

Aplicación de VolcFlow para simular Avalanchas de Escombros y CDP en los volcanes Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco

Enrique Cárdenas-Sánchez, Luis Eduardo Frías Gómez, Elis Olivia Rangel Flores,
Oscar Dionicio Reyes Mendoza y Francisco Valencia Alcaraz

Para citar este artículo: [Cárdenas-Sánchez Enrique, Frías Gómez Luis Eduardo, Rangel Flores Elis Olivia, Reyes Mendoza Oscar Dionicio, Valencia Alcaraz Francisco. 2021. Aplicación de VolcFlow para simular Avalanchas de Escombros y CDP en los volcanes Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco. Ciencia Nicolaita, número 82, 39-58. DOI:<https://doi.org/10.35830/cn.vi82.557>.](#)

Ver material suplementario

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Aplicación de VolcFlow para simular Avalanchas de Escombros y CDP en los volcanes Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco

Enrique Cárdenas-Sánchez^{1*}, Luis Eduardo Frías Gómez², Elis Olivia Rangel Flores², Oscar Dionicio Reyes Mendoza² y Francisco Valencia Alcaraz²

¹ Universidad de Guadalajara, Departamento de Ciencias de la Naturaleza, Centro Universitario del Sur

² Universidad de Guadalajara, Ingeniería en Geofísica

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 7 de junio de 2021

Aceptado: 28 de julio de 2021

RESUMEN

El análisis de los peligros volcánicos es un elemento para cuantificar el potencial de amenaza con enfoque a la mitigación del riesgo. Por su ubicación geográfica, México cuenta con al menos 37 volcanes que han presentado actividad explosiva en los últimos 10,000 años. Entre los más relevantes se encuentra el volcán Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco que mantienen diversas similitudes entre sí. Por ejemplo, presentar actividad explosiva reciente y ubicarse sobre una región altamente poblada y, por tanto, son vulnerables. Por otra parte, existen diversos modelos numéricos que permiten simular de forma efectiva amenazas volcánicas como los lahars, Corrientes de Densidad Piroclástica (CDP), avalanchas de escombros, caída de ceniza, entre otras. En este contexto, hemos utilizado el software VolcFlow que resuelve las ecuaciones de conservación de masa y momento para simular el alcance de diversos flujos. El objetivo es identificar zonas vulnerables por amenazas volcánicas, como son las CDP y avalanchas volcánicas, sobre escenarios simulados de eventos históricos del Volcán de Colima, Popocatepetl y Ceboruco. La comparativa de nuestros resultados con datos publicados, permitieron realizar modificaciones sobre los parámetros reológicos, la densidad de flujo y/o el volumen total emitido en los escenarios simulados. En consecuencia, se estimó el alcance y dispersión ilustrando las zonas de mayor riesgo para los habitantes que radican en los alrededores de los volcanes señalados.

PALABRAS CLAVE: Peligro volcánico, Mitigación del riesgo, Amenazas volcánicas, Avalanchas de escombros, Corrientes de Densidad Piroclástica.

ABSTRACT

Volcanic hazards analysis is an element for quantifying threat potential aimed at mitigating risk. Due to its geographical location, Mexico has at least 37 volcanoes that have shown explosive activity in the last 10,000 years. The most relevant is the Popocatepetl volcano, Colima volcano and Ceboruco. There are various similarities between them, such as presenting recent explosive activity and being located in a region with a high population density and, therefore, high degree of vulnerability. On the other hand, several numerical models allow simulating effectively volcanic threats such as lahars, Pyroclastic Density Currents (PCD), avalanche debris and ashfall, among others. In this context, we have used VolcFlow software which solves mass and momentum conservative equations to simulate the range of diverse kinds of flows. Considering the above, the goal of this work is to identify areas vulnerable by volcanic threats such as CDP and volcanic avalanches on simulated scenarios of historical events belonging to the Volcán de Colima, Popocatepetl and Ceboruco. Considering the above said, this article shows the result of hazard analysis of various events such as pyroclastic flows, and avalanche debris with a mitigating risk approach from volcanic hazards. Comparing our results with the reported data, allowed us to make changes in the rheological parameters, the flux density and/or the total volume in the simulated scenarios. Consequently, the range and scattering were estimated illustrating the areas of greatest risk to the inhabitants established around the volcanoes.

KEYWORDS: Volcanic Hazards, Risk Mitigation, Avalanche Debris, Pyroclastic Density Currents.

1. Introducción

El análisis de los peligros volcánicos es uno de los pilares fundamentales para la gestión y mitigación de riesgo principalmente en zonas de vulcanismo activo. En el mundo existen actualmente más de 1,398 volcanes que han mostrado actividad explosiva o efusiva desde el holoceno. En México se contabilizan al menos 37 volcanes que han presentado actividad eruptiva en los últimos 11,650 años (Global Volcanism Program, 2013). Por otra parte, en Varley *et al.*, (2017), se reportan 27 volcanes activos incluyendo campos monogenéticos. El autor destaca la región de la Franja Volcánica Transmexicana (FVT) donde se localizan los principales estratovolcanes activos como el Volcán de Colima, Popocatépetl, Citlaltépetl y campos volcánicos relevantes como Michoacán-Guanajuato y Chichinautzin. La FVT tiene una distribución longitudinal de 920 km desde Nayarit hasta el estado de Veracruz. En dicha región se establece más del 40% de la población del país, incluyendo las ciudades más pobladas, como la zona conurbada de Guadalajara, Ciudad de México y Puebla, entre otras.

Las Corrientes de Densidad Piroclástica (CDP) son definidas como el fenómeno volcánico más peligroso para poblaciones cercanas al edificio. Se caracterizan como mezclas no homogéneas y de movimiento rápido de partículas y gas que se propagan por la superficie bajo la influencia de la gravedad (Cole *et al.*, 2015). Las CDP están compuestas por magma recién fragmentado, clastos líticos derivados del conducto volcánico, así como de gases magmáticos que generan depósitos de gran volumen que pueden desplazarse a distancias de hasta 20 km (Cole *et al.*, 2015). Estas CDP se producen por diversos mecanismos como son, el colapso total o parcial del domo de lava, desbordamiento de la columna eruptiva por efecto gravitacional o

una explosión lateral, también conocida como *blast* (Kelfoun, 2011; Dufek *et al.*, 2015). Para nuestro análisis, nos enfocaremos únicamente en los flujos piroclásticos como CDP.

La avalancha de escombros, por su parte, es un término que se usa para describir flujos de fragmentos de roca asociado con deslizamientos del edificio (De Vries y Davies, 2015). Se trata de grandes deslizamientos que pueden ocurrir sobre un sector del volcán, producto de la inestabilidad de los flancos. Se generan ya sea por el ascenso de magma en el edificio volcánico, un sismo de gran magnitud cercano al edificio o por efecto de la gravedad. El efecto de *mesobrecia* ocurre en la mayoría de las calderas, son avalanchas en las paredes de la caldera que colapsan por el efecto de gravedad. Se trata de bloques de tamaño que van desde 1m hasta cientos de metros. Algunos mega bloques se pueden llegar a confundir con el suelo de la caldera (De Vries y Davies, 2015).

Las avalanchas de escombros producidas por colapso son eventos destructivos, los cuales involucran volúmenes grandes. En el trabajo de Sosio *et al.* (2012) se analizaron siete casos dentro de los que se encuentra Mount Saint Helens comparándose con observaciones documentadas. En dicho trabajo se replicaron los movimientos de algunos eventos por medio de un software llamado “Quasi-3D numerical code”. El software se rige por el parámetro del ángulo de fricción interna. Para ello utilizaron modelos digitales de elevación (MED), datos topográficos, desplazamiento, volumen, ángulos de fricción basal los cuales oscilan entre 3° - 31°. Algunos de estos parámetros fueron ajustados por medio de ensayo y error.

En cuanto a las simulaciones de amenazas por las CDP, ha habido un campo de estudio bastante amplio, en los cuales se han estimado los alcances de las CDP con el uso de diferentes softwares de modelación. En Saucedo *et al.*

(2005), por ejemplo, se generó un mapa de alcances y velocidades de la CDP, durante la crisis de 1913 en el Volcán de Colima, usando el programa FLOW3D. Sheridan *et al.* (2001) utilizó FLOW3D para estimar la trayectoria de las amenazas por CDP y lahares en el Volcán Popocatepetl. Además, otros autores como Capra *et al.* (2011), Kelfoun (2011) y Kelfoun y Vargas (2015), hicieron alusión sobre los efectos de la resolución del MED durante las simulaciones para las CDP.

