



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFISICA

PROCESO ACTUAL DE EMPLAZAMIENTO Y DESTRUCCION
DE DOMOS EN EL VOLCAN POPOCATEPETL

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL TITULO DE
DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA

ANGEL GOMEZ VAZQUEZ

Tutor

DR. SERVANDO DE LA CRUZ REYNA
Instituto de Geofisica UNAM

Comité Tutorial

Dr. Carlos Miguel Valdés González
Instituto de Geofisica UNAM

Dr. José Luis Macías Vázquez
Instituto de Geofisica Campus Morelia UNAM

Ciudad Universitaria, Abril de 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Dedicó esta tesis a los dos grandes
acompañantes de mi vida: a mi amada esposa
Gloria por su paciencia y amor y a nuestro
hijo Jorge Angel.
A dios que nos permite seguir en este
camino juntos.*

Dedico este trabajo a la memoria de mis padres Jesús, y Glafira y la de mi hermano Francisco. Nos faltó vivir momentos juntos, pero a pesar de la ausencia física, sé que estarían orgullosos de este objetivo cumplido.

Este trabajo esta dedicado de manera muy especial a toda mi familia. Gracias por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de su comunidad.

Al Popocatepetl por dejarme extraer de su majestuosidad conocimiento nuevo.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres por la información para la realización de esta tesis.

Al Dr. Servando de la Cruz por la guía recibida durante estos años de trabajo.

Al CONACYT por los recursos otorgados mediante la beca numero 230925

A la DGAPA mediante el proyecto No. IN109616 por su apoyo para la realización de esta tesis.

INDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 7 |
| ABSTRACT..... | 8 |
| CAPITULO 1. Contexto de la actividad del volcán Popocatepetl..... | 9 |
| 1.1. Marco geológico del volcán Popocatepetl..... | 9 |
| CAPITULO 2. Evolución morfológica en el cráter del Popocatepetl previa a 1994 y estimación de producción de lava de 1919-1927..... | 16 |
| CAPITULO 3.- Metodología de cálculo de Volúmenes de los domos emplazados en el Popocatepetl..... | 20 |
| CAPITULO 4. Secuencia de las fases de emplazamiento y destrucción de los domos en el Popocatepetl de marzo de 1996 a febrero de 2015..... | 28 |
| CAPITULO 5.- Regimenes, tasas de extrusión y volúmenes de los domos de lava en el Popocatepetl..... | 60 |
| 5.1. Regímenes del emplazamiento de los domos en el Popocatepetl de marzo de 1996 a febrero de 2015..... | 60 |
| 5.2 Tasas promedio de extrusión de lava de largo plazo durante los regímenes de emplazamiento de domos..... | 63 |
| 5.3 Volúmenes y tasas de extrusión de corto plazo (Instantaneas) de los domos emplazados durante los regímenes | 64 |
| CAPITULO 6.- Estadística general de los tiempos de emplazamiento, volúmenes y espesores de los domos..... | 66 |
| 6.1. Volúmenes de lava | 68 |
| 6.2 Espesores de los domos..... | 69 |

| | |
|---|-----|
| CAPITULO 7.- Discusión y conclusiones generales del proceso de emplazamiento y destrucción de domos en el Popocatépetl..... | 71 |
| CAPITULO 8.- Estudios futuros: Correlaciones de algunos otros parámetros geofísicos con el emplazamiento y destrucción de domos | 80 |
| 8.1. Deformaciones superficiales..... | 80 |
| Reflexiones finales y recomendaciones..... | 83 |
| Referencias..... | 85 |
| Anexo 1. Catálogo de fórmulas para el cálculo de los volúmenes de los domos utilizados en este estudio | 94 |
| Anexo 2. Notas complementarias para el cálculo de los volúmenes de los domos de lava emplazados en el cráter del volcán Popocatépetl..... | 97 |
| A.2.1. Fotogrametría analógica..... | 97 |
| A.2.2. Fotogrametría digital..... | 100 |
| A.2.3. Anaglifos..... | 101 |
| Anexo 3. Identificación de domos emplazados mediante mediciones de deformación con EDM y señales sísmicas (tremor y LP's)..... | 102 |
| A.3.1. EDM..... | 102 |
| A.3.2. Tremor y eventos de largo período (LP's)..... | 106 |
| Anexo 4. Tabla 1. Descripción de algunos de los parámetros asociados con el emplazamiento y destrucción de los domos en el Popocatépetl | 111 |
| Anexo 5. Tabla 2. Domos promedio emplazados y tasas de extrusión del magma para los cinco regímenes propuestos..... | 114 |

| | |
|---|-----|
| Anexo 6. Tabla 3. Distribución de frecuencia de los volúmenes de los domos | 115 |
| Apendice 1. Artículo 1: The ongoing dome emplacement and destruction process at popocatépetl volcano, central Mexico..... | 116 |
| Apendice 2. Artículo 2: Statistical analysis of the sustained lava dome emplacement and destruction processes at Popocatepetl volcano central Mexico..... | 131 |

RESUMEN

En esta tesis se plantea una revisión puntual de los episodios de emplazamiento y destrucción de domos en el volcán Popocatepetl en el periodo de 1996 a 2015, en el cual se identifican 38 episodios de construcción de domos. Se realiza una comparación con el episodio ocurrido de 1919 a 1927. Se incluye la descripción de los volúmenes y tasas de emplazamiento para cada domo así como un análisis del volumen emitido acumulado, y del acumulado por las pérdidas. Se proponen las definiciones de tiempo de residencia, tasa instantánea de emplazamiento y tasa de período largo de producción de magma. Posteriormente se muestra un análisis estadístico de las series de datos generadas con los datos disponibles obtenidos en este trabajo, como son: volúmenes y espesores de los domos, encontrando que se ajustan bien a una ley de escalamiento exponencial. De allí se elabora un modelo general del proceso de emplazamiento sucesivo de domos y de sus implicaciones en el nivel del riesgo volcánico. Se anexan dos apéndices con los artículos resultados de este proyecto; uno publicado y otro aceptado para publicación con correcciones menores.

ABSTRACT

The ongoing eruptive activity of Popocatepetl volcano has been characterized by emplacement and subsequent destruction of a succession of lava domes. Between the onset of the current eruption in 1994 and the time of this thesis, 38 episodes of lava dome formation and removal have been identified. Each dome has showed particular features related to the magma extrusion process. Among the manifestations, dome-emplacment events have been usually accompanied by relatively low-intensity, protracted explosions referred to as exhalations. After variable times of residence, emplacements have ended in partial or total destruction of the domes by strong vulcanian explosions that produced sizeable ash plumes, with most of them also ejecting incandescent debris onto the volcano flanks. Here, we present a detailed account of the observed activity related to the domes' growth and destruction, related seismic monitoring signals, and morphological features of the domes based on 19 years of visual observations and image analysis. This work, also describes some statistical features of the dome emplacement and destruction sequences, particularly dome volumes and thicknesses. A model for the process of dome growth and destruction and its hazard implications is proposed and discussed. Two appendices are annexed with the articles of this project; One published and other accepted for publication with minor corrections

CAPITULO 1. Contexto de la actividad del volcán Popocatépetl.

1.1. Marco geológico del volcán Popocatépetl

El volcán Popocatépetl es uno de los principales volcanes activos en México (figura 1). Está situado en la parte media de la Faja Volcánica Mexicana, en el extremo meridional de la sierra nevada, cubre una área de 600 km² y se encuentra ubicado en las coordenadas (19.02 N, 96.82 W, y 5452 msnm). El volcán Popocatépetl es un estratovolcán andesítico-dacítico localizado a 60 km al sureste de la ciudad de México y a 45 km al oeste de la ciudad de Puebla. Tiene un cráter en forma de elipse con un eje mayor de ~800 m y ~600 m en su eje menor (figura 2), su edificio abarca parte de los estados de México, Puebla y Morelos (figura 3). Previa a la actual actividad iniciada en 1994, la profundidad desde el labio superior al fondo del cráter era de aproximadamente 480m y desde el labio inferior 260m (figura 2).

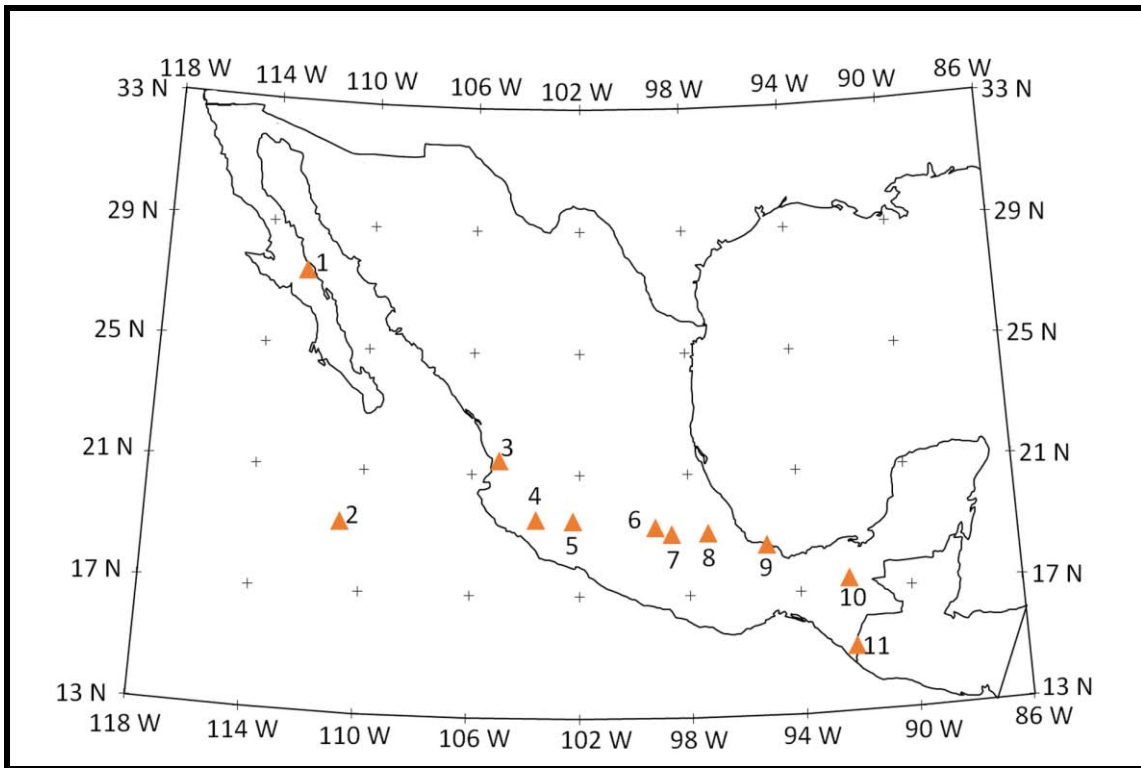


Figura 1. Principales Volcanes activos de México. 1. Tres vírgenes, 2.Barcena, 3.Ceboruco, 4. Colima, 5. Parícutín, 6. Jocotitlán, 7. Popocatépetl, 8. Citlaltépetl, 9. San Martín Tuxtla, 10. El Chichón, 11. Tacaná

En un radio de 40 km alrededor del volcán se encuentran núcleos de población que aglutinan a más de 1 millón de personas, entre ellas la Ciudad de Puebla, y en conjunto algunas ciudades importantes del estado de Morelos; como Cuautla. El volcán forma parte del extremo sur de un conjunto de aparatos volcánicos aglutinados en la llamada “Sierra Nevada”; compuesta por los volcanes: Tláloc, Telapón, Teyotl, Iztaccíhuatl y Popocatépetl (Macías 2005).



