



## Simulaciones de caída de tefra para el volcán Apoyeque aplicando el programa TephraProb.

Tephra fall simulations for Apoyeque volcano using TephraProb software.

Aldana González, Greyci<sup>1</sup> ✉

1. Instituto de Geología y Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, UNAN-Managua, Rotonda Universitaria Rigoberto López Pérez, 200 m al Este. Apartado postal: A-131\*

Recibido: 05/08/2023  
Aceptado: 25/09/2023  
© 2021-Revista Tierra (Earth Journal) IGG-CIGEO



Este trabajo está licenciado bajo una [Licencia Internacional Creative Commons 4.0 Atribución-NoComercial-CompartirIgual](#).

## Resumen

En este trabajo se desarrolla un análisis de peligro volcánico por caída de tefra en caso de erupciones Plinianas o Subplinianas en el volcán Apoyeque mediante análisis de escenarios eruptivos y modelación numérica. Los resultados indican una dispersión preferencial hacia el NE-SO, determinada por las direcciones predominantes de los vientos en la zona volcánica con erupciones de mayor duración que aumentan la probabilidad de acumulación de tefra en áreas proximales y la reducen en áreas distales. Un análisis cualitativo simple sugiere que los municipios de Mateare y Ciudad Sandino son los que tienen mayor probabilidad de sufrir impactos. Para la evaluación de peligro se hizo un análisis vulcanológico, recopilación de actividad eruptiva histórica y revisión de depósitos (bibliografía); analizando las características de caída y dispersión de tefra con el fin de evaluar los posibles escenarios y zonas de peligro. Para realizar este trabajo se ocupó el modelo TephraProb, una toolbox que se basa en el modelo numérico Tephra2, ingresando parámetros eruptivos de escenarios a modelar, para luego obtener resultados de acumulación probabilística de tefra de 10 kg/m<sup>2</sup>, 50 kg/m<sup>2</sup>, 100 kg/m<sup>2</sup> y 500 kg/m<sup>2</sup> presentados en mapas con isolíneas de probabilidad. El desarrollo de esta metodología y resultados expuestos en este trabajo son un recurso para la implementación de planes de emergencia volcánica en la zona de estudio.

**Palabras Claves:** Apoyeque, tefra, escenario eruptivo, modelación numérica, Isoprobabilidad.

## Abstract

This work develops an analysis of volcanic hazard due to tephra fall in the Apoyeque volcano through analysis of eruptive scenarios and numerical modeling. The results indicate a preferential dispersion towards the NE-SW, determined by the prevailing directions of the winds in the volcanic zone with longer duration eruptions that increase the probability of tephra accumulation in proximal areas and reduce it in distal areas. A simple qualitative analysis suggests that the municipalities of Mateare and Ciudad Sandino are the most likely to be impacted. For the hazard assessment, an analysis of volcanic geology, compilation of historical eruptive activity and review of deposits (bibliography) was made; analyzing the characteristics of tephra fall and dispersion in order to evaluate possible scenarios and danger zones. To carry out this work, the TephraProb model (Biass et al., 2016a) was used, a toolbox that is based on the Tephra2 numerical model (Bonadonna et al., 2005), entering eruptive parameters of scenarios to be modeled, to then obtain results of Probabilistic accumulation of tephra of 10 kg/m<sup>2</sup>, 50 kg/m<sup>2</sup>, 100 kg/m<sup>2</sup> and 500 kg/m<sup>2</sup> presented on maps with probability isolines. The development of this methodology and the results presented in this work are a resource for the implementation of volcanic emergency plans in the study area.

**Keywords:** Apoyeque, tephra, eruptive scenario, numerical modeling, Iso-probability.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las simulaciones de caída de tefra se basan en modelos numéricos cuyo propósito es predecir la zona potencialmente afectada por caída de tefra (ceniza) en una ventana de tiempo definida. Es importante aclarar que estas simulaciones conllevan grandes incertidumbres debido a la imposibilidad de predecir con precisión el comportamiento del volcán en el futuro y a las limitaciones de los modelos numéricos que no representan perfectamente el mundo real (Bonadonna y Houghton, 2005). Por lo tanto, si la actividad del volcán o las condiciones climáticas cambian durante la ventana de tiempo de la simulación, la caída de tefra puede ocurrir fuera de las zonas delineadas en el mapa. Sin embargo, existe una muy buena correlación entre los resultados de las simulaciones y la dirección real de las nubes de tefra, por lo que estas simulaciones pueden ser consideradas como una guía para las zonas potencialmente afectadas; es decir que la incertidumbre es resuelta al hacer análisis probabilístico con muchas simulaciones con distintas condiciones de viento (Barrantes et al., 2013), como se hizo para Apoyeque. Los resultados de las simulaciones son procesados en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Actualmente existen varios programas para simular la caída de tefra tales como: FALL3D (Fall3d, 2012) y TEPHRA (Connor, 1991), entre otros. Cada uno de ellos cuenta con diferentes niveles de complejidad (y por consiguiente de precisión) tanto en la cantidad de parámetros de entrada, como en la complejidad computacional inherente a cada programa (Scollo et al., 2008, como se citó en Barrantes et al., 2013).

La habilidad para simular y pronosticar la dispersión de la tefra en áreas

✉ [gdag82@hotmail.com](mailto:gdag82@hotmail.com)

expuestas a la actividad volcánica, está directamente vinculada a la calidad y cantidad de información previa del centro eruptivo que permita utilizar, en tiempo y forma, parámetros vulcanológicos (la distribución total del tamaño de grano, parámetros de forma, altura de columna, ritmo de descarga, estilo eruptivo, etc.) lo más ajustado posible a la erupción en cuestión, para lograr pronósticos lo más cerca de la realidad. Por otro lado, el estudio de erupciones pasadas es muy importante en la definición de escenarios debido a que provee una útil herramienta para la predicción de la acumulación esperable de tefra durante erupciones futuras, el proceso de acumulación de tefra deriva del modelo (Romero et al., 2015).

Además, esto mejora la evaluación del riesgo y el manejo de la crisis respecto al impacto en las poblaciones, el entorno, la aviación, la salud y el medioambiente, y provee una buena guía para la implementación de medidas de mitigación y el manejo del uso del suelo a largo plazo (Komorowski et al., 2008, como se citó en Romero et al., 2015). Esta investigación se hizo en el marco del Proyecto RIESCA (Proyecto Regional de Formación aplicada a los escenarios de Riesgos con la medición y monitoreo de los fenómenos volcánicos, sísmicos y geohidrológicos en Centro América), auspiciado por la Agencia Italiana de Cooperación para el Desarrollo.