La simulación de flujos dinámicos de las principales amenazas en volcanes activos es fundamental en la mitigación de riesgo. Si bien el código de VolcFlow ha sido ampliamente utilizado para simular las CPD en diversos volcanes (Kelfoun, 2009; Cárdenas-Quiroga *et al.*, 2013; Kelfoun y Vargas, 2015; Kelfoun y Vargas, 2016; Vásconez *et al.*, 2016; Charbonnier *et al.*, 2013; Dietterich *et al.*, 2017; Manzella *et al.*, 2021), en estos trabajos se realizan simulaciones de avalanchas de escombros además de CDP, dos principales amenazas por vulcanismo explosivo. Para esto, utilizamos datos de algunos principales volcanes activos de México como Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco. Para el Volcán de Colima se realizaron simulaciones de 4 eventos volcánicos, el evento de 1913 y 2015 para CDP y los eventos de Tonila (mínima de $12,460 \pm 70$ y máxima $135,585 \pm 135$ BP) y San Marcos ($23,890 + 1075/-950$ BP) para las avalanchas de escombros. Mientras que para el Popocatepetl y Ceboruco se realizó sólo la simulación de CDP.

En el presente artículo se reporta el proceso de simulación de dos tipos de amenazas volcánicas por flujos, como son las avalanchas volcánicas y las CDP, por medio de modificaciones en los coeficientes reológicos, principalmente sobre la densidad del flujo, además de otras variables relevantes es el volumen de material aproximado. Dichas modificaciones permitirán estimar el alcance y dispersión de diversos es-

cenarios simulados para 3 de los volcanes más activos de México como son Volcán de Colima, Popocatepetl y Ceboruco. Con ello se pretende identificar aquellas zonas expuestas ante las amenazas mencionadas con referencia a eventos históricos relevantes para los tres volcanes.

Considerando lo anterior, parte de nuestros objetivos es mostrar los alcances y limitaciones de las simulaciones del algoritmo *Volcflow*. Asimismo, se utilizará un MED actualizado con resolución de 15m para todas las simulaciones de todos los volcanes analizados en el presente documento. Los resultados son comparados con trabajos de diversos autores, lo cual nos permite calcular el grado de incertidumbre de nuestro análisis realizando modificaciones pertinentes en los parámetros reológicos.

2. Antecedentes del vulcanismo activo en México

2.1. Volcán de Colima

En los últimos 500 años el Volcán de Colima ha presentado 5 explosiones catalogadas con el Índice de Explosividad Volcánica (I.E.V.) mayor e igual a 4 (De la Cruz-Reyna, 1991; Macías, 2006; Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna, 2008; 2009; De la Cruz-Reyna y Mendoza-Rosas, 2015; Varley, 2017 y 2019; Varley *et al.*, 2017). La última erupción de este tipo ocurrió en 1913 donde se emitió un volumen aproximado de 1.1 km^3 de material de acuerdo con Saucedo *et al.* (2005).

Por otra parte, el 10-11 julio de 2015, el colapso parcial del domo produjo que un flujo de CDP descendió sobre las laderas del volcán explícitamente hacia el sur en dirección a la comunidad de Quesería, sobre la barranca conocida como Montegrande (Reyes-Dávila *et al.*, 2016; Capra *et al.*, 2016). De acuerdo con Capra *et al.* (2016) la erupción emitió un volumen

aproximado de $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Este evento, a pesar de que no produjo daños significativos en la infraestructura y/o economía de la región, es parte fundamental para el análisis de peligro que será considerado en la presente investigación.

La intensa actividad explosiva del Volcán de Colima se comprende de diversas fases que culminan con erupciones potentes de destrucción de domos de lava, como ocurrió en la erupción pliniana de 1913. De forma similar ocurrió en otros episodios de menor magnitud, en términos de energía total liberada, durante los años de 1998, 2005 y finalmente, en julio de 2015 que precedió al cese de la actividad efusiva y explosiva en 2017. Actualmente el volcán continúa en reposo de actividad explosiva desde el 2017. No obstante, es importante el monitoreo para detectar cualquier cambio como probable precursor de la actividad explosiva o efusiva.

2.2. Volcán Popocatepetl

La geología evolutiva del Popocatepetl ha sido sintetizada por diversos autores en las que destaca el artículo de Macías (2006) entre otros (Robin, 1984, Carrasco-Nuñez, 1985; Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna, 2008, 2009, 2017, 2019a y 2019b; Siebe *et al.*, 2017; Macías *et al.*, 2020). Diversos autores consideran tres etapas principales: en la primera etapa el edificio del volcán primitivo, también conocido como volcán Nexpayantla (Muñoz-Salinas *et al.*, 2020), donde se identifica el colapso parcial por la región lateral que produjo la formación de una caldera hace 200,000 años A.P. Similar a los observados en Mount Saint Helens en 1980 y a la del Volcán de Colima hace 4500 años, de acuerdo con Luhr y Prestegard (1988) y Hoblitt *et al.* (1981).

En el interior de esta caldera se inició la construcción de un segundo volcán conocido

como El Fraile, se estima que éste último colapso entre 50,000 y 30,000 años antes del presente. La erupción destruyó la parte meridional del volcán produciendo una enorme caldera de de amplitud dispersando un volumen de 28 a 30 km^3 . El segundo edificio creció dentro del colapso del edificio Nexpayantla, y recibe el nombre de su resto más destacable, el Cerro Ventorrill destruido aproximadamente hace 23,000 años, en una erupción lateral de magnitud superior a la ocurrida el 18 de mayo de 1980 en el volcán Mount Saint Helens (Hoblitt *et al.*, 1981), donde se produjo el colapso hacia el sur del antiguo cono del Popocatepetl. La explosión generó una avalancha de escombros que alcanzó distancias hasta de 70 km desde la cima. El colapso parcial generó la formación de cúmulos de material denominados *Hummoks* y la formación de una caldera. Posterior a este evento comenzó la formación del cono actual del Popocatepetl construido aproximadamente desde hace 23,000 años. Actualmente el Popocatepetl tiene una elevación sobre el nivel del mar de 5,472 m y una elevación relativa respecto a sus faldas de 3,000 m. Está edificado por una serie de depósitos de CDP y coladas de lava de composición andesítica-dacítica. El volcán Popocatepetl ha tenido una secuencia de emplazamientos y destrucción de domos en la etapa eruptiva actual, la cual comenzó en 1994, emplazándose el primer domo de esta etapa en 1996, contándose al menos 36 emplazamientos hasta el 2016 (Gómez-Vázquez *et al.*, 2016; Mendoza-Rosas *et al.*, 2019a y 2019b). La historia eruptiva y geológica de eventos explosivos en este volcán ha sido analizada por Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna (2008; 2009; 2019) para la evaluación estadística del peligro volcánico.

Otra erupción nominada “Pómez Ocre”, ocurrió hace aproximadamente 5,000 años. Se trata de una erupción tipo pliniana de gran magnitud, la cual se desarrolló en cuatro fases y

cada una se distingue por una actividad eruptiva diferente. La primera fase también conocida como pre-pliniana, que consistió en erupciones de tipo vulcaniana generó CDP por colapso de columna, así como flujos de bloques y ceniza, producto de posibles colapsos de domo.

La fase pliniana inicial, consistió en explosiones freatomagmáticas que desarrollaron CDP de forma radial hasta 7 km del cráter. En esta fase ocurrió una alta fragmentación de materiales densos que obstruyeron el conducto del cráter antes de la siguiente fase de la erupción. La fase pliniana principal generó una columna eruptiva que alcanzó los 30 km de altura, además de que los depósitos expulsados de ceniza cubrieron una distancia de alrededor de 493 Km² con espesores de ceniza de hasta 10 cm, sin contar los CDP que se generaron en un radio de 5-10 km (Arana-Salinas *et al.*, 2010).

2.3. El volcán Ceboruco

El volcán Ceboruco ubicado en el estado de Nayarit, tiene una altura de 2,200 m sobre el nivel del mar. Se trata de un estratovolcán andesítico-dacítico del cuaternario tardío, localizado sobre Graben Tepic-Zacoalco por el oeste de la FTV (Nelson, 1986, Frey *et al.*, 2004; Sánchez *et al.*, 2009; Espinasa-Pereña, 2018). El volcán está conformado por dos calderas concéntricas, el domo exterior y la más antigua que tiene aproximadamente 3.7 km de diámetro, resultado de una erupción pliniana. El caso de la caldera interna fue producto del colapso del domo de acuerdo con Frey *et al.* (2004).

El Ceboruco ha estado activo desde el Pleistoceno tardío teniendo importante actividad volcánica. La más significativa y la que se analizará en este artículo es la erupción tipo pliniana de Jala en el año 1060 ± 55 años A.P. En Espinasa-Pereña (2018) se menciona la presencia de

pobladores en la zona que fueron testigos de la erupción, por lo que es una parte esencial de la historia volcánica regional, pues al menos un área de 560 km² fue devastada.

En promedio, cada 143 años se han observado muestras de actividad eruptiva en los últimos 1000 años (Sieron *et al.*, 2019). La erupción volcánica de Jala no está ampliamente documentada, sin embargo, se estima un Índice de Explosividad Volcánica igual a 6 (Sieron *et al.*, 2019). En general los flujos son mayoritariamente de origen lítico por lo que se probarán valores similares en la densidad y viscosidad, a los utilizados en la modelación de CDP en el Volcán de Colima.