Figura 2. Dimensiones principales del cráter del Popocatépetl, previas a la reactivación de 1994.

El nombre que le asignaron los aztecas es del “cerro que humea”, este nombre es probablemente asignado debido a que en los años 1363, 1509, 1512, y 1519-1528, época en la que esta cultura dominaba en el territorio central de Mesoamérica, hoy México en su parte central, lo observaron con actividad frecuente y con una emisión de gas permanente, de ahí esta denominación (De la Cruz-Reyna, 1995, Macias, 2005).

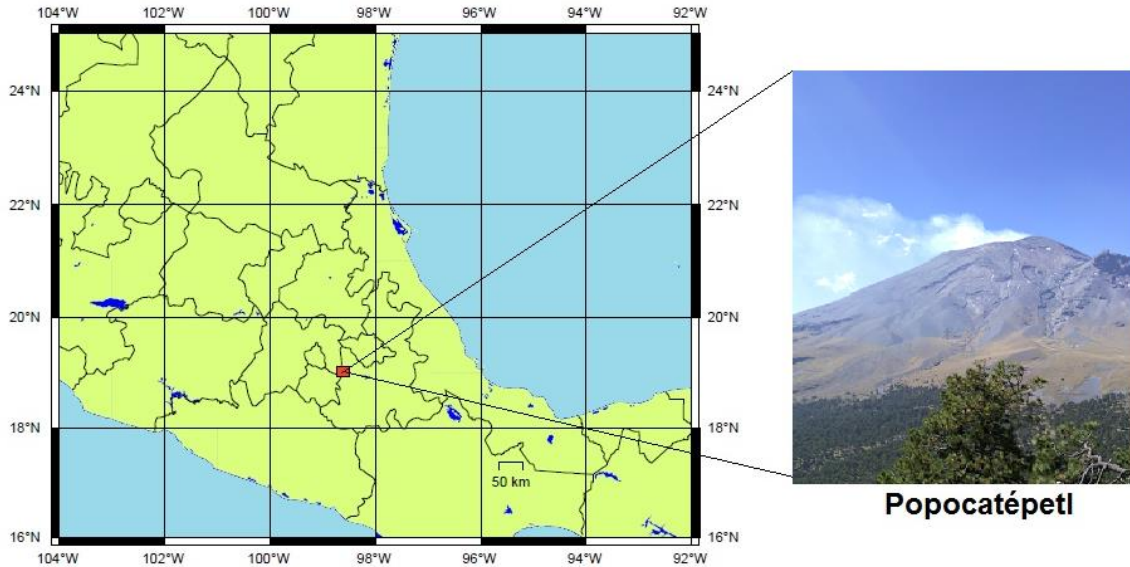


Figura 3. Localización del volcán Popocatépetl

Durante la época de la colonia se producen numerosos escritos donde se relatan algunos episodios de actividad, reportados en crónicas y otros documentos de los años 1530, 1539, 1540, 1548, 1562- 1570, 1571, 1592, 1642, 1663, 1664, 1665, 1697 y 1720 (Macias 2005, De la Cruz-Reyna, et al., 1995)

A raíz de la reactivación del Popocatépetl en 1994, numerosos estudios e investigaciones fueron realizados, los cuales han permitido contar con un mejor detalle de la evolución geológica del Popocatépetl.

En general, en el sitio que hoy ocupa la estructura del Popocatépetl, se formó un primer edificio designado volcán Nexpayantla (Figura 4) (Mooser et al., 1958) o volcán primitivo (Robin, 1984) Una erupción ocurrida hace 200000 años produjo el colapso de una parte de este volcán y la formación de una caldera

(Macias, 2005). Al interior de esta caldera inició la construcción de un nuevo volcán conocido como El Fraile (figura 5). Este último volcán colapsó hace 50000 y 30000 años AP (Boudal y Robin (1989), debido a una erupción tipo Bezymiany, la cual destruyó la parte sur-suroeste del volcán. Después de este evento, en esa misma zona comenzó la construcción del cono moderno conocido como Popocatepetl. Posteriormente hace aproximadamente 23 000 años, una erupción lateral similar a la ocurrida en 1980 en el Mt. St Helens (Estados Unidos), aunque de un tamaño probablemente superior, produjo el colapso hacia el sur del antiguo cono del Popocatepetl (Macias, 2005, Siebe, et al 2017).



Figura 4. Estructura antigua remanente del aparato conocido como Nexpayantla, en el área del actual edificio volcánico Popocatepetl.

El aparato actual del Popocatepetl ha sido construido desde la última erupción que generó avalanchas, durante los últimos 23 000 años. El edificio volcánico actual consta de un cráter con estructura en desnivel (figura 2), teniendo

en el pico mayor una elevación aproximada sobre el nivel del mar de 5 452 m y respecto a la cota media de las zonas y valles aledaños se eleva en promedio de 2500 a 3000 m, hasta el pico mayor. El Popocatépetl, está construido por una serie de depósitos piroclásticos y coladas de lava de composición andesítica-dacítica (Macias, 2005).

La actividad explosiva del Popocatépetl durante los últimos 20000 años, ha estado constituida básicamente por cuatro eventos mayores, que produjeron pómez de caída y flujos de ceniza (14 000, 5 000, 2 150 y 1 100 años AP) y otros cuatro menos expuestos, ocurridos hace 11 000, 9 000, 7 000 y 1800 años AP (Siebe et al., 1997; 2017; Siebe y Macías, 2004).

Las erupciones Plinianas históricas han sido bien documentadas, estas ocurrieron hace aproximadamente 5000, 2150 y la más reciente hace 1100 años AP. Una característica importante en la erupción de 2150 AP, es que se produjeron flujos de lava de carácter fisural al noreste del edificio volcánico, particularmente localizados cerca de San Nicolás de los Ranchos (Macias, 2005).

La actividad de los últimos cien años ha sido predominantemente de carácter efusivo involucrando emplazamiento de domos de tamaño “medio” en el cráter principal del volcán, y que son destruidos por explosiones vulcanianas.



Figura 5. Antiguo cráter El Fraile, situado al sur del actual edificio volcánico Popocatepetl

CAPITULO 2. Evolución morfológica en el cráter del Popocatépetl previa a 1994 y estimación de producción de lava de 1919-1927

Las descripciones históricas de los episodios eruptivos desde el año 1500 sugieren que algunos de ellos se dieron en ciclos de emplazamiento y destrucción de domos similares al actual (De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008a). El evento explosivo reciente más importante asociado a esa actividad fue probablemente el ocurrido entre 1663 y 1665, produciendo una “muesca” considerable en el borde del cráter SE, y dejando un cráter profundo que probablemente persistió con pequeños cambios morfológicos, excepto por la presencia esporádica de un pequeño lago cratérico estacional durante aproximadamente 250 años.

La figura 6a muestra cual era el estado del cráter en 1906 (Frienländer, 1921). La profundidad del cráter desde un punto del borde del cráter (línea superior de trazos en la figura 6a), al nivel del agua del lago del cráter (línea inferior de puntos marcados con el año 1906) se estima en 277 m en el momento de la toma de la fotografía. El diámetro del lago del cráter, de forma casi circular en la figura 6a se estima que medía ~116 m. Ese lago desapareció durante la erupción de naturaleza probablemente freática de 1919, esto de acuerdo con la información disponible de la época (periódicos y otros informes Dr. Atl, 1939). La actividad magmática comenzó hasta la primavera de 1920. Waitz (1921) informó que una nueva formación de bloques negros crecía en el piso del cráter, similar a una enorme costra de “pan” que medía alrededor de 100 m en la dirección NW-SE, de 70 a 80 m en la dirección perpendicular, y aproximadamente de 40 a 50 m

de altura, y reconoce esta formación como resultado de una extrusión de lava sólida que llena el conducto superior del volcán.

Posteriores expediciones al borde del cráter describen que en 1923 la tasa de destrucción del domo superó la tasa de crecimiento, formando un cráter cónico sobre el mismo, y fue parcialmente destruido por las explosiones que marcaron el final del episodio en 1927. En la figura 6b, se muestran las condiciones del cráter del Popocatepetl en 1978 y se distinguen los restos de los domos emplazados en la década de los 20's, así como el cráter interno después de la actividad de 1919-1927 (Macias y Siebe, 2005). En esta figura se indican de arriba hacia abajo, las siguientes acotaciones: la línea superior discontinua en la figura 6b muestra el nivel de referencia, la segunda marca indica el nivel del piso del cráter en 1994, el cual considero permaneció sin cambios hasta el inicio del episodio eruptivo actual en diciembre de 1994.