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO

El frente volcánico NW-SE de Nicaragua se divide en un segmento occidental y otro oriental separados por 20 km de desplazamiento N-S. El complejo volcánico Chiltepe se encuentra en el extremo oriental del segmento occidental y en el extremo norte del lineamiento tectónico y volcánico Nejapa-Miraflores que traza el desplazamiento del arco. La

península de Chiltepe adquirió su forma y composición actuales durante una actividad volcánica altamente explosiva y efusiva durante el Pleistoceno Tardío y el Holoceno, que formó la Formación Chiltepe (FC) y culminó con la erupción Pliniana de 1,9 ka de la Tefra Chiltepe (Freundt & Kutterolf, 2019).

El estratovolcán Apoyeque está situado aproximadamente a unos 9 km al noroeste de la ciudad de Managua, en la región centro-occidental de Nicaragua. El edificio volcánico alcanza una altura de 430 m s.n.m., tiene un cráter casi circular, y de paredes escarpadas (2,75 km de diámetro y 250 m de profundidad), ocupado por un lago (Sapper, 1925; Williams, 1952a; McBirney, 1955a), y pertenece al Arco Volcánico Centroamericano. El vulcanismo en esta región está vinculado a la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe a lo largo de la Fosa de América Central, a un ritmo medio de 70-90 mm/año (DeMets, 2001). Apoyeque es una de las 11 estructuras volcánicas que forman el Complejo Volcánico Chiltepe en el extremo norte del campo volcánico de Nejapa; todas ellas emplazadas durante el Pleistoceno Superior (Avellán et al. 2012). Es el único volcán poligénico de este campo volcánico, que incluye al menos 29 estructuras monogenéticas reconocibles a lo largo de la falla N-S de Nejapa (Avellán et al., 2012). El cono principal del Apoyeque consiste en un apilamiento de lavas andesíticas y dacíticas cubiertas por depósitos piroclásticos dacíticos, con un volumen aproximado de 8 km<sup>3</sup>.

Apoyeque puede haber comenzado a entrar en erupción a finales del Pleistoceno con la emisión de al menos cuatro unidades de lava y domos de composición andesítica a dacítica. El registro estratigráfico indica que Apoyeque ha experimentado al menos tres erupciones plinianas, una hace ~17 k años Tefra Apoyeque Inferior (LAq), otra a los 12,4 ka Tefra Apoyeque Superior (UAq), y la más reciente entre 1,9 y 4 ka Tefra Chiltepe (CT). Una posible cuarta erupción pliniana del volcán Apoyeque con una paragénesis mineral muy similar a la del yacimiento de la UAq podría estar representada por el yacimiento de caída dispersa W-SW encontrado alrededor de la ciudad de Mateare, estratigráficamente por debajo del yacimiento UAq. Todo esto sugiere que la actividad del Apoyeque ha cambiado de predominantemente efusiva a predominantemente explosiva a lo largo del tiempo (Avellán et al., 2014).

La Laguna Xiloá rellena un cráter de maar circular de 2,5 km de diámetro. Su borde sureste se eleva desde justo por encima del nivel del lago Managua hasta los 220 m en el lado norte, donde se intersecta con el flanco del estratovolcán Apoyeque (Bice, 1985). La dacítica Tefra Xiloá, que comprende depósitos piroclásticos y depósitos de precipitación, fue erupcionada durante una violenta erupción freatomagmática de este cráter (Kutterolf et al., 2007).

Todo el sector meridional del área está densamente poblado y presenta varias instalaciones industriales. En la Península de Chiltepe, por el contrario, la población es muy reducida y limitada a los habitantes de varias haciendas agrícolas que se encuentran dispersas en las planicies alrededor del Volcán Apoyeque (ENEL, s.f.).

Mediante la combinación del conocimiento sobre las distintas características de los depósitos de caída de tefra (p.ej. los componentes, la morfología, granulometría, volumen emitido, tasas de descarga de los productos, etc.), es posible establecer de manera empírica los distintos estilos eruptivos que caracterizan la actividad volcánica (Romero et al. 2015).

Apoyeque presenta actividad volcánica histórica violenta con erupciones Plinianas y Subplinianas; este tipo de eventos se caracterizan por columnas eruptivas sostenidas y altas dando lugar a áreas extensas de depósitos de tefra (Francis y Oppenheimer, 2004). El término Pliniano (Escher, 1933; Walker y Croasdale, 1972) ha sido utilizado para describir estilos eruptivos extremadamente energéticos caracterizados por amplias zonas de dispersión de la tefra e índices de fragmentación intermedios a elevados (Walker 1973; Wilson, 1976; Rosi, 1998; Cioni et al., 2000). En general estas se relacionan a magmas ricos en sílice, aunque se conocen erupciones de este tipo, con magmas pobres en sílice (Walker y Croasdale, 1972). Los magmas silíceos son generalmente de composición dacítica a riolítica o magmas alcalinos muy evolucionados (Cas y Wright, 1987, como se citó en Romero et al., 2015).