Su actividad eruptiva geológica y la amplia gama de estilos de erupción que presenta el Volcán Ceboruco, nos indica que es de gran importancia su estudio y análisis por dos factores importantes: el primero es la escasa referencia bibliográfica sobre la actividad histórica del volcán, considerado uno de los más activos en México, a pesar de su inactividad explosiva y efusiva desde 1870. Segundo, es considerado dentro de los volcanes más peligrosos en México, según el Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. No obstante, actualmente presenta escaso equipo de monitoreo por parte de las autoridades regionales y nacionales. De ahí la importancia de nuestra investigación sobre dicho volcán.

3. Metodología

A continuación, se presenta la metodología desarrollada para el presente artículo. En la primera sección se discute el funcionamiento básico del modelo Volcflow. Posteriormente, en la sección 3.2 se describen las variables utilizadas para su aplicación a las CDP en el Volcán de Colima, Popocatepetl y Ceboruco. Finalmente, la sección 3.3 describe, de igual manera, los da-

tos de entrada necesarios para la simulación de avalanchas de escombros en eventos del Volcán de Colima.

3.1. Modelo de VolcFlow en MATLAB

Existen diversos modelos numéricos para la simulación de fluidos como son las avalanchas volcánicas, CDP, entre otros, que facilitan estimar el riesgo por medio de análisis de eventos históricos (Carey y Sigurdsson, 1986; Schilling 1998; Kelfoun y Druitt, 2005; Saucedo *et al.*, 2005; Huggel *et al.*, 2008; Sieron *et al.*, 2019). No obstante, dichas herramientas se encuentran limitadas en las variables dinámicas y reológicas complejas de determinar directamente como son la densidad, la viscosidad, el volumen del material expulsado, coeficiente de fricción, etc. En este sentido, el código desarrollado en Matlab por Kelfoun y Druitt, (2005) permite simular diversos flujos de densidad controlada utilizando ecuaciones de equilibrio de masa y momento:

$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0$	(1)
$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gbsin\alpha_x - \frac{1}{2}K_{actpass} \frac{\partial}{\partial x}(gh^2cos\alpha) + \frac{T_x}{\rho}$	(2)
$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hvu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) = gbsin\alpha_y - \frac{1}{2}K_{actpass} \frac{\partial}{\partial y}(gh^2cos\alpha) + \frac{T_y}{\rho}$	(3)

donde h es el espesor del flujo, (x, y) son las coordenadas del plano horizontal, t es el grid del tiempo, $\mathbf{u}(u, v)$ la velocidad del flujo, α el ángulo de la pendiente, g es la gravedad, ρ es la densidad volumétrica que controla el fluido a determinar; para CDP y avalanchas de escombros tomará valores distintos. Asimismo, la tensión (T) sobre la base del flujo varía de acuerdo con la reología. El término $K_{actpass}$ es el coeficiente de presión que está en función de los ángulos interno y basal (Kelfoun y Druitt, 2005; Kelfoun, 2009).

Las ecuaciones de conservación de momento y masa, consideran el sistema cerrado. Es decir, no se introduce material por fuente externa durante el proceso de simulación. Las ecuaciones son similares a las utilizadas por Costa y Macedonio (2005) sin la dependencia de temperatura en el fluido homogéneo e incompresible. El algoritmo, además, ha mostrado su capacidad óptima de reconstruir estados de eventos históricos de forma eficiente (Kelfoun y Druitt, 2005; Cárdenas-Quiroga *et al.*, 2013; Kelfoun y Vargas; 2015; Vásquez *et al.*, 2016). Usando la herramienta de simulación es posible definir y delimitar probables zonas de riesgo expuesta sobre volcanes activos.

3.2. Modelación de Corrientes de Densidad Piroclástica

Para las simulaciones en las CDP se requiere establecer diversos parámetros que controlan el comportamiento del fluido (coeficientes reológicos), alcance y espesores de masa o volumen. Para el caso del Volcán de Colima se tomaron eventos relativamente contemporáneos donde se produjeron CDP como fue durante la crisis del 20 enero de 1913 así como el evento de 10 y 11 de julio de 2015. Para ambos eventos se obtuvieron los coeficientes de fricción basal (Delta_Bed), calculado con la altura del depósito H entre la longitud del depósito L (H/L) y coeficientes de fricción interna (Delta_Int) o ángulo de reposo para 1913 (Saucedo *et al.*, 2019; 2015; Macorps *et al.*, 2018).

Una de las variables más importantes es la densidad, la cual es fundamental en el movimiento de los flujos. En este caso se utilizó la misma densidad, ρ , para los dos modelos siendo de 1580 kg/m^3 (Varley *et al.*, 2019; Marcorps *et al.*, 2018). También se tomó en cuenta la viscosidad, μ , para ambos casos, además de la rapidez

y alcance de los flujos simulados. El tiempo de simulación (T_{max}) se tomó de 2600s para 1913 y 1600s para 2015 ajustándolo con base en ensayo y error, con el fin de observar la distancia máxima de las CDP. Además de que se fijó un tiempo de muestreo (Dt) con el cual evitar errores en el software que resultaran en volúmenes negativos. La [tabla 1](#) ilustra los datos de entrada en la simulación para cada evento.

Por último, se obtuvo el valor del volumen total de las CDP generados por los dos eventos. En el caso del evento de 1913 se encontró que el volumen total fue de $0.239 \text{ Km}/\text{m}^3$ (DRE) resultado de la erupción pliniana que con la suma de sus tres fases eruptivas se obtuvo el valor del volumen total (Varley *et al.*, 2019). Considerando el caso del evento del colapso de 2015 los volúmenes encontrados fueron menores de $0.0024 \text{ Km}/\text{m}^3$. Este último es un valor relevante pero inferior considerando las magnitudes y alcances de ambos eventos.

Para la simulación del Popocatepetl se necesitaron parámetros reológicos que complementan el código de simulación con los cuales se generará el comportamiento y movimiento de las CDP en el software. Los datos que se utilizaron fueron recopilados de investigaciones previas enfocadas a la erupción Ocre Pómez (Arana-Salinas *et al.*, 2010; Del Pozzo *et al.*, 2017), en los cuales los parámetros reológicos fueron los siguientes: Ángulos de fricción Interno y Externo fueron obtenidos en Del Pozzo *et al.*, (2017). De igual manera se calculó la densidad, la cual, a diferencia de este parámetro en el Volcán de Colima, es más baja, ya que los depósitos de este evento fueron mayoritariamente de pómez en relación con líticos.

La densidad fue estimada por medio del promedio ponderado de la relación de roca pómez y líticos usando la siguiente ecuación, siendo y corresponde al peso ponderado del 90% de roca pómez y al 0.1 o 10% del porcentaje de líticos,

de acuerdo con Robin y Boudal, (1987). Por lo cual dio como resultado una densidad de $809 \text{ kg}/\text{m}^3$. Por otro lado, los tiempos de simulación y muestreo para el Popocatepetl, fueron igualmente los utilizados en el evento de 1913. La [tabla 1](#) muestra los parámetros de entrada para CDP para cada uno de los eventos.

El volumen total de la erupción de flujo de Pómez Ocre fue de $5 \text{ km}/\text{m}^3$ de acuerdo con Arana-Salinas *et al.* (2010). Este volumen abarca todos los demás depósitos además de las CDP, como el de caída, $4.9 \text{ kg}/\text{m}^3$, de las oleadas, $0.0015 \text{ kg}/\text{m}^3$ y el volumen de los flujos $0.1 \text{ kg}/\text{m}^3$. Nuestros resultados fueron comparados con el análisis de Del Pozzo *et al.* (2017), con la finalidad de observar diferencias y similitudes de ambos modelos.

Para el volcán Ceboruco, se han reportado valores muy diferentes para este dato, por ello se optó por realizar un modelo inverso para la estimación del volumen de los parámetros. Hemos estimado el volumen total emitido en dicho evento, considerando un método de prueba y error. Para ello se utilizaron diversos valores para el volumen total de la CDP observando su alcance, orientación y espesor reportado por otros autores (Nelson, 1986; Sieron *et al.*, 2019). Por ejemplo, Sieron *et al.*, (2019) utilizaron un valor desde 0.5 hasta 1 km^3 . Nelson (1986) reportó un volumen fue de $3\text{-}4 \text{ km}^3$. Este último indica que las zonas de alcance fueron Jala, Marquezado, Ahuacatlán. Para la simulación del evento pliniano “Jala” del año 1060 ± 55 años A.P de Ceboruco, utilizamos un MED del con resolución de 15 m obtenido del INEGI.