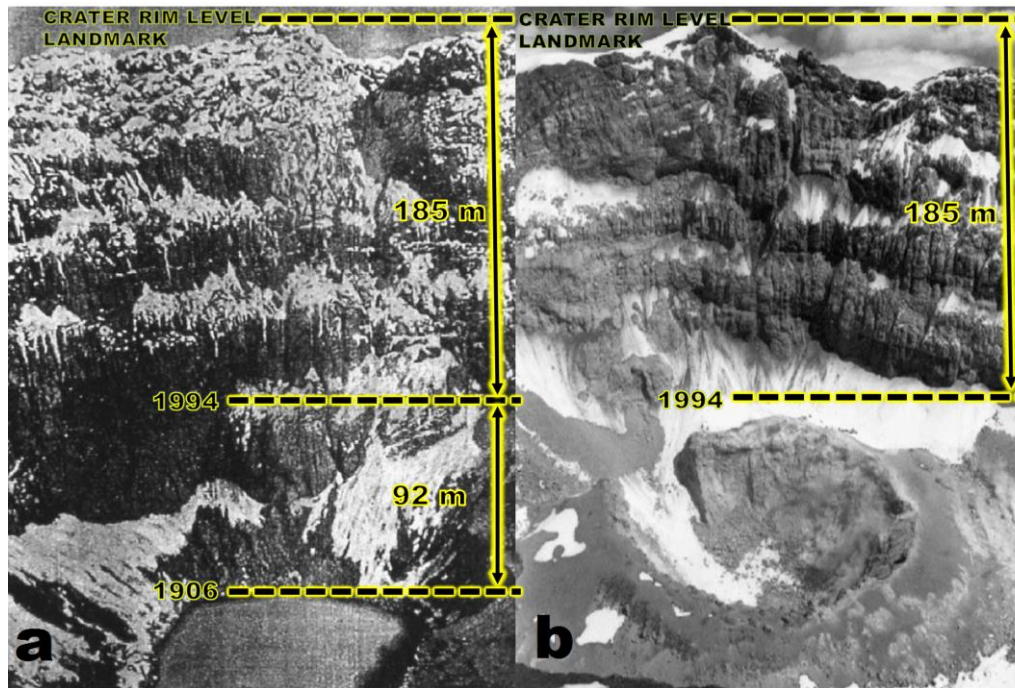


Figura 6a. Fotografía tomada por I. Frienlander en 1906, se muestran las líneas de referencia para el cálculo del volumen emitido en la actividad de 1920. Figura 6b. Imagen tomada por C. Siebe, 1978.

La figura 7 muestra el cráter en sección horizontal (izquierda) con una línea punteada que marca una sección transversal NW-SE. También indica (derecha) los perfiles aproximados antes y después de los emplazamientos de domos de lava de 1920 a 1927. Con la información fotográfica ya referida y con algunas dimensiones conocidas del cráter en la época actual, se estimó que el volumen de los restos del domo, escombros y materiales re-depositados dentro del cráter durante el episodio 1920-1927 fue de $\sim 3.8 \times 10^6 \text{ m}^3$. El volumen o capacidad del pequeño cráter central formado después de 1924 se estima en $5.3 \times 10^5 \text{ m}^3$. Esta última cifra es una estimación aproximada del volumen del último domo emplazado durante ese episodio. Con las dimensiones del primer domo de esa época, observado por Waitz (1921), se puede estimar el volumen del primer domo

en $\sim 2 \times 10^5 \text{ m}^3$. Es por tanto razonable suponer que el volumen típico de los domos emplazados en el episodio 1920-1927 fue de aproximadamente $2 \sim 5 \times 10^5 \text{ m}^3$. Asimismo si evaluamos el cociente de los volúmenes estimados emitidos entre el máximo volumen probable promedio que alcanzaron los domos en este período, podemos estimar que los domos emplazados en esa etapa fueron 10. De los reportes de la época se puede inferir que no hubo una cantidad importante de materiales piroclásticos expulsados fuera del cráter por la actividad de ese entonces. Por lo tanto estimo que la tasa de producción de lava promedio en el período de 1920 -1927 fue de $\sim 3.8 \times 10^6 \text{ m}^3 / (4 \text{ años}) \approx 3 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{seg}$. Es importante destacar que se consideran sólo 4 años debido a que los domos identificados en la época sólo abarcan el período 1920-1923, aun cuando la actividad explosiva y fumarolica importante esta reportada hasta 1927, con reportes aislados que llegan hasta la década de los 40's.

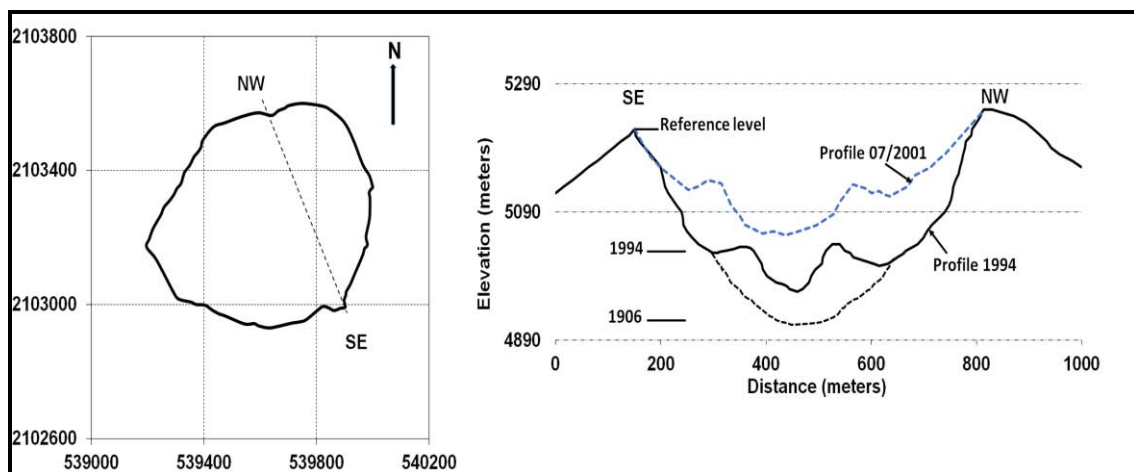


Figura 7. Planta del cráter del volcán Popocatepetl (izquierda, coordenadas UTM) y perfiles (derecha) en sección NW-SE de: 1906, 1994, y 2001.

CAPITULO3.- Metodología de cálculo de volúmenes de los domos emplazados en el Popocatepetl

Las características topográficas del cráter del Popocatepetl impiden una vigilancia continua de su interior. Es por eso que desde el incremento de la actividad en 1994 se realizan vuelos de reconocimiento y fotogramétricos sobre el cráter del volcán.

Las descripciones morfológicas y las estimaciones volumétricas de los domos de lava que aquí se analizaron se obtuvieron a partir del análisis de fotografías aéreas obtenidas con diferentes tipos de cámaras a intervalos irregulares dependiendo del nivel de actividad volcánica, disponibilidad de aeronaves y condiciones meteorológicas en alrededor de 150 vuelos. Se obtuvieron dos tipos de imágenes: estéreo-fotogramétricas verticales obtenidas de vuelos a gran altitud con cámaras aerofotogramétricas de gran ángulo y montadas en la base de un avión de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), y fotografías oblicuas convencionales obtenidas de vuelos más frecuentes de baja altitud en helicópteros o aviones de ala fija. El carácter esporádico de los vuelos obligó a combinar los resultados de los análisis de ambos tipos de imágenes, con el fin de mantener un seguimiento de la forma y la evolución del volumen de cada uno de los domos emplazados. Las fotografías verticales despejadas de nubes y fumarolas de 72 vuelos fotogramétricos en el período 1996-2010 fueron analizadas por la Dirección de Carreteras Federales de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) utilizando técnicas de restitución

fotogramétrica analógica convencional. Este procesamiento fotogramétrico de SCT arrojaba un conjunto de puntos x , y , z , y tenía como base las coordenadas de cuatro puntos de control en el borde del volcán (asumidos como fijos) (figura 8) y siete puntos de referencia en el área más activa dentro del cráter (figura 8). Asimismo proporcionaba al menos un par de imágenes estereográficas por vuelo. Los puntos de control situados en el borde del cráter hicieron posible escalar las imágenes y calcular las dimensiones horizontales de los domos. Los desplazamientos verticales de los puntos de referencia internos obtenidos de las restituciones de SCT, nos permitieron calcular las ganancias de volumen (o pérdidas causadas por las explosiones) y estimar las tasas de producción de lava de los primeros 29 domos.

Además, analicé las fotografías digitales oblicuas convencionales de numerosos vuelos de baja altitud desde 1996 para identificar cambios significativos en la morfología de los domos. En particular, se utilizaron las imágenes de nueve vuelos de baja altitud realizados después del último trabajo de restitución fotogramétrica de SCT en 2010, para construir anáglifos (figura 9) para la visualización estereoscópica en 3D de los domos con los métodos descritos por Ramírez-García (2008) y Dietz (2010). Tales imágenes se tomaron a intervalos de tiempo cortos a lo largo de los vuelos sobre el borde del cráter, con traslape entre ellas de aproximadamente el 60%. Con los anáglifos 3D y utilizando los mismos puntos de referencia fijos de las imágenes fotogramétricas situados en el borde del cráter y otros puntos de referencia reconocibles, se escalaron las imágenes oblicuas, de tal manera que esto permitió realizar un análisis y descripción

razonable de la evolución cuantitativa de la forma y las dimensiones de cada domo en el período 2011-2015.

Para el cálculo de los volúmenes, y mediante la visión en 3D o estereoscópica, aproximamos las formas de los domos a combinaciones de formas geométricas básicas, tales como conos truncados, hemisferios o secciones de elipsoides triaxiales, etc. Finalmente, los volúmenes de los domos se calcularon a partir de las distancias medidas en ambos tipos de imágenes, fotografías fotogramétricas verticales y anáglifos oblicuos escalados a los puntos de control fijos y otros “hitos” reconocibles en el caso de las fotos oblicuas, utilizando un catálogo de fórmulas de volumen (ver anexo 1), como los ya referidos. Esta forma de cálculo sin duda representa una aproximación a la forma real de los domos, pero probablemente era la única metodología acorde al tipo de datos disponibles. En el anexo 2, se adiciona información complementaria en relación a la metodología utilizada.