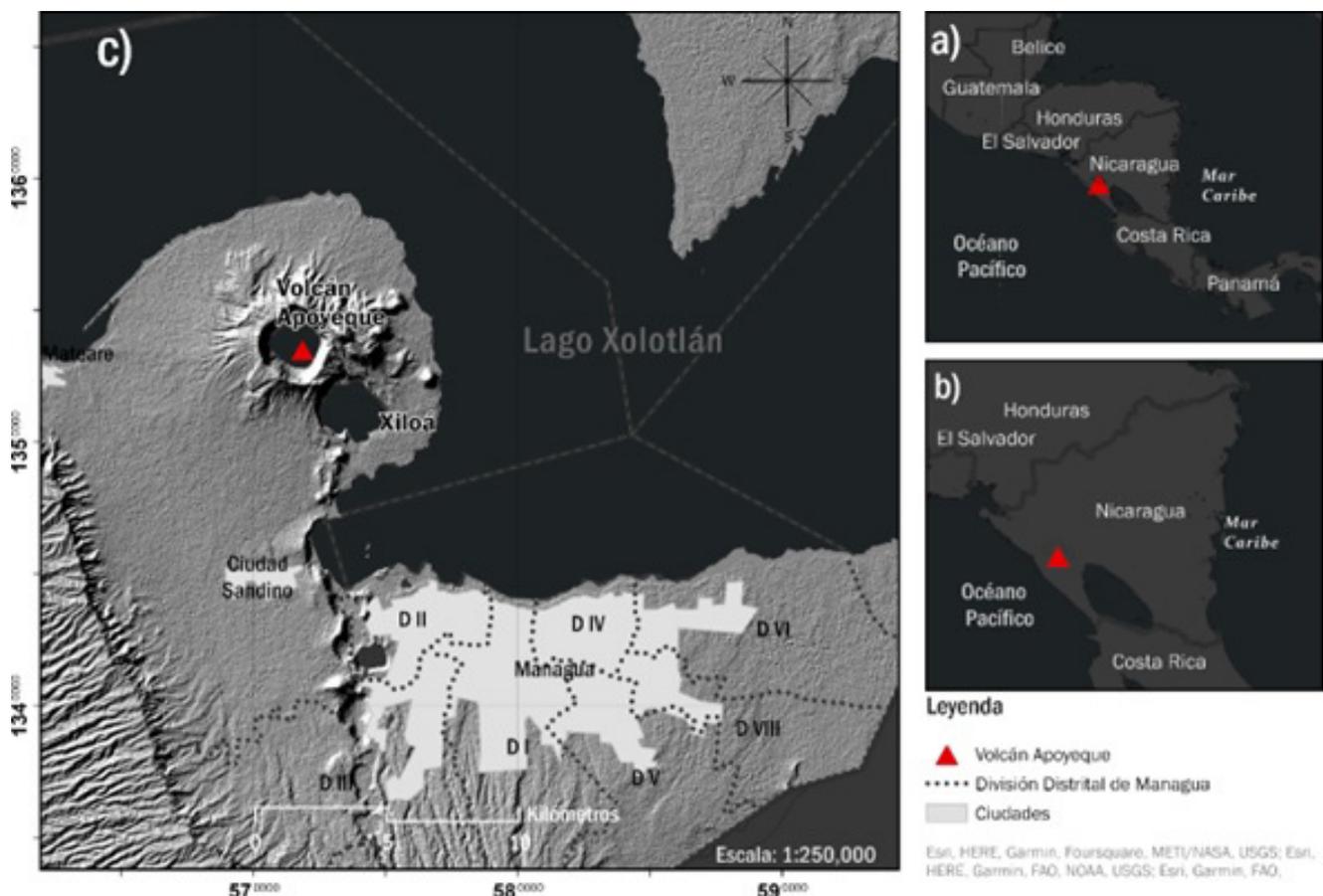


Figura 1. Ubicación del área de estudio: A) Mapa de América Central. B) Mapa de Nicaragua. C) Mapa en relieve del Graben de Managua con resolución de 12.5 m, que muestra el Complejo Volcánico de Chiltepe (volcán Apoyeque y la laguna de Xiloá) y los poblados cercanos al volcán Apoyeque.

### 3. METODOLOGÍA

El método para cuantificar el peligro de la precipitación de tefra comienza con la identificación de escenarios de erupción basado en estudios estratigráficos detallados. Escenarios de erupción reflejando los estilos típicos de erupción en un volcán dado y se caracterizan por rangos de parámetros de fuente de erupción (ESP), como la altura de la pluma, la masa eruptiva, la tasa de erupción masiva (MER) y la distribución total del tamaño de grano (TGSD). Los escenarios de erupción están limitados por el registro eruptivo del volcán, así como una comprensión del rango de actividad pasada observada en sistemas volcánicos análogos (Marzocchi et al., 2004; Ogburn et al., 2016, como se citó en Biass et al. 2016). Para la creación de zonas de peligro se definieron escenarios eruptivos a partir de la geología e historia eruptiva del volcán, de la cual se pueden obtener parámetros que son necesarios para la modelación numérica. Para calcular la acumulación y dispersión de tefra se utilizó TephraProb (Biass et al., 2016b).

El paquete TephraProb ofrece un entorno integrado para producir evaluaciones probabilísticas de peligros para caída de ceniza volcánica a través de una interfaz Matlab fácil de usar y usando el modelo de advección-difusión Tephra2 (Bonadonna et al., 2005). El paquete se puede dividir en tres secciones principales que incluyen módulos para: Recuperar, procesar y analizar los datos de entrada necesarios para las evaluaciones probabilísticas de la caída de tefra (es decir, cuadrícula de cálculo, condiciones del viento, historial de erupciones); postprocesar los resultados y compilar productos integrales (es decir, mapas de probabilidad, curvas de peligro, mapas probabilísticos de isomasas).

El manual del usuario proporciona una descripción técnica de cada funcionalidad y cada función individual de Matlab. La última versión del paquete se puede encontrar en <https://github.com/e5k/TephraProb>.

#### 3.1. PARÁMETROS DE ENTRADA

El programa incluye una serie de interfaces gráficas de usuario que recopilan, analizan y preprocesan los datos de entrada, crean distribuciones de los parámetros de la fuente de erupción en función de una amplia gama de escenarios probabilísticos de erupción (Biass et al., 2016b). Información Adicional sobre TephraProb está presente en Biass et al. (2016a) y Biass et al. (2016b). Los parámetros de entrada considerados en las simulaciones numéricas se presentan en las Tablas 1, 2 y 3. Describen dos escenarios específicos: (1) erupción Pliniana y (2) erupción SubPliniana. Aunque los escenarios asumidos se basan en el análisis de depósitos piroclásticos de eventos volcánicos pasados, la modelización numérica de la dispersión de tefra presenta varios parámetros de entrada pobremente restringidos. En TephraProb, el desarrollo de grandes conjuntos de simulaciones numéricas con parámetros de entrada variables permite hacer frente a estas variables de entrada (Biass et al. 2016b) y determinar su importancia relativa en el resultado modelado.