3.3. Modelación de avalanchas volcánicas

Los parámetros utilizados para la modelación de avalanchas volcánicas en Colima fueron los

TABLA 1. Datos de entrada para la simulación de las CDPs con Software VolcFlow para Volcán de Colima de 1913 (a) y 2015(b), Ceboruco (Jala) y Popocatépetl (Pomez Ocre). Referencias indicadas entre paréntesis en la tabla correspondientes a: 1. Saucedo *et al.* (2019); 2. Marcorps *et al.* (2018); 3. Arana-Salinas *et al.* (2010); 4. Del Pozzo *et al.* (2017); 5. Sieron *et al.* (2019). Algunos datos son considerados con valor estándar como la aceleración de la gravedad de 9.81m/s^2 .

Variable	VDEC (a)	VdeC (b)	Ceboruco	POPOCATÉPETL	Descripción
Delta_Int	0	0	35° (5)	30° (4)	Ángulo interno
Delta_Bed	24° (1)	11° (2)	8°-12° (5)	7° (4)	Ángulo de lecho
Cohesión	0	0	0	0	Fuerza por unidad de superficie (Pa)
	0.01	0.01	0.01	0.01	Viscosidad (Pa/s)
	0.01	0.01	0.01	0.01	Fuerza de turbulencia (N)
	1580(1)	1580(2)	1500	simulado	Densidad (Kg/m^3)
Dt	0.1	0.1	0.1	0.1	Tiempo de muestreo (s)
Dtplot	1	1	1	1	Tiempo de ploteo del DEM
Tmax	2600	1600	2600	2600	Duración de la simulación (seg)
Volumen	0.239 (1)	0.0077(2)	Simulado	0.007(3)	Volumen de la Erupción (km^3)

siguientes: el parámetro de volumen es de 2.3 km^3 (Roverato y Capra, 2013), el parámetro de densidad utilizado es de $2,747.19\text{ kg/m}^3$ (Cárdenas-Sánchez *et al.*, 2021) para la densidad masiva (también conocida como *bulk density*) se usaron datos densidad y porosidad publicados por Farquharson *et al.* (2015).

El parámetro de Fuerza de turbulencia (Ft) el cual incluye la velocidad del flujo, densidad, viscosidad y las posibles fuentes de resistencia (Benjamin, 2014), se obtuvo de (Kelfoun, 2009). El parámetro Basal Fricción (Delta_Int) es un promedio del ángulo de limo y arcilla, que se calculó manualmente (Roverato y Capra, 2013), ángulo de fricción (Delta_Bed) = H/L , donde H es la altura vertical del depósito y L la longitud del depósito y la cohesión proviene del libro de Cortes *et al.* (2019). El tiempo de modelación (Tmax) fue de 9,000 segundos. El muestreo (Dt) se fijó en una muestra por cada 2 segundos (tabla 2).

4. Resultados y Discusión

4.1. Volcán de Colima

4.1.1. Modelación de CDP del evento Plinianico de 1913 y del colapso de domo del 10-11 de julio de 2015

El modelo del evento de 1913 generó gran cantidad de material expulsado sobre las barrancas principales como: La lumbre, Córdoba, San Antonio, Montegrande, Muerto, Santa Ana y la Arena. Nuestra simulación representó adecuadamente diversos depósitos de flujo que alcanzaron hasta 10 km de distancia sobre las poblaciones próximas como son la comunidad de La Joya, Quesería, Rancho el Jabalí y Yerbabuena, asemejándose a los resultados de Saucedo *et al.* (2005), con diferencias en la distribución de las CDP (figura 1). Además de que las velocidades obtenidas eran más grandes de 160-90 m/s en algunas zonas a diferencia de los 100-50 m/s reportados por Saucedo *et al.* (2005), pero mos-

TABLA 2. Datos para simulación de avalanchas de escombro para el Volcán de Colima (Tonila: y San Marcos). Referencias indicadas entre paréntesis en la tabla correspondiente a: 1. D Cárdenas-Sánchez *et al.* (en prep.); 2. Cortes *et al.* (2019); 3. Roverato y Capra (2013); 4. Kelfoun (2009).

	Tonila	San Marcos	Descripción de parámetros
Parámetro:	Valor:	Valor:	Descripción:
ρ	2747.19(1)	2747.19(1)	Densidad (kg/m ³)
μ	500	500	Viscosidad (Pa/s)
Cohesión	0.03(2)	0.03(2)	Fuerza por unidad de superficie (Pa)
Delta_Int	22° (3)	22° (3)	Ángulo interno
Delta_bed	28° (3)	28° (3)	Ángulo de lecho
F_t	0.01 (4)	0.01 (4)	Fuerza de Turbulencia (N)
Volumen	2.3(3)	2.3(3)	Volumen (km^3)
Tmax	9,000	9,000	Duración de Simulación (s)
Dt	2	2	Tiempo de muestreo (s)
Dtplot	A los 2 segundos	A los 2 segundos	Tiempo de ploteo del DEM

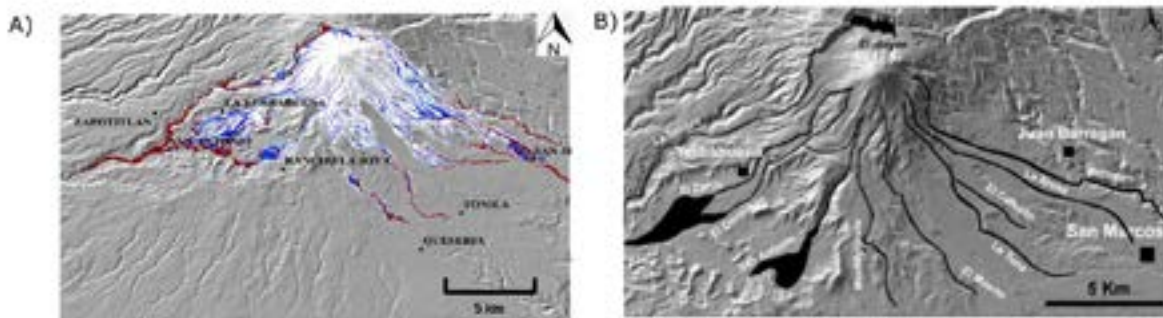


FIGURA 1. Comparación de los flujos simulados en el evento de 1913. A) Corresponde a la simulación con los parámetros indicados en tabla 1, B) Corresponde a la distribución estimada por Saucedo *et al.* 2005 y 2010.

trando la misma zona de riesgo para estos poblados, incluso llegando a dispersarse a mayor distancia, como se observa en la [figura 2](#). Los resultados son de gran utilidad para observar el comportamiento del modelo, el alcance y daño de los flujos a consecuencia de una erupción pliniana similar a la de 1913.

Del resultado de la modelación de 2015 se observó que las CDP se desplazaron por el lado sureste del Volcán de Colima. En la simulación

se observó que los flujos se concentraban en dos barrancas principales con distancias de 10 km en el caso de la barranca de Montegrande y de 8 km en la barranca del muerto. Su comportamiento, deposición y alcance fue muy similar a lo descrito por Capra *et al.* (2016), Reyes-Avila *et al.* (2016) y Macorps *et al.* (2018), [figura 3](#). Se observó además un avance mayor de los flujos sobre la Barranca del muerto a diferencia de los depósitos observados, [figura 3](#). Estos flujos

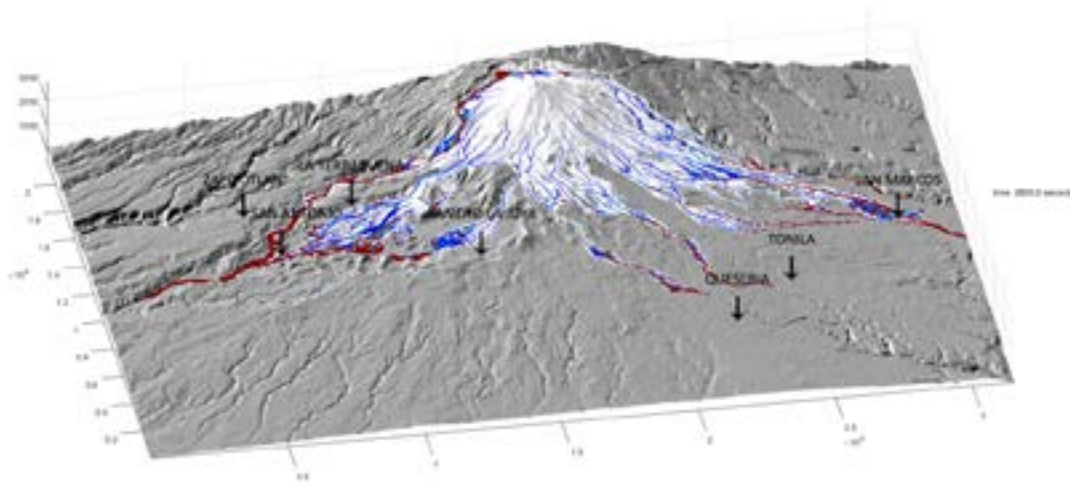


FIGURA 2. Distribución de los depósitos de CDP's del evento eruptivo de 1913 vista 3D. En la imagen se aprecian las principales comunidades que son vulnerables por un evento similar.