La mayoría de las imágenes fotogramétricas verticales se obtuvieron a una escala aproximada de 1: 14,000. Las dimensiones horizontales de los domos se midieron en las impresiones fotográficas de los vuelos fotogramétricos utilizando un estereoscopio de espejo y una regla o escalímetro, con una resolución “superior” a 1 mm, y de acuerdo a la escala de las fotografías correspondiente a unos 10 m en el terreno. La precisión vertical de la restitución proporcionó una mayor resolución. Dado que los volúmenes varían con el cubo de las dimensiones lineales, el error en las estimaciones de volumen de un domo implica que si

tenemos, por ejemplo, 100 m de ancho varían tres veces la incertidumbre fraccional lineal (Taylor 1997); Esto es $3 \times 10/100$. Asumimos, pues, un error típico del 30% en los volúmenes estimados a partir de las imágenes fotogramétricas verticales, y debido a la diversidad de cámaras, lentes y condiciones de vuelo, inferimos un error del 40% en la estimación de los volúmenes obtenidos de las fotografías oblicuas. Estos errores son similares a los de las estimaciones del volumen de los domos de otros volcanes usando aproximaciones a geometrías simples elaborados por Sparks et al., (1998) y Valenzuela, (2011).

La tasa de crecimiento de los domos se estimó dividiendo el volumen calculado a partir de las imágenes, por la duración acumulada de las señales sísmicas relacionadas con la extrusión de lava (secuencias de LPs y las señales de tremor significativas) detectados entre el inicio del emplazamiento del domo y el momento de la fotografía en la cual se identificó una nueva etapa de construcción de domo. En adelante se denominara esta tasa como tasa de extrusión de lava de corto plazo o tasa instantánea. El volumen máximo de un domo se extrapola del volumen medido en las fotos disponibles utilizando la tasa estimada de extrusión de lava de corto plazo y la duración total de las señales sísmicas volcánicas entre la hora de la foto y el evento principal de destrucción del domo. (Ver información complementaria en el Anexo 3)

Como parte de la revisión para identificar la evolución morfológica del interior del cráter se realizaron más de 30 perfiles SE-NW (figura 10), siendo este

uno de los factores relevantes en el momento de evaluar el nivel de peligro por un posible desbordamiento de lava, derivado de la construcción de los domos.

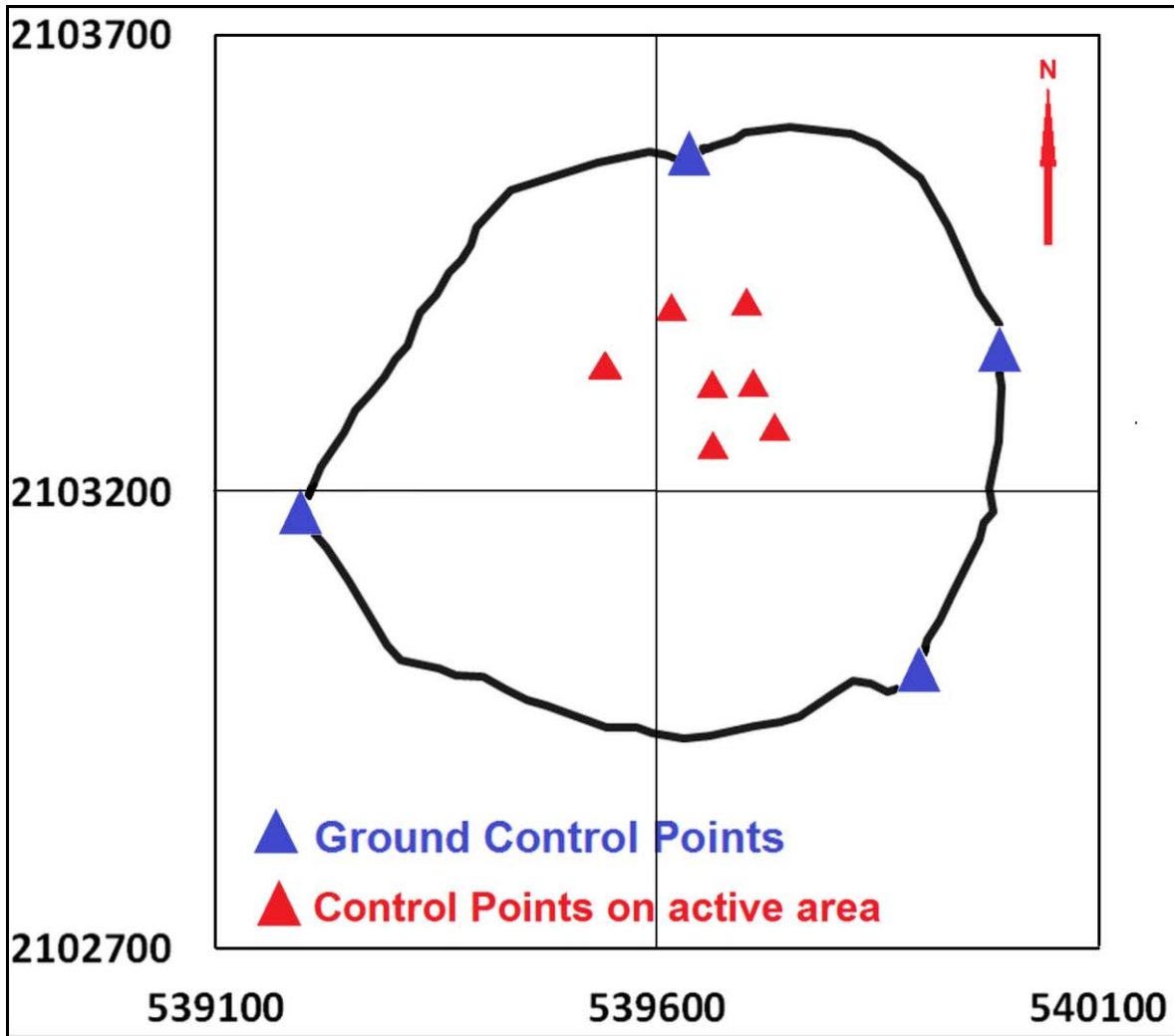


Figura 8. Puntos de control para la estimación de los volúmenes de domos emplazados en el Popocatepetl entre 1996 y 2015. Los triángulos son los puntos de control en el área activa para estimar las dimensiones verticales, donde se emplazan los domos y los cuadros son los puntos de control terrestre para estimar las dimensiones horizontales. Coordenadas UTM.

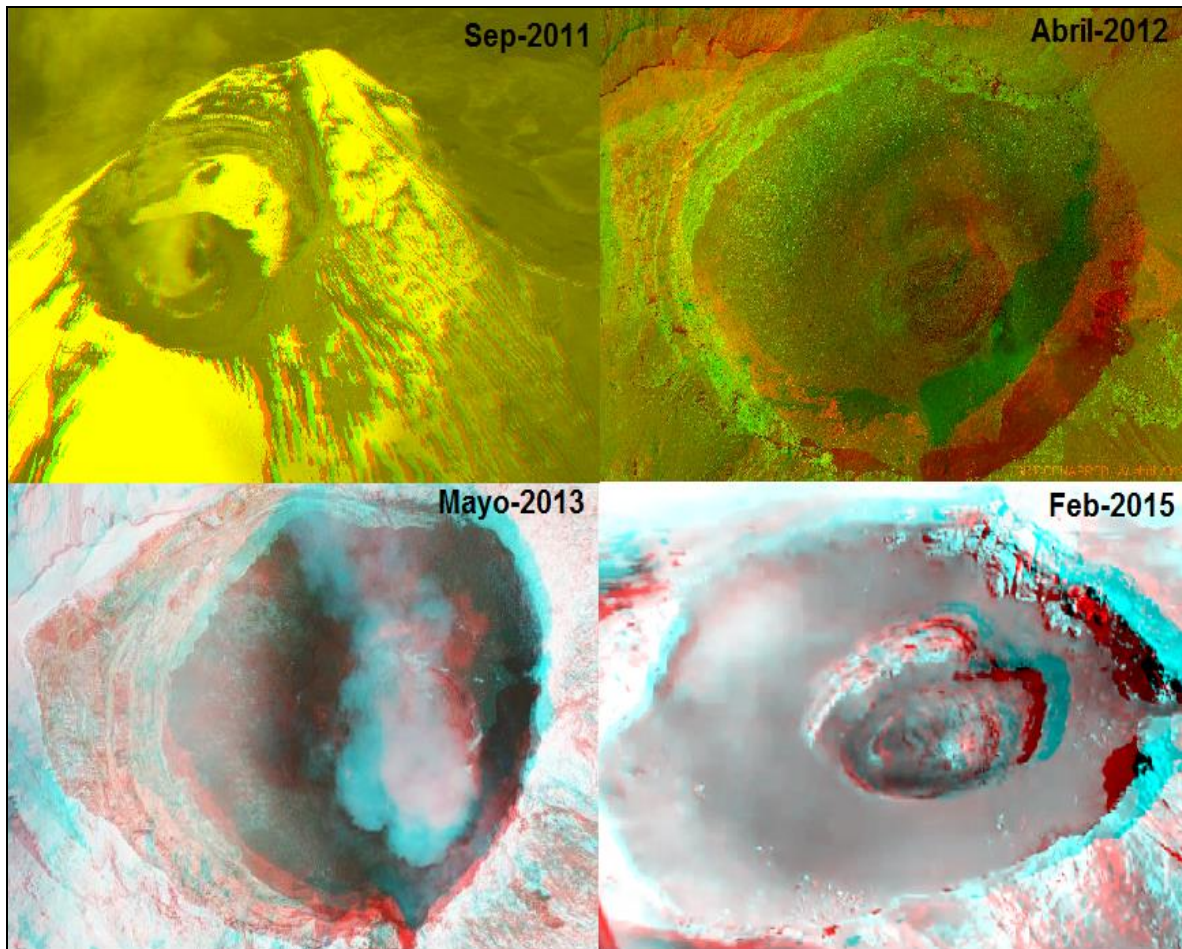


Figura 9. Ejemplos de algunos de los análogos obtenidos en este estudio

La identificación de cada emplazamiento de domo conlleva algunas ambigüedades que se generan por la imprecisión en la definición de lo que es un nuevo emplazamiento. Las diferencias en el conteo de domos hechas por diferentes grupos de observación han aumentado, debido al uso de diferentes criterios para este proceso. En nuestro caso para diferenciar cada nuevo emplazamiento de domo, primero verificamos que se hubiera producido una destrucción significativa del domo anterior y luego analizamos en las imágenes, la textura, el color y las características morfológicas del emplazamiento de lava recién detectada. Es probable que otros observadores hayan contabilizado algunas emisiones de lava y lóbulos como nuevos domos, particularmente para

las observaciones realizadas entre 2006 y 2010, generando un recuento de domos ligeramente diferente para ese período (CENAPRED, 2012). Aunque ambos métodos pueden ser igualmente válidos, en este estudio usamos el criterio anterior, es decir, un nuevo domo implica un cambio significativo de textura, color y forma de un emplazamiento de lava fresco que ocurre después de una explosión importante de destrucción del domo. Con esto definimos así el tiempo de residencia de cada domo como el período de tiempo entre la fecha de emplazamiento (desde la primera evidencia fotográfica y la información sísmica representativa significativa) y la fecha de destrucción principal, que se deduce de las explosiones, la altura de la columna y la amplitud y duración de la señal sísmica asociada a los eventos explosivos