Tabla 1. Parámetros de entrada de cuadrícula de simulaciones numéricas realizadas en TephraProb

Parámetro de entrada	Apoyeque
Este mínimo	450000
Este máximo	650000
Norte mínimo	1270000
Norte máximo	1430000
Zona UTM	16 N
Zona de ventilación	16
Resolución de cuadrícula	250 m
Elevación media	500 m s.n.m

Tabla 2. Parámetros de entrada de viento de simulaciones numéricas realizadas en TephraProb

Parámetro de entrada	Apoyeque
Latitud	12.24 N
Longitud	-86,34 O
Subconjunto	2
Interpolación	Lineal
Reanálisis	NOAA R1
Inicio	1/2011
Fin	12/2017

Tabla 3. Parámetros de entrada de simulaciones numéricas realizadas en TephraProb asociadas con el escenario eruptivo

Parámetro de entrada	Apoyeque
Respiradero este	571500
Respiradero Norte	1353600
Zona de respiradero	16 N
Altura de respiradero	500 m
Altura mínima	20000 m
Altura máxima	31000 m
Masa mínima	1.2 * 10 <sup>11</sup> kg
Masa máxima	3.0 * 10 <sup>12</sup> kg
Duración mínima	4 h
Duración máxima	24 h
Restringir la altura de la columna	1km
Nb viento	500
Inicio del viento	01-Ene-2011
Viento por día	4 m/s
Estacionalidad	No
El viento empieza a llover	-
El viento comienza a secarse	-
Restringir la fecha de la erupción	No
Fecha de erupción	-
Restringir la dirección del viento	No
Dirección mínima del viento	-
Dirección máxima del viento	-
Altura de la troposfera	15000 m
Mínimo $\phi$	8
Máximo $\phi$	-6
Mediana mínima de $\phi$	-2.5
Mediana máxima de $\phi$	-1
Desviación estándar mínima de $\phi$	2
Desviación estándar máxima de $\phi$	2.5
Agregación mínima	0.3
Agregación máxima	0.7
Diámetro máximo	5 $\phi$
Duradero	Si
Muestra de altura	Logarítmica
Nb corridas	100
Constante de remolino	0.04
Coefficiente de difusión	876 m <sup>2</sup> /s
Umbral de tiempo de caída	647 s
Densidad lítica	2600 kg/m <sup>3</sup>
Densidad de piedra pómez	1000 kg/m <sup>3</sup>
Paso de columna	50
Paso de partículas	50
$\alpha$	1
$\beta$	1

#### 3.2. SALIDAS DEL MODELO

Los resultados del modelo incluyen:

Mapas de probabilidad: dado un escenario eruptivo específico y un umbral fijo de acumulación de tefra (en kg/m<sup>2</sup>), TephraProb calcula la probabilidad espacial de exceder ese valor (Biass et al., 2016b).

Curvas de peligro: para un escenario eruptivo específico y ubicaciones geográficas fijas (típicamente, puntos de interés alrededor del volcán), las curvas de peligro muestran la relación entre acumulación de tefra (en kg/m<sup>2</sup>) y la probabilidad de exceder ese valor (Biass et al., 2016b).

#### 4. RESULTADOS

Para ambos escenarios eruptivos, los resultados incluyen los mapas de probabilidad asociados con una acumulación de tefra de 10 kg/m<sup>2</sup>, 50 kg/m<sup>2</sup>, 100 kg/m<sup>2</sup> y 500 kg/m<sup>2</sup>, las ciudades más importantes localizadas en los alrededores del volcán se consideran en la construcción de mapas de peligro, como son: León, La Paz Centro, Nagarote, Mateare, Ciudad Sandino, Managua, inclusive, Chinandega, Puerto Sandino y Tipitapa.

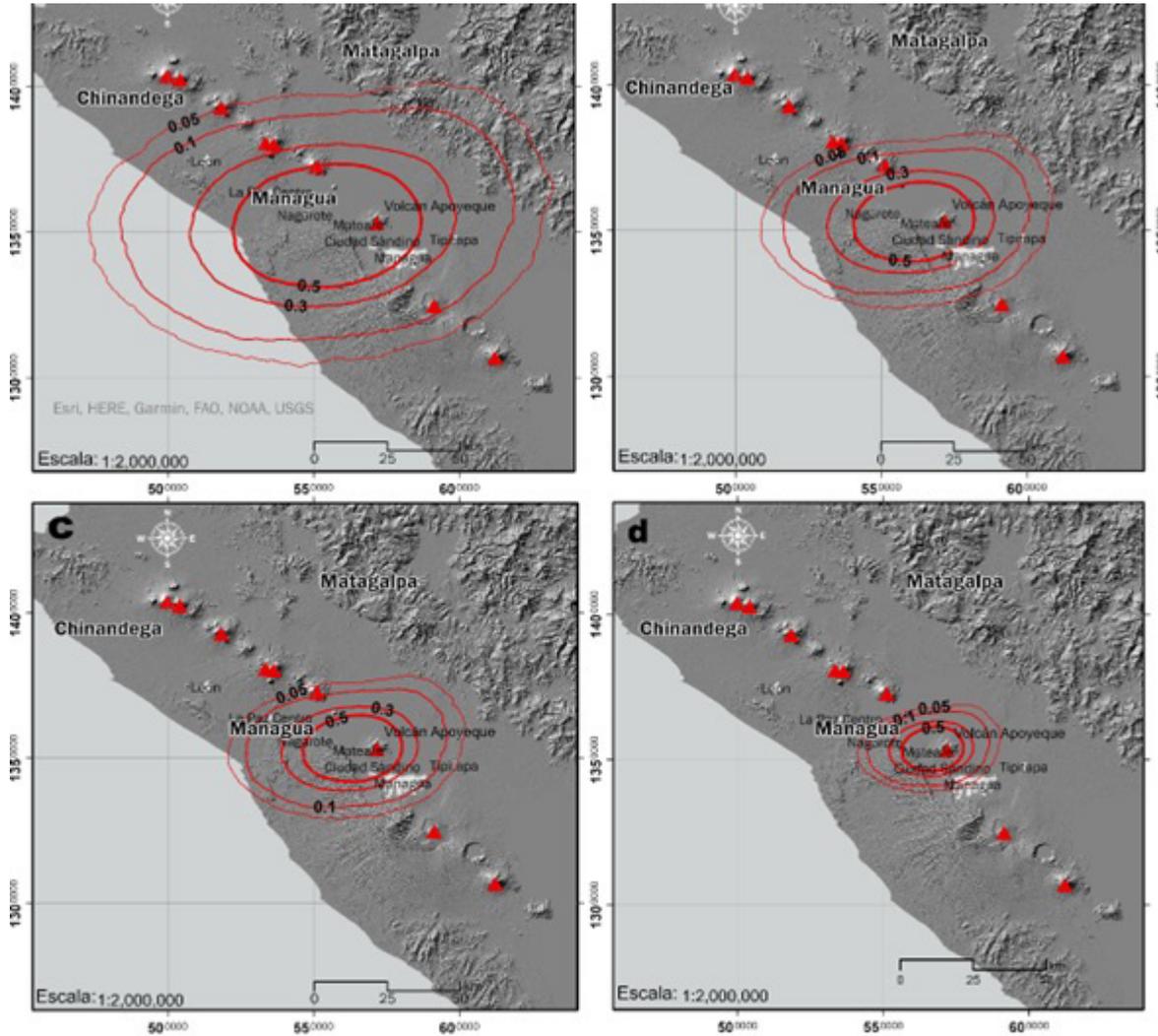
El modelado numérico destaca la importancia de los patrones de viento regional en la dispersión de tefra, con sentido de transporte preferencial NE-SO. Considerando un evento Pliniano y SubPliniano representativo, la probabilidad de excedencia para una acumulación de tefra de 100 kg/m<sup>2</sup> es ~90 % para Mateare, ~70 % para Ciudad Sandino, ~10 % para Managua, Nagarote, mientras que valores inferiores al 1 % se calcularon

