacqua, A., Neri, A., Bisson, M., Esposti Ongaro, T., Flandoli, F., Isaia, R., Rosi, M., Vitale, S. (2017). The effects of vent location, event scale, and time forecasts on pyroclastic density current hazard maps at Campi Flegrei caldera (Italy). *Frontiers in Earth Science*, 5, 72.
- Bevilacqua A., Aravena A., Neri A., Gutierrez, E., Escobar, D., Schliz, M., Aiuppa, A., Cioni, R. (2021). Thematic vent opening probability maps and hazard assessment of small-scale pyroclastic density currents in the San Salvador volcanic complex (El Salvador) and Nejapa-Chiltepe volcanic complex (Nicaragua). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 1639-1665.

- ▶ Cioni, R., Bertagnini, A., Santacroce, R., Andronico, D. (2008). Explosive activity and eruption scenarios at Somma-Vesuvius (Italy): towards a new classification scheme. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 331-346.
- ▶ Fairbrothers, G., Carr, M., Mayfield, D. (1978). Temporal magmatic variation at Boqueron volcano, El Salvador. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 67, 1-9.
- ▶ Ferrés, D., Granados, H., Hernández, W., Pullinger, C., Chávez, H., Castillo, C., Cañas-Diñarte, C. (2011). Three thousand years of flank and central vent eruptions of the San Salvador volcanic complex (El Salvador) and their effects on El Cambio archeological site: a review based on tephrostratigraphy. *Bulletin of Volcanology*, 73, 833-850.
- ▶ Ferrés, D., Granados, H., Gutiérrez, R., Farraz, I., Hernández, E., Pullinger, C., Escobar, C. (2013). Explosive volcanic history and hazard zonation maps of Boquerón Volcano (San Salvador volcanic complex, El Salvador). *Geological Society of America Special Papers*, 4, 201-230.
- ▶ Macedonio, G., Costa, A., Folch, A. (2008). Ash fallout scenarios at Vesuvius: numerical simulations and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 366-377.
- ▶ Major, J., Schilling, S., Sofield, D., Escobar, C., Pullinger, C. (2001). Volcano hazards in the San Salvador region, El Salvador. Open-file Report. U.S. Geological Survey, 366, 28.
- ▶ Orsi, G., Di Vito, M., Isaia, R. (2004). Volcanic hazard assessment at the restless Campi Flegrei caldera. *Bulletin of Volcanology*, 66, 514-530.
- ▶ Pistolesi, M., Cioni, R., Rosi, M., Aguilera, E. (2014). Lahar hazard assessment in the southern drainage system of Cotopaxi volcano, Ecuador: Results from multiscale lahar simulations. *Geomorphology*, 207, 51-63.
- ▶ Sandri, L., Thouret, J., Constantinescu, R., Biass, S. (2014). Long-term multi-hazard assessment for El Misti volcano (Peru). *Bulletin of Volcanology*, 76, 1-26.
- ▶ Sofield, D. (1998). History and Hazards of Volcán San Salvador, El Salvador (Doctoral dissertation, Michigan Technological University).
- ▶ Sofield, D. (2004). Eruptive history and volcanic hazards of Volcan San Salvador. *Natural Hazards in El Salvador*, 147.