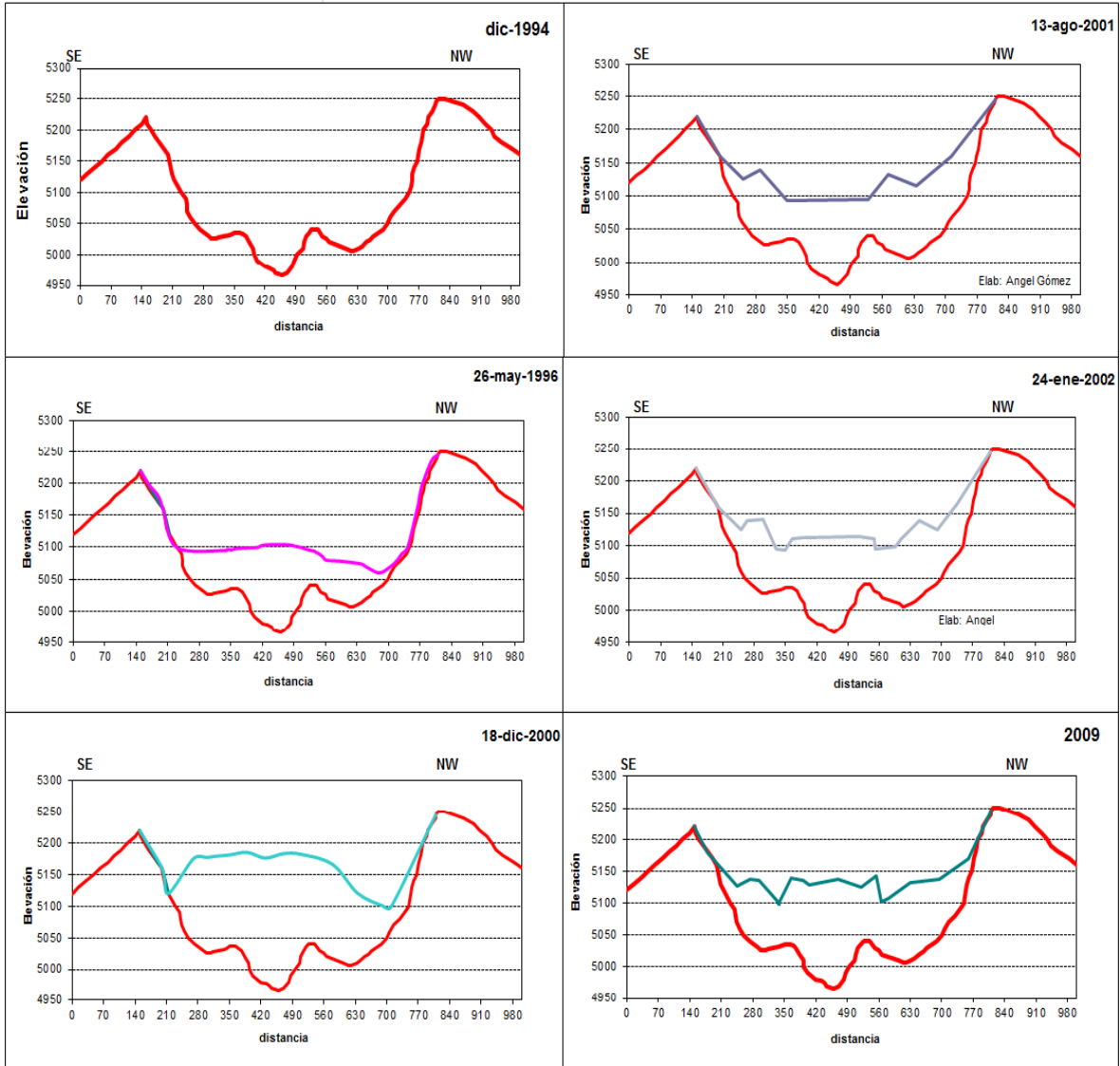


Figura 10. Secuencia de algunos de los perfiles SE-NW del cráter del volcán Popocatepetl, obtenidos durante este estudio.

CAPITULO4. Secuencia de las fases de emplazamiento y destrucción de los domos en el Popocatépetl de marzo de 1996 a febrero de 2015.

Domo 1 de Marzo de 1996. (D0396-1)

A inicios de marzo de 1996 los registros de eventos VT's y tremores señalaron la formación del primer domo, el cual creció sobre el cráter interior que se formó en los remanentes de la actividad 1919-1922. El incremento de la actividad sísmica motivó que días después, en un sobrevuelo, se comprobara que estos eventos estuvieron asociados con el crecimiento del primer domo de lava, que se formó en la actual etapa eruptiva del volcán Popocatépetl iniciada en diciembre de 1994. Este primer domo, apareció tras casi 15 meses de actividad eruptiva, tuvo una forma elíptica en su base, de color oscuro, con una serie de grietas en forma de anillos concéntricos. La cota media de la base del domo fue de 5030 m, y la máxima fue de 5090 m. Apartir de aquí se identificarán con la letra D los domos emplazados por medio de una notación que indica la fecha (mes-año) y número secuencial de cada domo. Así al primer domo se le asigna la clave D0396-1 (figura 11a). Una descripción un poco más detallada de la fase de construcción de los domos 1 a 28 se encuentra en (Gómez-Vázquez, 2012). Asociado con la destrucción de este primer domo, ocurrió una explosión el 30 de abril de 1996, la cual ha sido el único evento en período de 1996 a 2015 que ha producido fatalidades por actividad directa del volcán.

Domo 2 de mayo de 1996. (D0596-2)

A mediados de mayo de 1996, se inició el crecimiento del domo 2 (D0596-2), asociado con señales de tremor armónico. En mayo de 1996 estos dos primeros domos cubrieron el piso del cráter principal (figura 11b). Las fracturas concéntricas observadas en el domo en noviembre de ese año indicaron una probable subsidencia en su estructura. En noviembre de 1996, el domo 2 creció radialmente, hacia las paredes del cráter. Al parecer, la actividad explosiva en ese momento causó una subsidencia mayor en la parte central del domo y formó fracturas concéntricas que produjeron una reducción a 5090 msnm en la elevación. La actividad explosiva posterior ocurrida en ese mismo mes de noviembre hasta finales de enero de 1997 marcó la fase de destrucción de este domo (Valdés, et al 2001).

Domo 3 de marzo de 1997 (D0397-3) y Domo 4 de julio de 1997 (D0797-4).

El domo 3 (D0397-3) fue posible distinguirlo en una imagen de finales de marzo de 1997 (figura 11c) Posteriormente, la actividad explosiva de abril a junio destruyó parcialmente este domo. Asociado a esta fase de destrucción se produjo una explosión con probablemente $VEI > 2$, ocurrida el 30 de junio de 1997, que generó una columna de ceniza de 13 km de altura y que produjo el único evento en el actual episodio eruptivo, que ha producido una caída de ceniza significativa en la Cd. de México. Tras la explosión del 30 de junio, se produjo de forma

inmediata el emplazamiento del domo 4 (D0797-4) (figura 11d). Asociado a su destrucción, este domo presentó subsidencia y fracturas radiales.

Domo 5 de Agosto de 1997 (D0897-5) y Domo 6 de Noviembre de 1997 (D1297-6).

El domo 5 (D0897-5) tuvo una textura superficial probablemente compuesto por lava en bloques (figura 11e); para el 10 de septiembre de 1997 casi había llenado las depresiones formadas en los remanentes de los domos precedentes. El crecimiento de este domo evolucionó hasta adquirir una forma de pistón (figura 11e). El domo 6 (D1297-6) inferido con la señal de tremor del 25 de noviembre de 1997, es de lava de color negro en bloques. Visualmente ese domo parecía ser el de mayores proporciones que se había formado hasta ahora, extendiéndose en dirección horizontal sobre restos de sus predecesores (figura 11f). Posteriormente, la actividad presentó una relativa calma del 7 al 24 de diciembre de 1997, que culminó con explosiones y emisiones moderadas de ceniza.

Domo 7 de Marzo de 1998 (D0398-7) y Domo 8 (Mayo de 1998) y Domo 9 de Noviembre de 1998 (D0598-9)

El 14 de marzo de 1998 asociado con señales de tremor armónico, se detectó la presencia de un nuevo domo (D0398-7) (figura 11g). El crecimiento de este domo fue acompañado de una considerable actividad de exhalaciones,

cubriendo parcialmente al domo con clastos y ceniza. Posteriormente se presentaron dos explosiones mayores el 21 de marzo y el 21 de abril de 1998, que emitieron importantes cantidades de ceniza y generaron columnas de hasta 3 km de altura sobre la cima.