para La Paz Centro, Puerto Sandino, León y Chinandega. Por otro lado, la probabilidad de excedencia para una acumulación de tefra de 10 kg/m<sup>2</sup> es > 95 % para Mateare y Ciudad Sandino, ~70 % para Managua y Nagarote, ~20 % para Puerto Sandino y La Paz Centro, mientras que para León y Chinandega se calcularon valores inferiores al 1 %.

Los valores de estas probabilidades cambian al variar las características de la erupción (masa eruptada, altura de la columna, entre otros), pero la distribución relativa de tefra se mantiene similar debido a su fuerte dependencia con la estadística de vientos.

Considerando un futuro evento eruptivo con las mismas probabilidades para cualquier día del año, es muy probable que las localidades y poblados directamente al NE-SO se vean más afectados por caída de tefra, por ejemplo, Mateare y Ciudad Sandino, debido a su cercanía.

Para un escenario SubPliniano podemos ver la diferencia de los mapas que consideran la estación seca y la estación lluviosa, el radio de influencia de caída de tefra es mucho mayor en época de verano que en época lluviosa. Estos mapas muestran la importancia de los patrones de viento en la evaluación del peligro de la precipitación de tefra.



**Leyenda**

Figura a	Figura b	Figura c	Figura d
▲ Volcanes	▲ Volcanes	▲ Volcanes	▲ Volcanes
■ Ciudades	■ Ciudades	■ Ciudades	■ Ciudades
<b>Isoprobabilidad 10 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>Isoprobabilidad 50 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>Isoprobabilidad 100 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>Isoprobabilidad 500 kg/m<sup>2</sup></b>
— 0.05	— 0.05	— 0.05	— 0.05
— 0.1	— 0.1	— 0.1	— 0.1

Figura 2. Mapa compuesto por 4 mapas probabilísticos de caída de tefra para un escenario Pliniano en el volcán Apoyeque. Las isolíneas probabilísticas encierran áreas con probabilidad para la excedencia de una carga de a) 10 kg/m<sup>2</sup>, b) 50 kg/m<sup>2</sup>, c) 100 kg/m<sup>2</sup> y d) 500 kg/m<sup>2</sup> de tefra.