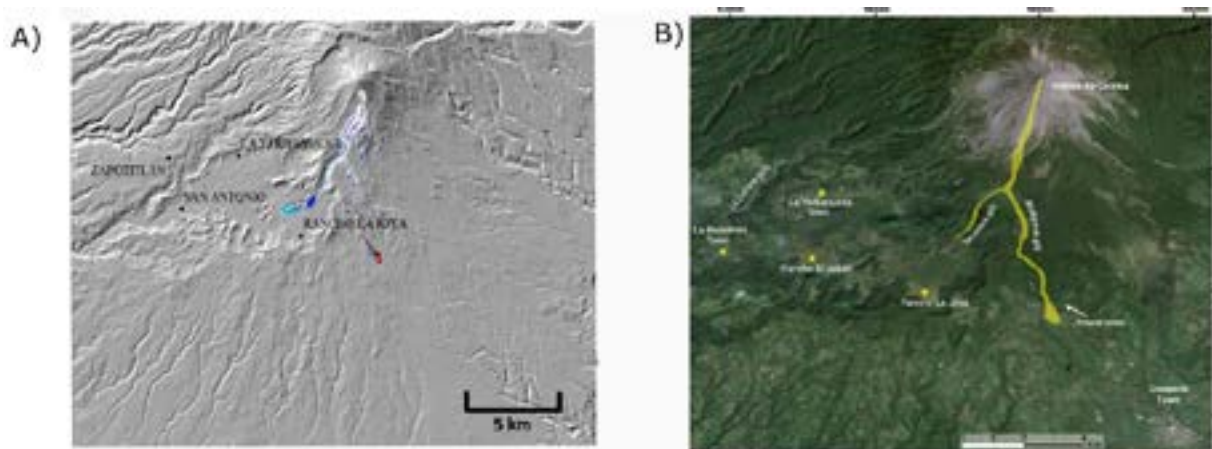


FIGURA 3. Comparación de la distribución de los depósitos del evento de 2015. A) corresponde a los flujos simulados por colapso de domo en el programa VolcFlow, B) corresponde a la localización de los depósitos de CDP de los colapsos de domo (Tomado de Reyes-Dávila *et al.*, 2016).

alcanzaron gran distancia aproximándose a las poblaciones cercanas de Quisería y al Rancho la joya, que cuentan con un número de 9,931 habitantes en conjunto.

Las amenazas de CDP en Colima radican principalmente en las comunidades que se encuentran en un radio de 15-20 km de la cumbre del volcán. Estas comunidades son La Yerba buena, El Jabalí, Rancho la Joya, San Antonio, Quisería, Tonila, San Marcos y la Cofradía. El número de pobladores aproximado es de 17,014 de acuerdo con INEGI (2020). Actualmente, en la zona predomina la actividad agrícola de maíz y caña aprovechando 14,000 hectáreas de terreno que se encuentran a una distancia menor a los 10 km, además, estas mismas fueron parcial o totalmente destruidas durante la crisis de 1913 (Saucedo *et al.*, 2010).

4.1.2. Modelación de la avalancha de escombros de Tonila (mínima de 12,460 ± 70 y máxima 135,585 ± 135 A.P) y San Marcos (23,890 + 1075/-950 A.P)

En la [figura 4](#) se muestra una comparativa con datos obtenidos de Roverato y Capra (2013), correspondiente a la distribución de los depósitos de avalancha de escombros de San Marcos (línea punteada azul) y el depósito de Tonila (la línea punteada Roja) y el resultado de nuestro análisis. La simulación fue similar a los datos observados y modelos con alcance de hasta 43km, con dirección suroeste, sur y sureste, alcanzando las localidades de Tonila, San Marcos y Quisería, con espesores de entre 20 hasta 100 m en algunas partes del evento, [figura 5b](#) y [5c](#). Estas son las localidades más cercanas al volcán.

En las [figuras 5b](#) y [5c](#) se puede observar el paso del evento por las tuberías principales del volcán, las cuales son Montegrande, Los Lobos, la barranca de Beltrán, Platanar y Rosarito, en

dirección al río Naranjo en ambos casos. En la imagen inferior derecha se aprecia el alcance hasta el río Naranjo. Por lo tanto, podemos observar en la comparativa, que el desplazamiento del evento es muy similar. De hecho, nuestra simulación muestra desplazamiento de hasta 15 kilómetros como lo marcan los antecedentes del depósito de San Marcos.

En relación con los datos del depósito de Tonila, se observó un desplazamiento mayor a los 15 kilómetros, similar al de San Marcos. Ambos siguen el desplazamiento hasta el río Naranjo. Existe una ligera diferencia con los datos observados debido a la sensibilidad del modelo relacionado por la diferencia topográfica de la época con el MED utilizado.

En la actualidad un evento similar al de San Marcos y Tonila es una amenaza latente sobre diversas localidades en un radio de 10km a 25km del edificio. En términos de zonas que podrían ser afectadas por un evento similar, se contabilizan 7 municipios de los estados de Jalisco y Colima. En el Estado de Jalisco se encuentran los municipios de Tonila, Zapotiltic, Tuxpan, Zapotitlán de Vadillo, San Gabriel. Para el Estado de Colima tenemos a los municipios de Cuauhtémoc y Comala. En total en estos municipios habitan 145,554 personas según datos de INEGI (2020). Las más relevantes, se encuentran a una distancia aproximada de 14 km del edificio como son Tonila, San Marcos y Quisería, con un total de 24,164 habitantes de acuerdo con INEGI (2020).

Este evento puede cortar la circulación de las vías principales que son la carretera libre Cuauhtémoc-Tonila (54) y la autopista Guadalajara-Colima (54D) por las cuales existe gran paso vehicular y con ello paso de economía. Así como las únicas dos estaciones de combustible ubicadas en el poblado de Quisería, además de clínicas hospitalarias de las localidades correspondientes.

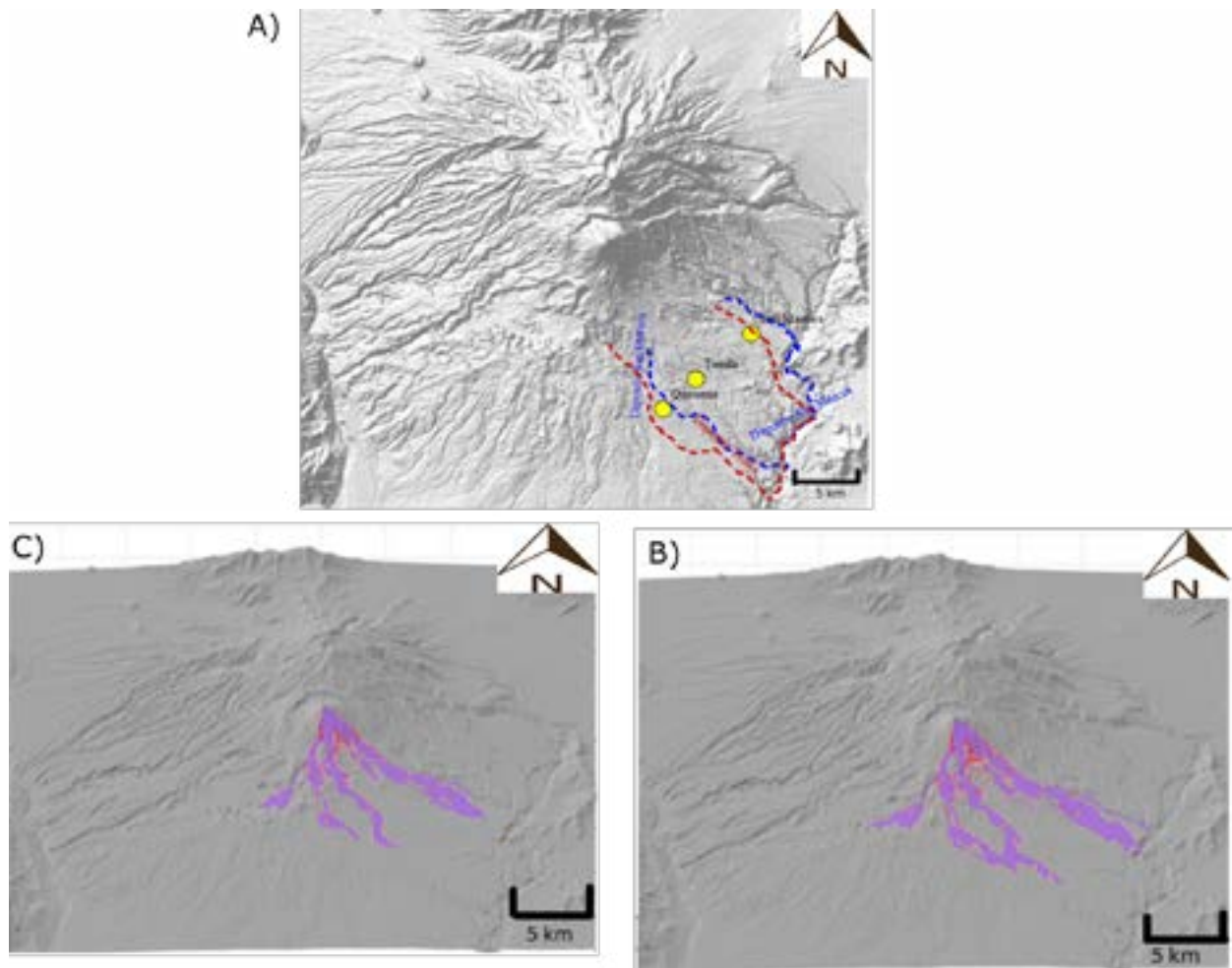


FIGURA 4. Comparación de resultados obtenidos Vs. resultados de (Roverato y Capra, 2013); A) Modelo de Roverato y Capra, (2013) con distribución de población, ajustado a la escala utilizada en el MED utilizado en la simulación; B) Modelación con 9,000 segundos, alcanzado los poblados de Tonila, Quesería y San Marcos, llegando al Río Naranjo; C) Modelación con 6,000 segundos, con su desplazamiento y orientación hacia los poblados de Tonila, San Marcos y Quesería, bajando por las principales barrancas del edificio volcánico.