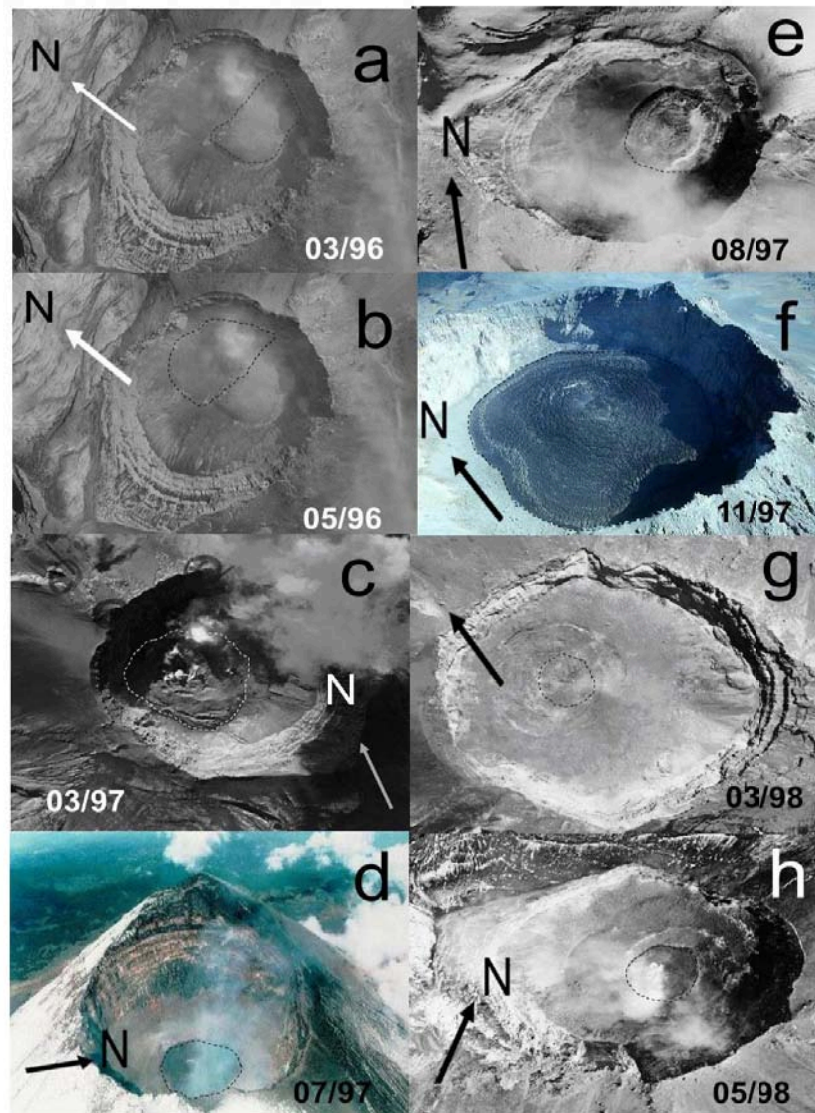


Figura 11. Domos en el Popocatepetl, formados de marzo de 1996 a mayo de 1998. Imágenes tomadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Las fases de tremor detectadas del 10 al 17 de mayo de 1998 indicaron el emplazamiento del domo 8 (D0598-8) (figura 11h). Este domo tuvo varios pulsos de crecimiento. Algunas exhalaciones mayores ocurrieron los días 14, 25 y 31 de ese mes, así como los días 22 y 23 de septiembre y 5 de octubre de 1998.

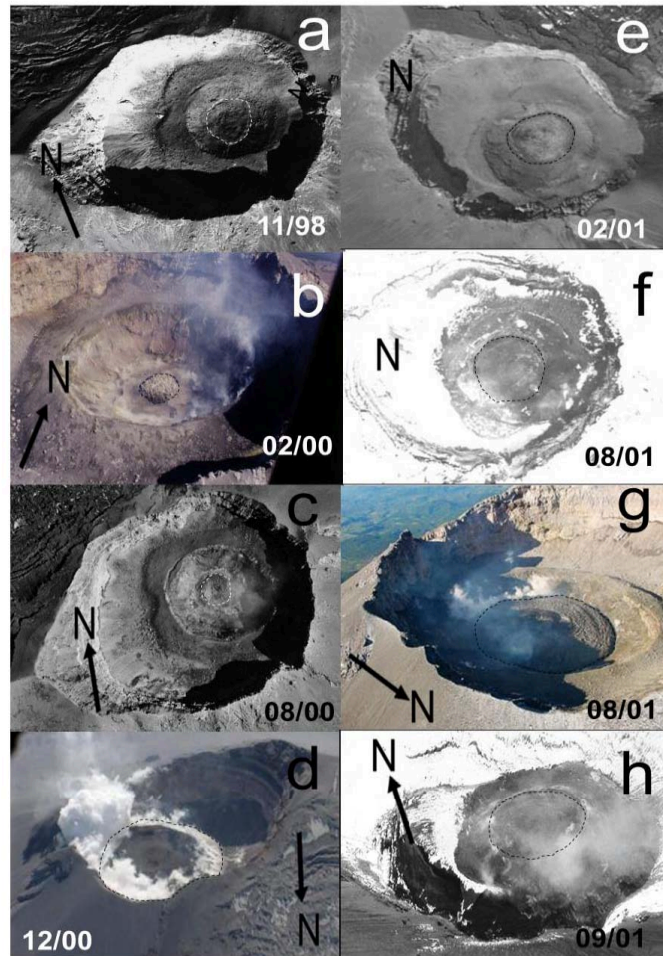


Figura 12. Domos formados en el Popocatepetl de noviembre de 1998 a septiembre de 2001.

Domo 10. Febrero de 2000 (D0200-10)

Episodios de tremor armónico detectados a partir del 11 de febrero de 2000, marcaron el emplazamiento del domo 10 (D0200-10). Esta formación tenía

un tono gris. La forma de este domo se asemejaba a un pequeño pistón de forma cilíndrica emplazado en el centro del cráter interno (figura 12b). Este domo permaneció emplazado varios meses, sin cambios importantes, hasta que el 25 de mayo de 2000 ocurrió una explosión de intensidad moderada que causó su destrucción casi completa.

Domo 11. Agosto- Septiembre de 2000 (D0800-11)

La actividad sísmica registrada en el volcán, de febrero a agosto del 2000 estuvo caracterizada por eventos LP, episodios de tremor armónico de baja amplitud y eventos volcanotectónicos. El domo 11 (D0800-11) se emplazó en agosto de ese año, pero fue del 8 al 12 de septiembre cuando eventos LP alcanzaron un promedio de 140 por día, actividad alternada con eventos de explosividad moderada. Este domo tuvo inicialmente un color negro, cambiando después a un tono grisáceo (figura 12c), aunque esto pudo ser causado por condiciones de iluminación. La actividad explosiva del 1 al 9 de noviembre contribuyó a la destrucción de este domo. Explosiones y exhalaciones los días 1, 6, 7 y 9 de noviembre contribuyeron a la destrucción de este domo. Es difícil saber en que momento el domo D0800-11 se destruyó por completo, probablemente el último evento de destrucción asociado a este domo ocurrió el 4 de diciembre de 2000.

Domo 12. Diciembre de 2000 (D1200-12)

El domo 12 (D1200-12) (figura 12d), se formó asociado con notorios episodios de tremor armónico de varias horas de duración, con amplitud al grado de saturación. También se registraron eventos explosivos moderados paralelos a su formación. Con fines de medir la deformación en la estructura del Popocatepetl, la red de monitoreo que mantenía el CENAPRED en este período de diciembre del año 2000, incluía una serie de inclinómetros situados alrededor del volcán (Guevara., et al 2003). Derivada de esta intensa actividad sísmica, algunas de estas estaciones inclinométricas presentaron fases de deformación con un rango de 150 a 200 microradianes, siendo los valores de deformación más altos detectados con estos dispositivos en el actual episodio eruptivo. Este domo ha sido el que ha alcanzado la mayor cota, llegando a 5152 msnm. Debido a la actividad explosiva del 19 de diciembre, este domo presentó una subsidencia, y se apreciaron grietas anulares concéntricas sobre su superficie. A principios de enero de 2001 continuó la fase de destrucción del domo D1200-12 por explosiones moderadas. El 22 de enero ocurrió una explosión con VEI 3, con emisión de flujos piroclásticos y altura de columna de 8 km (Valdés., et al 2001). Esos flujos descendieron por varios flancos del volcán, produciendo ablación de parte del glaciar del sector norte de la cima (Valdés, et al 2001). La actividad explosiva subsecuente provocó una mayor pérdida de volumen en el domo D1200-12.

Domo 13. Febrero de 2001 (D0201-13)

A fines de febrero de 2001, actividad tectonovolcánica y tremor armónico fueron los precursores del emplazamiento del domo 13 (D0201-13). También el 6 de marzo el número de LP's fue de 68 y el 13 se presentó tremor armónico casi a nivel de saturación. Este domo tuvo forma casi cilíndrica. Posteriormente presentó una subsidencia, con la formación en su superficie de agrietamiento anillado (figura 12e). Una fotografía aérea tomada por personal de SCT el 6 de abril indicó que el domo D0301-13 había perdido volumen, presentando una pequeña subsidencia de ~6m. En abril continuó la destrucción de este domo D0301-13, particularmente la explosión del 16 de abril. Las explosiones del 29 de abril, 4, 14 de mayo contribuyeron a la destrucción de este domo. Otra fotografía aérea, de la SCT del 13 de julio de 2001, muestra que el domo D0301-13 había sido removido en buena parte, producto de gran cantidad de exhalaciones y explosiones de diversa intensidad ocurridas en este período. Nuevamente la morfología del interior del cráter cambió de manera substancial, ahora sobre los remantes de los domos predecesores se formó un cráter interno, que adquirió la geometría semejante a la de un cono truncado invertido con 300 m de base y 80 m de profundidad

Domo 14 de Agosto de 2001 (D130801-14)

El 9 y 10 de agosto, tremor armónico y señales casi continuas de LP's, con duración de varias horas, estuvieron asociadas al crecimiento del domo 14

(D140801-14). Señales de tremor armónico de baja amplitud fueron detectadas los días 11 y 12 con la presencia de algunos eventos volcanotéctonicos. Este domo era de tono oscuro. La forma adquirida por este domo es de un semihemisferio (figura 12f). Este cuerpo no fue desalojado con alguna exhalación o explosión, por lo que sólo perdió volumen producto de la degasificación o bien ocurrió una subsidencia con fracturamiento normal en el cuerpo del domo; esta forma de subsidencia se ha producido en varias ocasiones durante este período de actividad del Popocatépetl.

Domo 15. Agosto de 2001 (D200801-15) y Domo 16. Septiembre de 2001 (D200901-16)

El domo 15 (D200801-15) se emplazó asociado con señales de tremor y de LP's, primeramente el 15 de agosto se registró gran número de eventos LPs, que en un momento dado fueron casi continuos, actividad similar ocurrió en los siguientes días hasta el 19 de agosto. En una fotografía aérea tomada el 20 de agosto se observa este nuevo domo adquirió una forma semejante a un hemisferio y tenía un color oscuro (figura 12g). En la cima de este cuerpo se apreciaba un pequeño lóbulo de lava con un tono más negro que el resto del cuerpo. Los 18 y 19, se registraron señales de tremor armónico que probablemente estuvieron asociadas con la formación de este pequeño lóbulo.