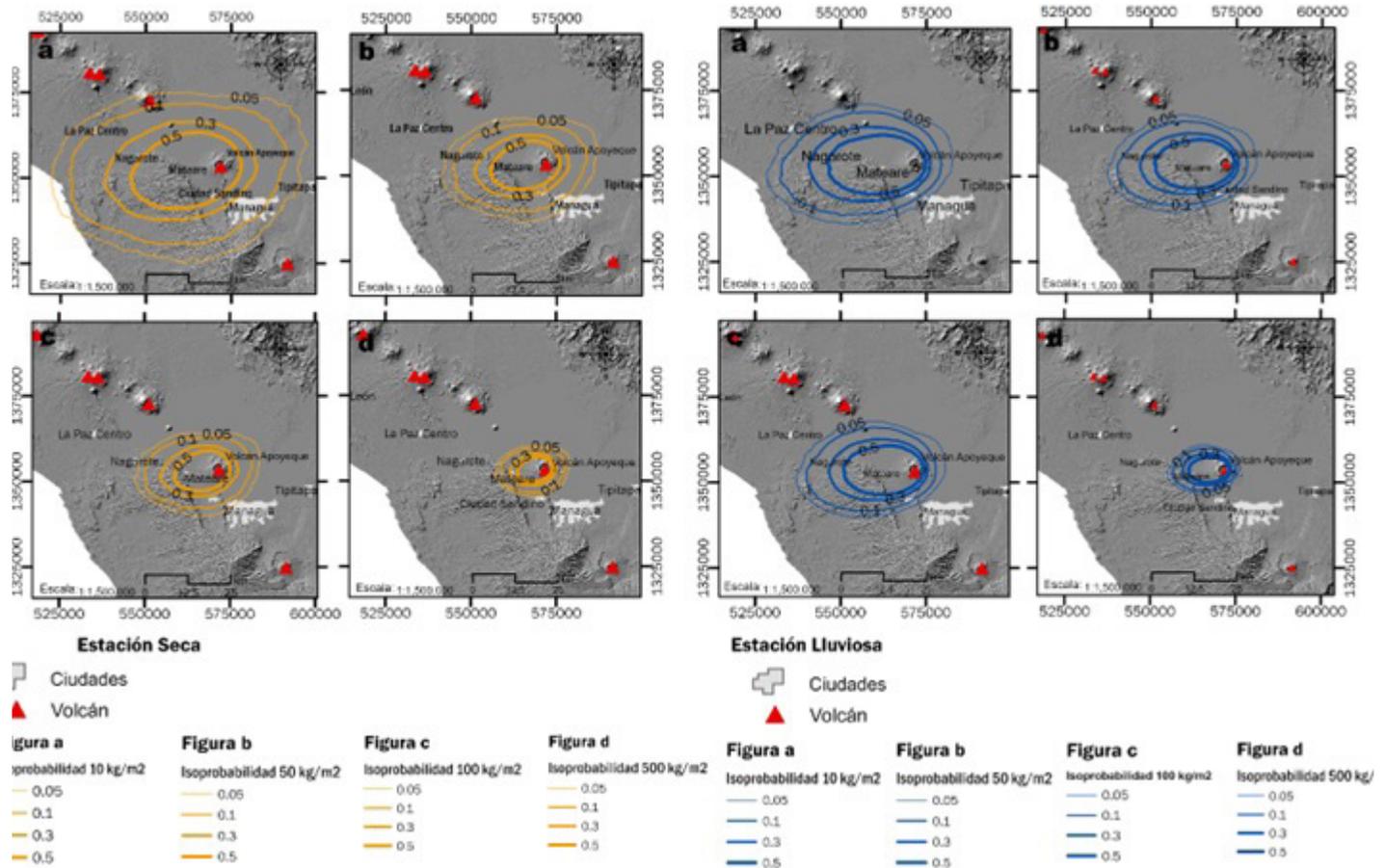


Figura 3. Mapa compuesto por 8 mapas probabilísticos de caída de tefra para un escenario SubPliniano en el volcán Apoyeque considerando estación seca y estación húmeda. Las isólineas probabilísticas encierran áreas con probabilidad para la excedencia de una carga de a) 10 kg/m<sup>2</sup>, b) 50 kg/m<sup>2</sup>, c) 100 kg/m<sup>2</sup> y d) 500 kg/m<sup>2</sup> de tefra.

Para un escenario SubPliniano que no considera ninguna estación podemos observar como las isólineas probabilísticas para las diferentes cargas de tefra encierran extensiones de áreas proximales como distales del volcán, para un futuro evento eruptivo con estas mismas probabilidades, las localidades y poblados más cercanos se verían mayormente afectados por caída de tefra.

La caída de tefra abarca el mayor porcentaje de las áreas posibles a ser afectadas por algún peligro volcánico, alcanzando coberturas del 70-90%.

### 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

El estudio de los depósitos de caída es de real importancia para entender tanto el desarrollo de las erupciones, como también para obtener datos fiables para el análisis del peligro volcánico en centros eruptivos potencialmente activos. Dado que los productos que emite un volcán son resultado directo de los procesos y mecanismos que actúan en su interior, es de suma relevancia para la predicción de erupciones volcánicas, entender dicha mecánica.

En este trabajo se plantean dos escenarios eruptivos para el volcán Apoyeque, uno Pliniano (IEV 4-5) y otro SubPliniano (IEV 3-4), ambos casos modelados mediante TephraProb (Biass et al., 2016b), que utiliza el modelo numérico de advección-difusión Tephra2 (Bonadonna et al., 2005). Los resultados se presentan en mapas con isólineas probabilísticas para una acumulación de tefra de 10 kg/m<sup>2</sup>, 50 kg/m<sup>2</sup>, 100 kg/m<sup>2</sup> y 500 kg/m<sup>2</sup>. Para escenarios más explosivos (Pliniano, SubPliniano) se puede apreciar de forma clara la deposición de tefra alrededor del volcán y la dispersión controlada por los vientos de la zona.

Al observar los mapas generados, se aprecia una clara disposición hacia el NE-SO de las áreas afectadas por la acumulación de tefra en torno al Apoyeque, esto se debe a que el mecanismo principal de transporte de tefra es el viento.

Una futura erupción pliniana podría tener consecuencias catastróficas, para más de la mitad de la población de la ciudad de Managua y otros

lugares como Mateare y Ciudad Sandino. Los depósitos de caída de ceniza que se extienden más allá de los límites de Managua con un espesor superior a 2 m serían suficientes para sepultar completamente muchas casas y pequeños edificios de la ciudad. Además, la removilización de material podría tener un impacto importante en la ciudad y en las tierras bajas de la región del graben de Managua (Avellán et al., 2014).

La evaluación del impacto por acumulación de tefra es más compleja que la aplicación de una relación simple al espesor del depósito (Biass et al., 2017).

La cantidad de tefra acumulada puede tener varios impactos en las comunidades y en la economía de estas, dependiendo de la densidad y la cantidad de material expulsado. Por ejemplo, una acumulación de 10 kg/m<sup>2</sup> de tefra tendría un impacto revelador en las comunidades aledañas al complejo volcánico ya que las personas expuestas pueden