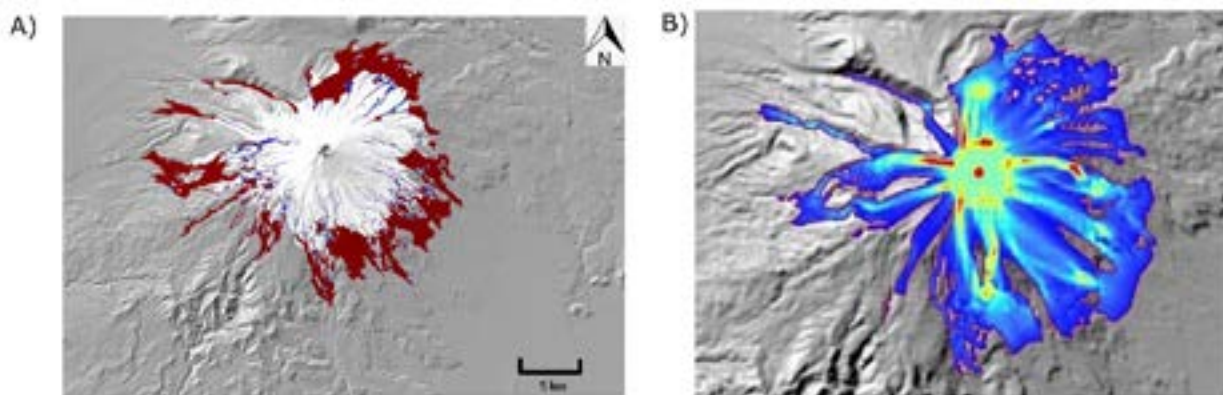


FIGURA 6. Comparación de los dos modelos de la erupción Pómez Ocre. A) corresponde a la simulación propia hecha en el software Volcflow. B) corresponde a la creada en TITAN2D por Del Pozzo *et al.* (2017).

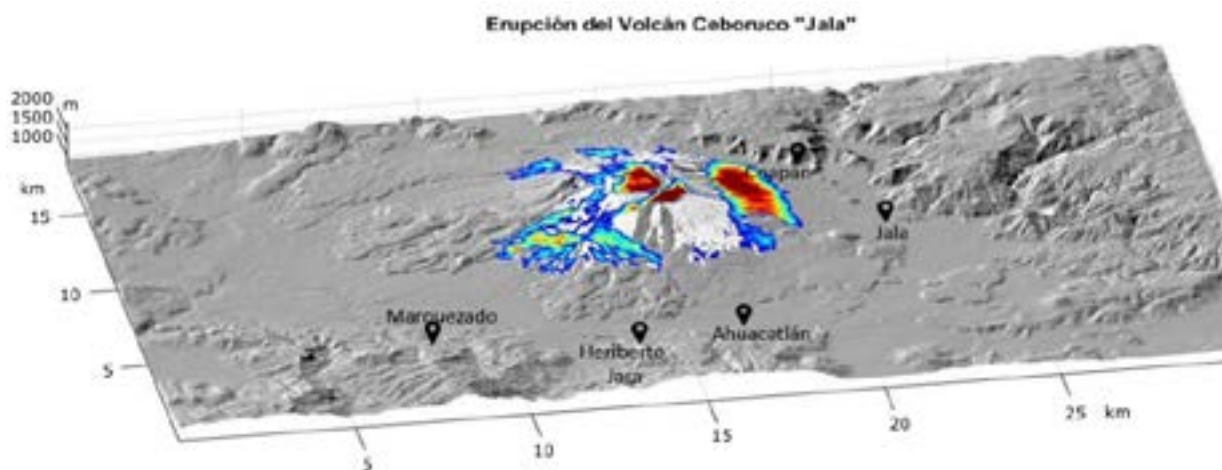


FIGURA 7. Simulación 3D del evento eruptivo Jala del año 1060 ± 55 años A.P, realizada a los 2600 segundos con el programa VolcFlow.

Además, dos importantes autopistas que pasan por la zona la carretera 438D rumbo a Puebla y la 115D rumbo a la Ciudad de México que poseen gran afluencia de vehículos y proveen actividad económica relevante.

4.3. Volcán el Ceboruco

Usando un método de prueba y error sobre el alcance, distribución de espesores y dispersión del área, se obtuvo un volumen de 0.7 km^3 para la erupción de Jala. Utilizamos principalmente

los datos Sieron *et al.* (2019). Los autores utilizaron un rango de valores con volumen de hasta 1 km^3 para el CDP.

La erupción de 1060 ± 55 años A.P. no está ampliamente documentada sobre los coeficientes reológicos, por tanto, se optó por utilizar una densidad de flujo de 1500 kg/m^3 . Lo anterior debido a que el Ceboruco cuenta con una petrología similar al Volcán de Colima (Nelson, 1980 y 1986; Savov *et al.*, 2008). Con ello obtuvimos resultados similares a otros autores en términos de desplazamiento y área de afectación (Sieron *et al.*, 2019) (figura 7). Los CDP pro-

venientes del colapso de la columna eruptiva, se orientaron con una tendencia preponderante hacia el suroeste-noreste. En el área simulada se puede observar cómo el emplazamiento es controlado por la topografía local.

De acuerdo con los resultados de la simulación el área de afectación, de este escenario, sería de 245.24 KM² (figura 7). Dentro de esta área se encuentran las localidades de Ixtlán del Río, San Pedro Lagunillas, Jala, Ahuacatlán, Compostela, Tepic, Santa María del Oro, Coapan y Marquezado. En total estas localidades representan a más de 600,000 habitantes, aproximadamente.

Además, se contabilizó 15,455 hectáreas destinadas a los cultivos de maíz, chile, tabaco y tomate. Otra actividad económica de la zona es la ganadería, en donde hay aproximadamente 151 cabezas de ganado. Además, parte de la infraestructura que podría estar comprometida por un evento similar sería la Autopista Guadalajara-Tepic, la Vía Férrea ubicada al sur del volcán, dos centrales hidroeléctricas, así como 4 hoteles, 25 escuelas, 6 establecimientos de salud, 1 gasolinera, 4 supermercados. Finalmente 3942 viviendas que son las más próximas a el volcán, según el Atlas Nacional de Riesgos del Gobierno de México para el estado de Nayarit.

El tamaño de la topografía del edificio de los volcanes analizados fue proporcional al tiempo de procesamiento donde destaca el Popocatepetl con un tamaño de MED superior al resto. La diferencia de volumen y área de dispersión fue apreciable, inclusive en el procesamiento, potencializando el número de horas de cómputo entre la simulación de cada volcán. Por ejemplo, las simulaciones de CDP para Ceboruco fueron de 8hrs, mientras que para el Volcán de Colima tomaron aproximadamente 24 horas. No obstante, para el Popocatepetl, tomó aproximadamente 5 días continuos.

Debemos mencionar que el procesamiento fue por CPU en paralelo. En este sentido, nuestra meta en un futuro próximo es implementar el código de VolcFlow en vía GPU (Graphic Processing Unit, por sus siglas en inglés), para mejorar la eficiencia en el tiempo de procesamiento. Aunado a lo anterior, se requiere continuar investigando para mejorar la estimación sobre otros coeficientes reológicos como son el coeficiente de viscosidad dinámica y estática para esta clase de flujos, debido a la escasa referencia en la literatura actual.

5. Conclusión

Las simulaciones realizadas en el presente trabajo permitieron identificar el alcance y la dispersión de las avalanchas de escombros y CDP. Parte de nuestra contribución fue implementar el software de VolcFlow en las Avalanchas de Escombros, además de CDP, con resultados equivalentes a los reportados por otros autores. En este contexto, el modelo de ponderación de densidad se ajusta adecuadamente a las simulaciones de los diversos escenarios tanto para las avalanchas volcánicas como las CDP (tabla 1).