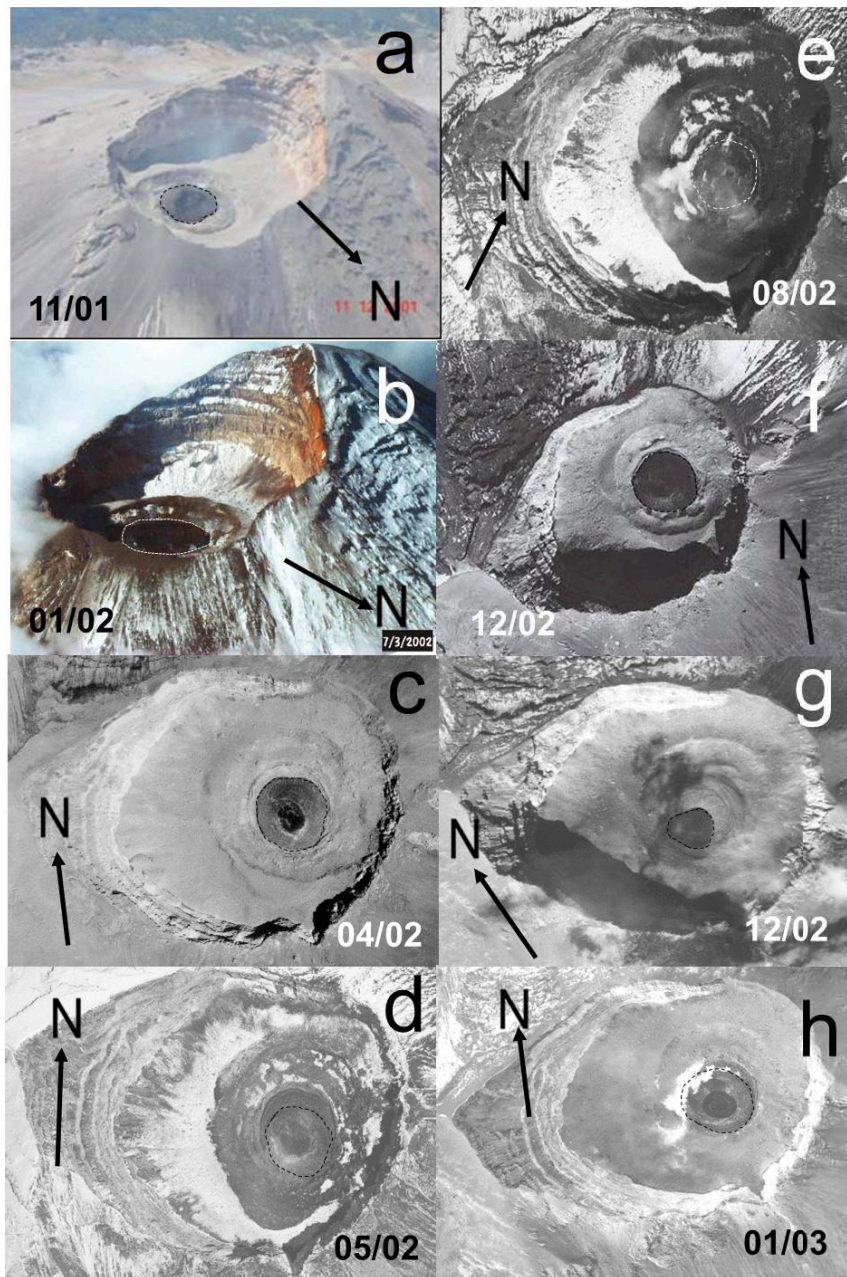


Figura 13. Domos en el Popocatepetl, de noviembre de 2001 a enero de 2003

Domo 16. Septiembre de 2001 (D200901-16)

El 8 de septiembre con señales continuas de tremor armónico de amplitud moderada a grande durante casi 6 horas, se produjo la formación del domo 16, D0909-16, (figura 12h). Este domo creció dentro de un hueco con forma de cono truncado invertido que se formó sobre el domo del 20 de agosto. El 9 de septiembre se incrementó el número de exhalaciones acompañadas de ceniza y gas. Del 10 al 19 de este mes continuaron registrándose pequeños episodios de tremor armónico y algunas exhalaciones pequeñas acompañadas por emisiones de ceniza. En una fotografía del 20 de septiembre fue posible apreciar de igual manera que el domo D0901-16 tenía una pequeña subsidencia debido a que entre el 8 y el 11 de este mes ocurrieron algunas pequeñas explosiones que desalojaron parte de este domo. El 26 de septiembre, así como los días 1 y 4 de octubre nuevamente ocurrió una fase de destrucción de este domo.

Domo 17. Noviembre de 2001 (D1101-17)

Del 12 al 15 de noviembre y del 6 al 12 de diciembre del 2001, actividad volcanotectónica intensa y particularmente señales casi continuas de LP's el 18 de ese mes son los precursores del emplazamiento del domo 17 (D1101-17). Este domo era de tono oscuro (figura 13a), incrustado en el cráter interior, sobre los residuos de los domos de agosto y septiembre pasados. Actividad explosiva del 13 al 22 de diciembre contribuyeron a la destrucción de este domo. Una fotografía del 11 de enero de 2002 reveló que del cráter interior fueron desalojados los

domos formados en la segunda mitad del año 2001, y se formó una subsidencia en este cráter interno dejándolo con una forma de cono truncado invertido y con una cota media de 5075msnm.

Domo 18. Enero de 2002 (D0102-18)

Del 11 al 24 de enero y del 16 al 28 de febrero, así como del 6 y 7 de marzo de 2002, se registró tremor armónico de amplitud variable que estuvo asociado al emplazamiento del domo 18 (D0102-18). Esta nueva formación se caracterizó por su tonalidad casi negra, adquiriendo una forma geométrica semejante a un hemisferio (figura 13b). La cota media máxima que alcanzó este domo fue de 5110msnm. Un crecimiento adicional de este domo ocurrió el 16 de febrero, asociado con el registro de 3 horas de tremor armónico. El 19 ocurrieron pequeñas exhalaciones y explosiones que indican una fase de destrucción de este domo. Entre el 21 y 28 de febrero y los días 6 y 7 de marzo, nuevamente se registran señales de tremor en varios episodios, destacándose el del día 26, todos estos eventos estuvieron relacionados con un crecimiento adicional de este domo. Este domo fue destruido por actividad explosiva menor ocurrida en los días subsecuentes.

Domo 19. Abril de 2002 (D0402-19)

Este domo fue destruido por actividad explosiva menor. El 28 y 29 de abril el volcán registró eventos LP, y algunos episodios de tremor armónico, indicando

el emplazamiento del domo 19 (D0402-19) (figura 13c). El 29 por la noche ocurrió una explosión con emisión de fragmentos incandescentes. El 30 de abril y el 1 de mayo se registraron 61 y 41 exhalaciones respectivamente, produciendo con ello una subsidencia sobre este cuerpo.

Domo 20. Mayo de 2002 (D0502-20)

Más de 17 eventos volcanotectónicos ocurridos el 17 de mayo (Martínez-Bringas A. comunicación personal), precedieron al registro de tremor armónico que acompañó el emplazamiento del domo 20 (D0502-20), estas señales sísmicas se detectaron del 16 al 22 de mayo de 2002. En el mismo periodo ocurrieron secuencias de eventos LP's. Este domo creció dentro de la subsidencia del predecesor y tuvo un color "grisáceo" (figura 13d) y con notables fracturas en la dirección Norte-Sur. Este domo subsidió presentando fracturamiento anillado y fue destruido en los meses subsecuentes.

Domo 21. Agosto de 2002 (D0802-21)

Secuencias de tremor armónico del 1 al 12 de agosto de amplitud variable durante varias horas al día acompañaron el emplazamiento del domo 21 (D0802-21), el cual creció en varios pulsos ocurridos entre el 12 de agosto y el inicio de octubre, intercalado con sismos volcanotectónicos y actividad explosiva como fases de destrucción de este domo. Con una imagen del 17 de septiembre de

2002, se aprecian pequeños lóbulos de lava como parte del crecimiento adicional de este domo (figura 13e). El 7 de noviembre se registró una exhalación grande con una columna de ceniza de 4km, que muestra una fase de destrucción de este último domo. El 18 de noviembre la SCT tomo una nueva fotografía del cráter, en ella se aprecia que la subsidencia ya observada en septiembre había crecido, y adquirió la forma semejante a un hemisferio invertido con radio de 70m y una profundidad de 14m

Domo 22. Diciembre de 2002 (D1202-22)

El 23 de noviembre de 2002 aumentó el número de LP's y de tremor armónico y con ello dió pasó al emplazamiento del domo 22 (D1202 22). De acuerdo con una posterior imagen aérea del cráter, pudo distinguirse que este cuerpo era de color "negro" (figura 13f). Adicionalmente, se distinguían algunas grietas radiales en las superficies del mismo. La forma adquirida por este domo fue semejante a un hemisferio, y creció dentro de la subsidencia de su predecesor. El 10 de diciembre se presenta tremor armónico de moderada a amplitud saturada, por espacio de 6 horas, indicando con ello un crecimiento adicional. La destrucción de este domo se dió con la actividad explosiva del 18 de diciembre, en particular se producen 2 explosiones, la principal genera una columna de ceniza de 6 km de altura y emite clastos incandescentes a unos 1500m del cráter (figura 14) y provocaron que se formara subsidencia con la presencia de fracturas concéntricas.

Domo 23. Diciembre de 2002 (D1202-23)

El 18 de diciembre, fases de tremor armónico y aumento en el registro de LP's ocurrieron ese día, estas manifestaciones fueron el indicativo del emplazamiento del domo 23 (D1202-23). La tonalidad de la lava en la superficie de este domo fue de color negro (figura 13g), y había crecido en la subsidencia dejada por el domo predecesor. Posteriormente tuvo un crecimiento adicional el 22 de diciembre, y su fase principal de destrucción el 23 de diciembre de 2002.



Figura 14. Fase de destrucción del domo 23, una explosión del 18 de diciembre de 2002 en el volcán

Popocatepetl. Fuente www.cenapred.unam.mx

Domo 24. Enero de 2003 (D0103-24)

Entre el 1 y el 9 de enero de 2003 se produjo nuevamente el registro de tremor armónico que marcó el inicio del emplazamiento del domo 24 (D0103-24). Este domo adquirió una forma cilíndrica y se pudo distinguir una tonalidad oscura en su superficie, asimismo creció dentro de la subsidencia del domo anterior

(figura 13h). Este domo tuvo su principal evento de destrucción el 9 de enero de 2003.