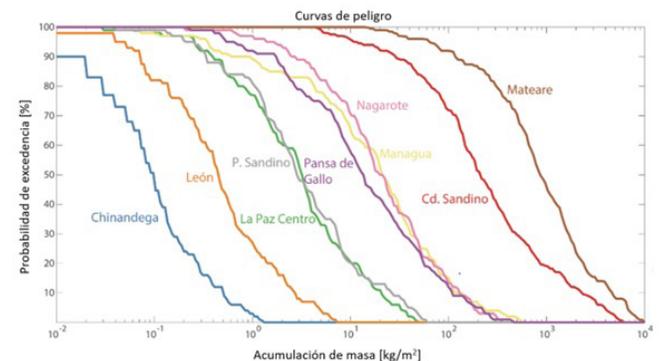
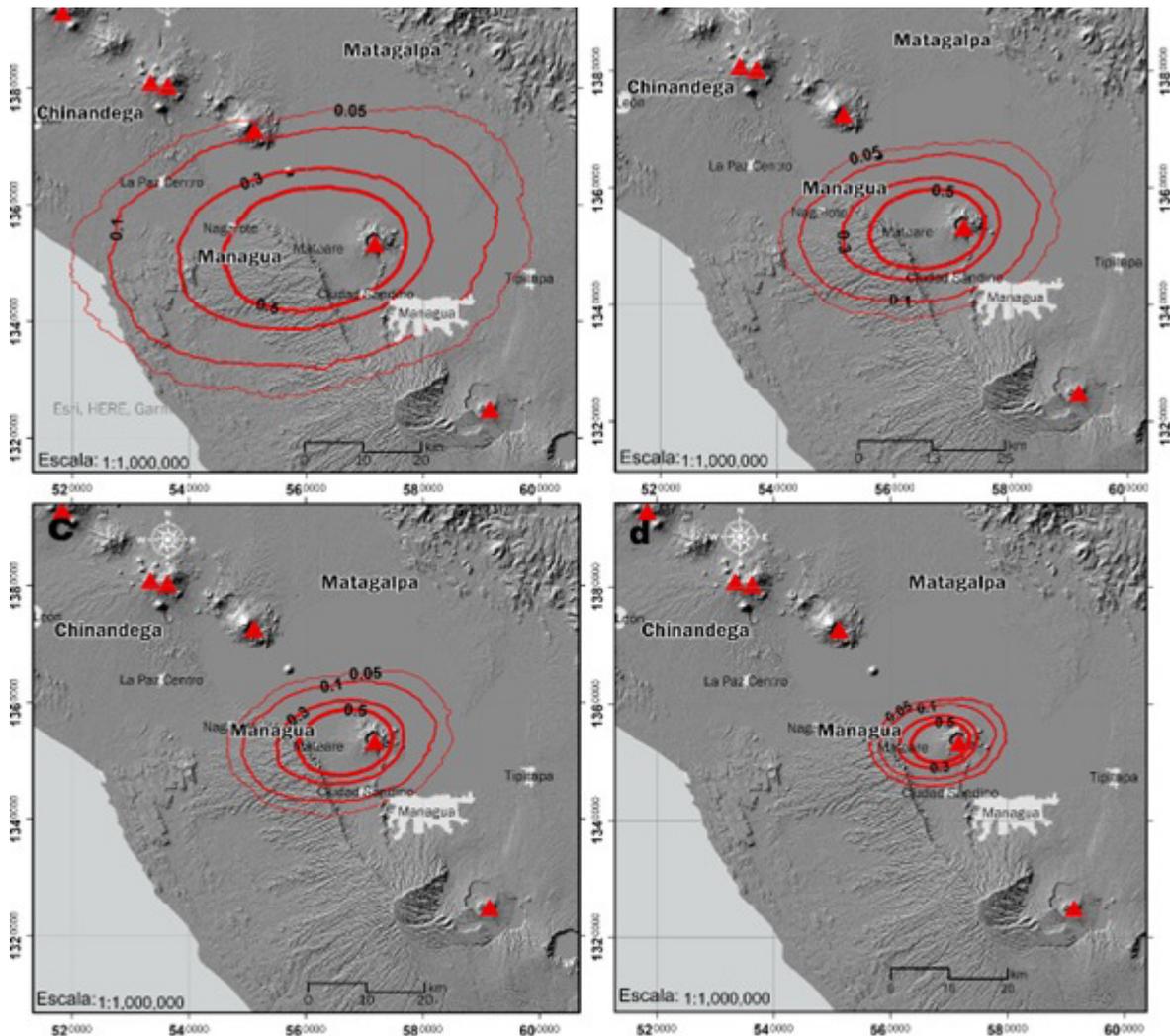


Figura 4. Curvas de peligrosidad para sitios seleccionados con probabilidad para la excedencia de una carga de tefra.



### Leyenda

Figura a	Figura b	Figura c	Figura d
Volcanes	Volcanes	Volcanes	Volcanes
Ciudades	Ciudades	Ciudades	Ciudades
<b>Isoprobabilidad 10 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>Isoprobabilidad 50 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>Isoprobabilidad 100 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>Isoprobabilidad 500 kg/m<sup>2</sup></b>
0.05	0.05	0.05	0.05
0.1	0.1	0.1	0.1

Figura 5. Mapa compuesto por 4 mapas probabilísticos de caída de tefra para un escenario SubPliniano en el volcán Apoyeque no considerando ninguna estación. Las isoprobabilísticas encierran áreas con probabilidad para la excedencia de una carga de a) 10 kg/m<sup>2</sup>, b) 50 kg/m<sup>2</sup>, c) 100 kg/m<sup>2</sup> y d) 500 kg/m<sup>2</sup> de tefra.

tener problemas de salud; inmediatamente del tipo respiratorio y tiempo después problemas de salud más graves, especialmente si hay presencia significativa de cenizas finas en el aire.

También puede haber interrupciones en las actividades diarias debido a la necesidad de limpiar y retirar la tefra de las áreas afectadas, lo que nos llevaría a un impacto en la economía local ya que la acumulación moderada de tefra en esta cantidad podría afectar la infraestructura, incluyendo sistemas de agua, afectando la calidad de esta. Los sistemas de drenaje podrían ser obstruidos, el alcantarillado, maquinarias y equipos. Las actividades agrícolas podrían sufrir interrupciones ya que la tefra puede cubrir cultivos y afectar la productividad del suelo, la acumulación moderada puede causar daños a edificaciones, el transporte también puede verse afectado, ya que puede acumularse en carreteras y aeropuerto, causando interrupciones y daños en las vías terrestres y el tráfico aéreo.

Si se presentase una acumulación de tefra de 50 kg/m<sup>2</sup>, el impacto en la población sería aún mayor, ya que los riesgos para la salud podrían aumentar considerablemente, con la posibilidad de problemas respiratorios agudos, irritación ocular y otros efectos adversos. Además,

podría haber riesgo de colapso de edificaciones débiles debido al peso de la tefra acumulada, principalmente en las zonas más próximas al complejo volcánico en donde la población vive de forma más precaria.

Esto nos proporciona un indicativo de que el impacto en la economía sería aún mayor, ya que a este nivel podría causar daños más graves a las edificaciones, carreteras, puentes, sistemas de agua y alcantarillado, líneas eléctricas y más. La agricultura puede sufrir daños significativos, con la posibilidad de pérdida de cosechas y daños a largo plazo en la calidad del suelo y otras actividades económicas industriales y comerciales se verían afectadas y podrían paralizarse, con consecuencias económicas a corto y largo plazo. Una acumulación de esta magnitud afectaría no solo a nivel local sino también a ciudades próximas, una situación altamente crítica que requeriría una respuesta inmediata y coordinada por parte de las autoridades de emergencia.

Es importante destacar que los impactos específicos pueden variar según la composición de la tefra, la distancia desde el volcán, las condiciones meteorológicas y otras variables que las autoridades de emergencia deberán de tomar en cuenta a la hora de planificar una evacuación.

Cualquier actividad futura en el volcán Apoyeque podría amenazar la vida de miles de habitantes por lo que investigaciones como estas son de vital importancia para mejorar la evaluación de peligros en esta región.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Agencia Italiana de Cooperación que financió la adquisición de equipos, asesoró y apoyó plenamente el desarrollo del Proyecto Regional de Formación Aplicada a los Escenarios de Riesgos con la medición y monitoreo de los fenómenos volcánicos, sísmicos y geohidrológicos en Centro América (RIESCA). Queremos dar nuestra gratitud al Dr. Raffaello Cioni y al Dr. Álvaro Aravena, por todo su apoyo y colaboración para la realización de este proyecto, por sus comentarios y aportes. Agradecemos a la MSc. Mélida Schliz por su colaboración en la recopilación de la información bibliográfica, necesaria para la realización de este trabajo.