Para las CDP en las simulaciones del Volcán de Colima y Ceboruco se utilizó un valor de 1580 y 1500 kg/m³ respectivamente, mientras que para el Popocatepetl fue de 809kg/m³ considerando los 90% de roca pómez y el resto sobre líticos. En el caso de las Avalanchas de Escombros, la densidad utilizada de 2,747.19 kg/m³ y corresponde únicamente la densidad de los líticos del edificio volcánico. Además, nuestra simulación para el volcán Ceboruco mostró que el volumen estimado para la erupción similar a la Jala, fue 0.7km³ con orientación y alcance similares a los reportados por otros autores. En todas las simulaciones, para ambos tipos de

amenazas, los alcances y espesores son parecidos a los reportados por los otros autores.

Al igual que otros autores que han trabajado con VolcFlow, encontramos la problemática del MDE sobre simulaciones de eventos históricos antiguos, tanto para la simulación de CDP como las avalanchas de escombros. Es evidente que la topografía actual es muy diferente a los eventos pasados como los analizados en el presente artículo. A pesar de lo anterior y de la facilidad del VolcFlow sobre modelación en 3D, el software permite identificar las zonas de vulnerabilidad como zonas habitacionales, granjas, cultivos e infraestructura vital como son carreteras, puentes u hospitales civiles que pudieran estar comprometidos por estas amenazas.

Referencias

- ARANA-SALINAS L., Siebe, C. y Macías, J., 2010. Dynamics of the ca. 4965 yr 14C BP “Ochre Pumice” Plinian eruption of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 192(3-4), 212-231.
- ATLAS Nacional de Riesgos. (2016). Gob.mx. Recuperado el 18 de agosto de 2021, de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/mapa-peligros-po-po.html>
- BENJAMIN, J. (2014). Dynamic analysis of long run-out rock avalanches: A view from the Vaigat Strait, West Greenland. Doctoral dissertation, Durham University. pp. 18-21.
- BRANNEY, M. y Acocella, V. 2015. Calderas. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 299-315). Academic Press.
- CAPRA, L., Manea, V.C., Manea, M. Norini, G. 2011. The importance of digital elevation model resolution on granular flow simulations: a test case for Colima volcano using TITAN2D computational routine. *Natural Hazards*, 59: 665-680.
- CAPRA, L., Macías, J. L., Cortés, A., Dávila, N., Saucedo, R., Osorio-Ocampo, S. y Vázquez, R. 2016. Preliminary report on the July 10–11, 2015 eruption at Volcán de Colima: Pyroclastic density currents with exceptional runouts and volume. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 310: 39-49.
- CÁRDENAS Quiroga, E. A., Porras Rodríguez, P. y Morales Martín, L. Y. 2013. Using Volcflow Software to Simulate Pyroclastic Flows from The Cerro Machín Volcano, Tolima, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 2 3(2): 157-172.
- CÁRDENAS-SÁNCHEZ, E. De la Cruz-Reyna, S., Varley, N. 2021. Measurement of thermal conductivity, heat capacity and surface heat transfer: A new cooling model for andesite clast. Manuscrito en preparación.
- CAREY, S. y Sigurdsson, H. 1986. The 1982 eruptions of El Chichón volcano, Mexico (2): Observations and numerical modelling of tephra-fall distribution. *Bulletin of Volcanology*, 48 (2): 127-141.
- CARRASCO-NÚÑEZ, G. 1985. Estudio geológico del volcán Popocatepetl: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería (Doctoral dissertation, tesis profesional, pp. 41. (inédita)).
- CHARBONNIER, S., Germa, A., Connor, C., Gertisser, R., Preece, K., Komorowski, J.-C., ... Connor, L. 2013. Evaluation of the impact of the 2010 pyroclastic density currents at Merapi volcano from high-resolution satellite imagery, field investigations and numerical simulations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261: 295–315.
- COLE, P. D., Neri, A. y Baxter, P. J. 2015. Hazards from pyroclastic density currents. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 943-956). Academic Press.
- COSTA, A. y Macedonio, G. 2005. Numerical simulation of lava flows based on depth-averaged equations. *Geophysical Research Letters*, 32 (5).
- CORTÉS, A., Komorowski, J. C., Macías, J. L., Capra, L., Layer, P. W. 2019. Late Pleistocene-Holocene debris avalanche deposits from Volcán de Colima, Mexico. In *Volcán de Colima* (pp. 55-79). Springer, Berlin, Heidelberg.
- CHERTKOFF, D. G. y Gardner, J. E. 2004. Nature and timing of magma interactions before, during, and after the caldera-forming eruption of Volcán Ceboruco, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146 (6): 715-735.
- DE la Cruz-Reyna, S. 1991. Poisson-distributed patterns of explosive eruptive activity. *Bulletin of Volcanology*, 54 (1): 57-67.
- DE la Cruz-Reyna, S. y Mendoza-Rosas, A. T. 2015. An extreme event approach to volcanic hazard assessment. *Extreme Events: Observations, Modeling, and Economics*, 214, 195.
- DE la Cruz-Reyna, S. y Mendoza-Rosas, A. T. 2016. An Extreme Event Approach to Volcanic Hazard Assessment. Book Editor(s): Mario Chavez, Michael Ghil,

- Jaime Urrutia-Fucugauchi. Book Series: Geophysical Monograph Series Chapter 15 <https://doi.org/10.1002/9781119157052.ch15>
- DEL POZZO, A. M., Ibarquingoitia, M. A., Salinas, L. A., Bonasia, R., Pedol, L. C., Cassata, W., y Ugalde, E. T. 2017. Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatepetl. Monografías del instituto de Geofísica, (22).
- DE VRIES, B. V. W., y Davies, T. 2015. Landslides, debris avalanches, and volcanic gravitational deformation. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 665-685). Academic Press.
- DIETTERICH, H. R., Lev, E., Chen, J., Richardson, J. A., y Cashman, K. V. 2017. Benchmarking computational fluid dynamics models of lava flow simulation for hazard assessment, forecasting, and risk management. *Journal of Applied Volcanology*, 6 (1): 1-14.
- DUFEEK, J., Ongaro, T. E. y Roche, O. 2015. Pyroclastic density currents: processes and models. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 617-629). Academic Press.
- ESPINASA-PEREÑA, R. 2018. Evaluación del riesgo relativo de los volcanes en México. Abstract in VIII Foro Internacional: Los volcanes y su impacto, Arequipa (Perú). <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1441>. Último acceso enero de 2018.
- FARQUHARSON, J., Heap, M. J., Varley, N. R., Baud, P., y Reuschlé, T. 2015. Permeability and porosity relationships of edifice-forming andesites: a combined field and laboratory study. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 297: 52-68.
- FREY, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M. y Delgado-Granados, H. 2004. Magma eruption rates constrained by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology and GIS for the Ceberuco-San Pedro volcanic field, western Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 116 (3-4): 259-276.
- GLOBAL Volcanism Program, 2013. *Volcanoes of the World*, v. 4.10.1. Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. Downloaded 20 Aug 2021. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>.
- GÓMEZ-VÁZQUEZ A., De la Cruz-Reyna S., Mendoza-Rosas A. T. 2016. The ongoing dome emplacement and destruction cyclic process at Popocatepetl volcano, central Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 78:58.
- HOBLITT, R. P., Miller, C. D. y Vallance, J. W. 1981. Origin and stratigraphy of the deposit produced by the May 18 directed blast. In *The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington* (Vol. 1250, pp. 401-419). US Government Printing Office Washington, DC.
- HUGGEL, C., Schneider, D., Miranda, P. J., Granados, H. D. y Kääb, A. 2008. Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: a case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170 (1-2): 99-110.
- INEGI. Censo de Población y Vivienda. 2020. Descargado el 3 de mayo del 2021, Nayarit.
- INSTITUTO Nacional de Estadística y Geografía. 2020. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx>
- KELFOUN, K. 2009. VolcFlow simulation of Volcanic Flows. Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Fd (OPGC), Université Blaise Pascal. Francia.
- KELFOUN, K. 2011. Suitability of simple rheological laws for the numerical simulation of dense pyroclastic flows and long-runout volcanic avalanches. *Journal of Geophysical Research*, 116: 1-14
- KELFOUN, K. y Druitt, T. H. 2005. Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B12).
- KELFOUN, K. y Vargas, S. V. 2015. VolcFlow capabilities and perspectives of development for the simulation of lava flows. Harris, AJL, De Groeve, T., Garel, F. y Carn, SA (eds) *Detecting, Modelling and Responding to Effusive Eruptions*. Geological Society, London, Special Publications, 426.
- KELFOUN, K. y Vargas, S. V. 2016. VolcFlow capabilities and potential development for the simulation of lava flows. Geological Society, London, Special Publications, 426 (1): 337-343.
- LUHR, J. F. y Prestegard, K. L. 1988. Caldera formation at Volcán Colima, Mexico, by a large large holocene volcanic debris avalanche. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35 (4): 335-348.
- MACÍAS, J. L. 2006. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57 (3): 379-424.
- MACÍAS, J. L., Arce, J. L., García-Tenorio, F., Sosa-Ceballos, G. y Gardner, J. E. 2020. Source and behavior of pyroclastic density currents generated by Vulcanian-style explosions of Popocatepetl volcano (Mexico) on 22 January 2001. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 406, 107071.
- MACORPS, E., Charbonnier, S. J., Varley, N. R., Capra, L., Atlas, Z., y Cabré, J. 2018. Stratigraphy, sedimentology and inferred flow dynamics from the July 2015 block-and-ash flow deposits at Volcán de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349: 99-116.