## 7. REFERENCIAS

Arias, D., (2020). Análisis de peligro volcánico por caída de tefra en los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mochochoshuenco, Chile. [Tesis de Grado, Universidad de Concepción].

Avellán, D., Macías, J., Sosa-Ceballos, G., and Velásquez, G.: Stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 12.4 ka plinian eruption of Apoyeque volcano, Managua, Nicaragua, *Bull. Volcanol.*, 76, 792, <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0792-4>, 2014.

Avellán, D., Macías, J., Pardo, N., Scolamacchia, T., and Rodriguez, D.: Stratigraphy, geomorphology, geochemistry and hazard implications of the Nejapa Volcanic Field, western Managua, Nicaragua, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 213, 51–71, 2012.

Barrantes, G., Núñez, S., Castro, J., Malavassi, E. y Soto, C. (2013). Simulación de caída de ceniza del volcán Irazú aplicando el programa Tephra modificado. <http://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj>

Biass, S., Bonadonna, C., Di Traglia, F., Pistolesi, M., Rosi, M. y Lestuzzi, P. (2016a). "Evaluación probabilística del impacto físico de futuros eventos de lluvia radiactiva de tefra para la isla de Vulcano, Italia". En: *Boletín de Vulcanología* 78.5, p. 37.

Biass, S., Bonadonna, C., Connor, L. y Connor, C. (2016b). "TephraProb: un paquete de Matlab para evaluaciones probabilísticas del peligro de la lluvia radiactiva de tefra". En: *Revista de vulcanología aplicada* 5.1, pág. 10. <https://doi.org/10.1186/s13617-016-0050-5>

Biass, S., Todde, A., Cioni, R., Pistolesi, M., Geshi, N. y Bonadonna, C. (2017). Potential impacts of tephra fallout from a large-scale explosive eruption at Sakurajima volcano, Japan. *Bulletin of Volcanology*. Vol. 79 (73): 24 pp.

Bice, D. (1985). Estratigrafía volcánica cuaternaria de Managua, Nicaragua: correlación y asignación de fuentes para múltiples depósitos plinianos superpuestos. *Boletín GSA* 1985; 96 (4): 553–566.

Bonadonna, C., Houghton, B.F., (2005). Distribución total del tamaño de grano y volumen de los depósitos de caída de tefra. *Toro Volcanol* 67, 441–456. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0386-2>

Cas, R.A.F. y Wright, J.V., (1987). *Volcanic successions: Modern and Ancient: a geological approach to processes*. Allen and Union, London. 528 pp.

Cioni R., Maranelli P., Santacroce and Sbrama A., (2000). In: H. Sigurdsson, B. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymar and J. Stix (eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, San Diego, 495-511.

Comisión Nacional de Energía (CNE). (2001). *Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua. Volumen VIII. Evaluación del área de Managua – Chiltepe. Parte A: Texto, Tablas y Figuras*. Managua, Nicaragua.

Connor, C.B. (5 de junio de 2002). Tephra dispersión modelling in parallel. Recuperado de la página de la Universidad de Florida del Sur. <http://www.cas.usf.edu/~cconnor/parallel/tephra/tephra.html>

DeMets, C., (2001) A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: implications for slip along the Central America volcanic arc. *Geophys Res Lett* 28:4043–4046

Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL). (s.f.). Pre-Factibilidad. Fall3d, (2012). Centro de Supercomputación de la Universidad de Barcelona, Modelo Fall3D, Recuperado el 6 de febrero de 2012, de <http://www.bsc.es/projects/earthscience/fall3d/> Completar la información del autor.

Escher, B.G., 1933. On a classification of central eruptions according to gas pressure of the magma and viscosity of the lava. *Leidsche Geol Meded, Deel VI Afl 1*:45–48.

Francis, P. y Oppenheimer, C., (2004). *Volcanoes*, Oxford University Press, 521pp

Freundt, A. & Kutterolf S., (2019). The long-lived Chiltepe volcanic complex, Nicaragua: magmatic evolution at an arc offset. October 2019. *Bulletin of Volcanology* 81(10) DOI: 0.1007/s00445-019-1321-x.

Komorowski, J.C., Legendre, Y., Caron, B., Boudon, G. (2008). Reconstruction and analysis of sub-plinian tephra dispersal during the 1530 A.D. Soufrière (Guadeloupe) 31 eruption: Implications for scenario definition and hazards assessment. *J Volcanol Geotherm Res.* 178: 491-515.

Kutterolf, S., Freundt, A., Pérez, W., Wehrmann, H., Schmincke, H.-U., 2007. Late Pleistocene to Holocene temporal succession and magnitudes of highly-explosive volcanic eruptions in west-central Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 163, 55–82.

McBirney, A.R., 1955a. Thoughts on the eruption of the Nicaraguan Volcano Las Pilas. *Bull. Volcanologique, Series II*, vol. 17, pp. 113–117.

Romero, J., Bustillos, J. y Viramonte, J. (2015). Los depósitos de caída de tefra: Una breve revisión sobre su cuantificación y análisis para la clasificación de erupciones volcánicas explosivas, con ejemplos Latinoamericanos.

Rosi, M., (1998). Plinian eruption columns: particle transport and fallout. In: Freundt A, Rosi M (eds) *From magma to tephra*. Elsevier, Amsterdam, pp 139–172.

Sapper, C., 1925. *Los Volcanes de América Central*, vol. 116. Max Niemeyer, Halle, Germany.

Scollo, S., Folch, A., Costa, A., (2008). A parametric and comparative study of different tephra fallout models, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 176, Issue 2, Pages 199-211, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.04.002>.

Walker, G.P.L. y Croasdale, R., (1972). Characteristics of some basaltic pyroclastics. *Bull. Volc.*, 35: 303-317.

Walker, G.P.L., (1973). Explosive volcanic eruptions: a new classification scheme. *Geol. Rund.* 62, 431–446.

Wilson, L., (1976). Explosive Volcanic Eruptions III. Plinian eruption columns. *Geophys JR Astr Soc* 45:543-556.

Williams, S.N., 1952a. Geologic observations on the ancient human footprints near Managua, Nicaragua. *Contrib. Am. Anthro. A. Hist.* 52, 5–31.