- MANZELLA, I., Makris, S., Di Traglia, F., Kelfoun, K., Cole, P., Casalbone, D. y Chiocci, F. L. 2021. Numerical modelling of tsunamis generated by mass flows at Stromboli Volcano. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU21-11042).
- MENDOZA-ROSAS, A.T. y De la Cruz-Reyna, S. 2008. A Statistical Method Linking Geological and Historical Eruption Time Series for Volcanic Hazard Estimations: Applications to Active Polygenetic Volcanoes. *Journal of Volcanological and Geothermal Research*, 176 (2): 277–290.
- MENDOZA-ROSAS, A. T., y Cruz-Reyna, S. (2009). A mixture of exponentials distribution for a simple and precise assessment of the volcanic hazard. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 425–431.
- MENDOZA-ROSAS, A. T., Gómez-Vázquez, Á. y De la Cruz-Reyna, S. 2017. Statistical analysis of the sustained lava dome emplacement and destruction processes at Popocatepetl volcano, Central México. *Bulletin of Volcanology*, 79 (6): 43.
- MENDOZA-ROSAS, A. T. y De la Cruz-Reyna, S. 2019a. A mixture of exponentials distribution for a simple and precise assessment of the volcanic hazard, *Natural Hazards Earth System Sciences*, 9: 425–431, <https://nhess.copernicus.org/articles/9/425/2009/>.
- MENDOZA-ROSAS, A. T. y De la Cruz-Reyna, S. 2019b. Hazard assessment of the ongoing lava dome eruption at Popocatepetl volcano from the statistical analysis of significant explosive events in the period of 1997 to 2016. *Geofísica Internacional* 58-1: 33-48.
- MUÑOZ-SALINAS, E., Castillo, M., Franco-Ramos, O., Arce, J. L., Sanderson, D. C. W., y Cresswell, A. C. 2020. Assessing paraglacial processes at Nexpayantla Gorge (Popocatepetl volcano, Central Mexico) using OSL and ¹⁴C. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45 (11): 2450-2462.
- NELSON S. A. 1980. Geology and petrology of Volcán Ceboruco, Nayarit, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 91: 2290–2431.
- NELSON, S. A. 1986. Geología del Volcán Ceboruco, Nayarit, con una estimación de riesgos de erupciones futuras. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 6 (2): 243-258.
- REYES-DÁVILA, G. A., Arámbula-Mendoza, R., Espinasa-Pereña, R., Pankhurst, M. J., Navarro-Ochoa, C., Savov, I. y Domínguez-Reyes, T. 2016. Volcán de Colima dome collapse of July, 2015 and associated pyroclastic density currents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 320: 100-106.
- ROBIN, C. 1984. Le Volcan Popocatepetl (Mexique): structure, evolution pétrologique et risques. *Bulletin Volcanologique*, 47 (1): 1-23.
- ROBIN, C. y Boudal, C. 1987. A gigantic Bezymian-type event at the beginning of modern volcan Popocatepetl. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31 (1-2): 115-130.
- ROVERATO M. y Capra L. 2013. Roverato, M., y Capra, L. Indicadores micro-texturales de dos depósitos de avalancha de escombros del Volcán de Colima (México): mecanismos de transporte y emplazamiento. Resumen de Unión de Geofísica Mexicana. Disponible en: (5) (PDF) Indicadores micro-texturales de dos depósitos de avalancha de escombros del Volcán de Colima (México): mecanismos de transporte y emplazamiento (researchgate.net)
- SÁNCHEZ J. J., Núñez-Cornú F. J., Suárez-Plascencia C., Trejo-Gómez E. 2009. Seismicity at Ceboruco Volcano, México. *Seismic Research Letters*, 80: 823–830
- SAUCEDO, R., Macías, J. L., Gavilanes-Ruiz, J. C., Bursik, M. I., y Vargas-Gutiérrez, V. 2019. Pyroclastic density currents at volcán de Colima. In *Volcán de Colima* (pp. 111-139). Springer, Berlin, Heidelberg.
- SAUCEDO, R., Macías, J. L., Gavilanes, J. C., Arce, J. L., Komorowski, J. C., Gardner, J. E. y Valdez-Moreno, G. 2010. Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of volcanology and geothermal research*, 191 (3-4): 149-166.
- SAUCEDO, R., Macías, J. L., Gavilanes, J. C., Arce, J. L., Komorowski, J. C., Gardner, J. E., y Valdez-Moreno, G. 2010. Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of volcanology and geothermal research*, 191 (3-4): 149-166.
- SAUCEDO, R., Macías, J. L., Sheridan, M. F., Bursik, M. I. y Komorowski, J. C. 2005. Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcano, Mexico: implications for hazard assessment. *Journal of volcanology and geothermal research*, 139 (1-2): 103-115.
- SAVOV, I. P., Luhr, J. F. y Navarro-Ochoa, C. 2008. Petrology and geochemistry of lava and ash erupted from Volcán Colima, Mexico, during 1998–2005. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 174 (4): 241-256.
- SCHILLING, S. P. 1998. LAHARZ: GIS programs for automatic delineation of lahar hazard zones. US Geological Survey Open-File Report, 98-638.
- SHERIDAN, M., Hubbard, B., Bursik, M., Abrams, M., Siebe, C., Granados, H. 2001. Gauging Short-Term

- Volcanic Hazards at Popocatepetl. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 82 (16):185-189.
- SHIEH, C. L., Jan, C. D. y Tsai, Y. F. 1996. A numerical simulation of debris flow and its application. *Natural Hazards*, 13 (1): 39-54.
- SIEBE, C., Salinas, S., Arana-Salinas, L., Macías, J. L., Gardner, J., y Bonasia, R. 2017. The ~ 23,500 y 14C BP White Pumice Plinian eruption and associated debris avalanche and Tochimilco lava flow of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 333: 66-95.
- SIERON, K., Ferrés, D., Siebe, C., Capra, L., Constantinescu, R., Agustín-Flores, J., Groppelli, G. 2019a. Ceboruco hazard map: part I-definition of hazard scenarios based on the eruptive history. *Journal of Applied Volcanology*, 8(1): 1-22.
- SIERON, K., Ferrés, D., Siebe, C., Constantinescu, R., Capra, L., Connor, C., Zuccolotto, K. G. 2019b. Ceboruco hazard map: part II—modeling volcanic phenomena and construction of the general hazard map. *Natural Hazards*, 96 (2): 893-933.
- SIGURDSSON, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., y Stix, J. (Eds.). 2015. *The encyclopedia of volcanoes*. Elsevier.
- SOSIO, R., Crosta, G. B. y Hungr, O. 2012. Numerical modeling of debris avalanche propagation from collapse of volcanic edifices. *Landslides*, 9 (3): 315-334.
- VARLEY N. 2017. Volcanoes of Mexico. In: Meyers RA (ed) *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer, New York, NY, ISBN 978-1-4419-0852-0.
- VARLEY N. R., Cernas J. A., García A., López Z., Meza M.I. 2017. Identificación de amenazas, peligros, vulnerabilidad y riesgos ante fenómenos geológicos - Vulcanismo. In: *Atlas de Riesgos Estatal de Colima*. Universidad de Colima, Protección Civil del Estado de Colima, Colima.
- VARLEY N.R. 2019. Monitoring the Recent Activity: Understanding a Complex System. In: Varley N., Connor C., Komorowski J.C. (eds) *Volcán de Colima. Active Volcanoes of the World*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25911-1_12
- VARLEY, N.R, Connor, C. B., y Komorowski, J. C. (Eds.). 2019b. *Volcán de Colima: Portrait of a Persistently Hazardous Volcano*. Springer.
- VÁSCONEZ, F., Vásconez, R., y Mothes, P. 2016. Reconstrucción de los flujos de lodo del volcán Carihuirazo originados por el terremoto de 1698 utilizando el código VolcFlow. *Tectonics*, 35 (5): 1249-1279.
- YOKOYAMA, I. y De la Cruz-Reyna, S. 1990. Precursory earthquakes of the 1943 eruption of Parícutin volcano, Michoacan, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44 (3-4): 265-281.