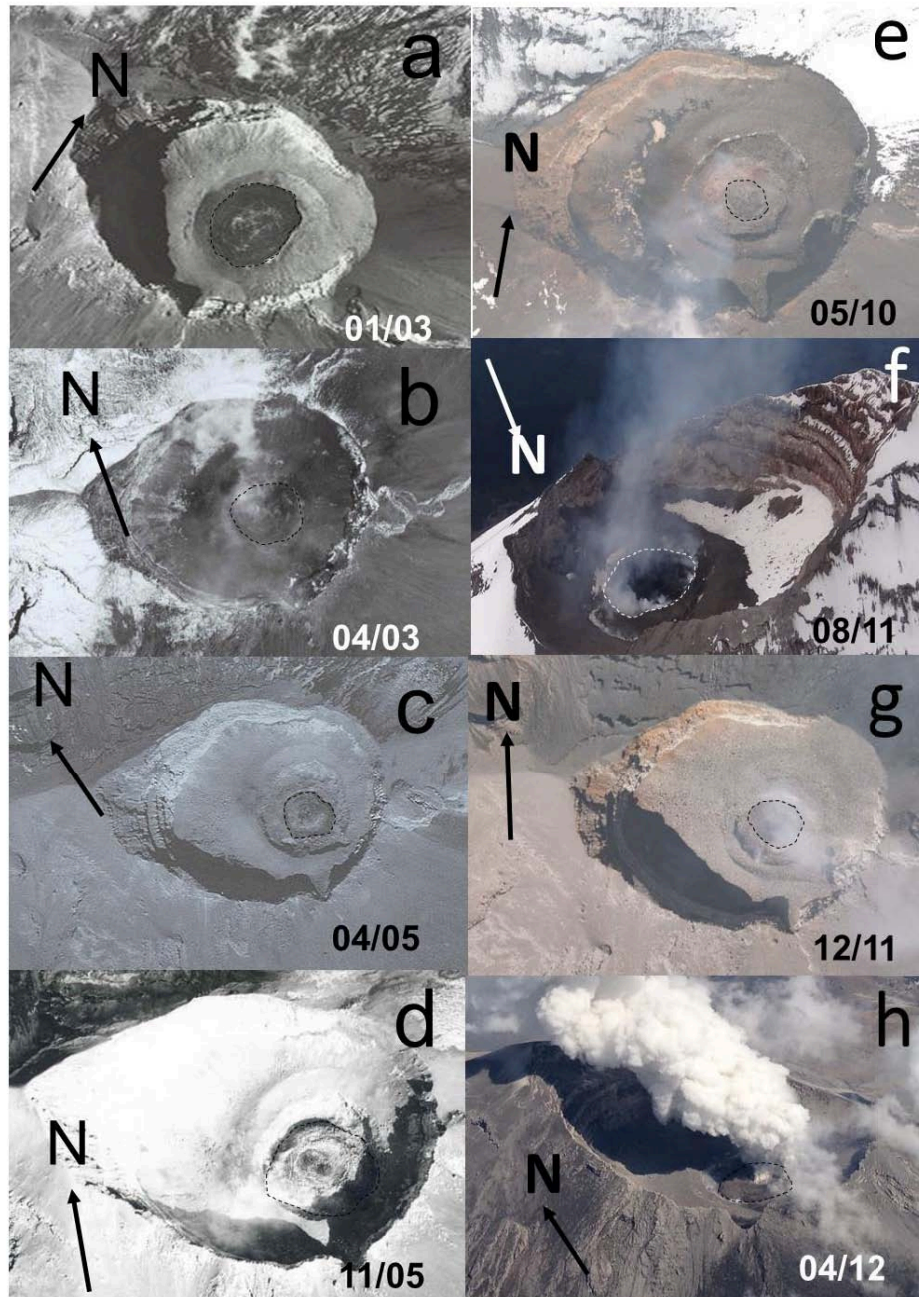


Figura 15. Domos en el Popocatepetl, de enero de 2003 a mayo de 2012

Domo 25. Enero de 2003 (D0103-25)

El 16 de enero de 2003, sobre la subsidencia dejada por el domo 24 y con la detección de episodios de tremor armónico se emplazó el domo 25 (D0103-25), (figura 15a). Este cuerpo inicialmente presentó una tonalidad negra y tuvo varios pulsos de crecimiento. La cota máxima a la que llegó fue de 5131msnm. La fase principal de destrucción de este domo ocurrió mediante un evento explosivo del 14 de febrero de 2003 (figura 16a), que generó una altura de columna mayor a 4 km. El 21 ocurrió otra explosión con una columna de ceniza de 4 km y la emisión de fragmentos incandescentes a 1.5 km del cráter. Es importante mencionar que aunque hubo un importante desalojo, los materiales (escombros, lapilli, cenizas, etc) que no fueron desalojados se redistribuyeron en el interior del cráter, causando que fuera cubierto por estos escombros.

Domo 26. Abril de 2003 (D0403-26)

El emplazamiento del domo 26 (D0403-26) se produjo con varias secuencias de episodios de tremor armónico de baja amplitud, detectadas el 8 de abril. Este domo adquirió una forma semihemisférica (figura 15b). El 24 de abril de 2003 se produce el evento principal de destrucción de este domo. Mediante exhalaciones y actividad explosiva moderada en el período de mayo a agosto de ese año ocurrieron fases adicionales de destrucción de este y de domos previamente emplazados. El 26 de junio es adquirida por SCT otra imagen aérea, en la que se corrobora la fase de destrucción, y en la cuál se aprecia que la

ampliación de las dimensiones de la subsidencia adquiriendo una forma de cono truncado invertido. Destaca posteriormente la explosión del 19 de julio de ese año, la cual produjo la caída de ceniza en la Cd. de México (figura 16b). Una imagen aérea tomada por SCT el 25 de agosto permitió observar que la subsidencia había aumentado y la cota más baja del cráter interno se ubicó en 5052msnm. Una fotografía del 10 de diciembre de 2003 tomada por SCT, permitió constatar que las dimensiones del cráter interno habían crecido y la cota media del fondo del cráter interior se situó en 5044msnm. De febrero a noviembre de 2004 la actividad en general se mantuvo en niveles bajos.



14 Feb 2003 05:38, (14 Feb 2003, 11:38 GMT) **CENAPRED**
 Figura 16a Explosión del volcán Popocatepetl del día 14 de febrero de 2003.
 Fuente www.cenapred.unam.mx



19 Jul 2003 09:24, (19 Jul 2003, 14:24 GMT) **CENAPRED**
 Figura 16b. Explosión del volcán Popocatepetl del día 19 de julio de 2003. Fuente www.cenapred.unam.mx

Domo 27. Abril de 2005 (D0405-27)

Fases de tremor y de señales LP registradas durante enero de 2005, así como en algunos días de mayo, julio y septiembre, acompañaron el emplazamiento del domo 27 (D0405-27). Posteriormente, ocurrieron algunos pequeños episodios de destrucción durante los siguientes meses del 2005.

Siendo su evento principal de destrucción el ocurrido el 23 de octubre de 2005. Con una imagen de febrero de 2006 se pudo distinguir que este domo se emplazó en el fondo de la subsidencia dejada por los domos predecesores (figura 15c). Este domo no fue destruido por completo.

Domo 28. Noviembre de 2005 (D1105-28)

Algunas señales sísmicas mínimas detectadas desde noviembre de 2005, indicaron el emplazamiento del domo 28 (D1105-28), el cual se emplazó en la subsidencia dejada por el domo 27. Esta nueva formación era de tono “oscuro” con una forma hemisférica en su base y de pistón en su desarrollo vertical (figura 15d y 17). La cota máxima a la que hasta ese momento habría llegado ese domo era de 5107 msnm (figura 17). Durante mayo a diciembre de 2006, se registraron episodios de tremor armónico, mostrando con ello nuevos pulsos de crecimiento de este domo, corroborado con una imagen de noviembre de 2006, un nuevo pulso de crecimiento de este domo ocurrió en febrero de 2007.

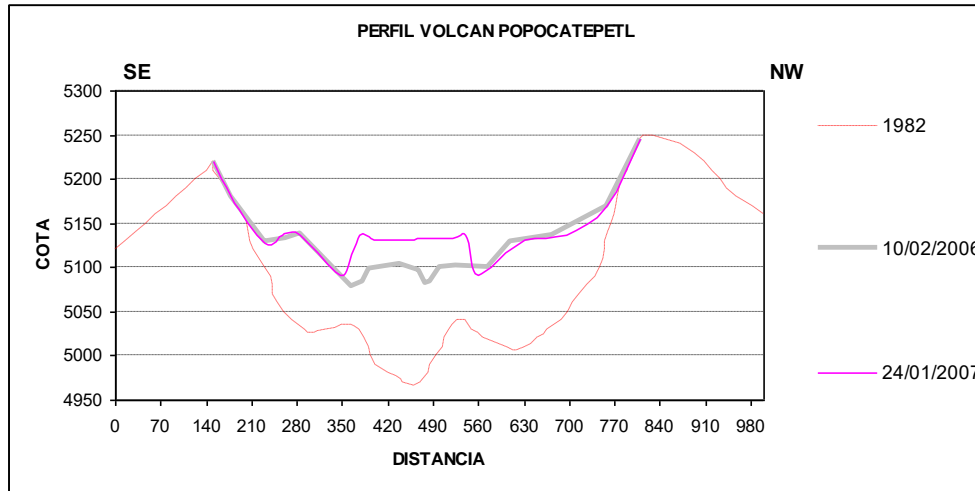


Figura 17. Perfil del interior del cráter del Popocatepetl. Para el 24 de enero de 2007.

Asimismo se pudo observar que el domo 28, había crecido sobrepasando a su predecesor (figura 17). Durante 2007, se registraron más episodios de temblor armónico de duración variable a intervalos irregulares. También se presentaron algunas fases de destrucción, vinculadas a las explosiones del 18 de enero y el 4 de febrero de 2008. En mayo y junio prevalecieron las fases de destrucción del domo. Sin embargo el evento principal de destrucción ocurre el 9 de marzo de 2008. Los meses de julio a diciembre de 2008 se caracterizaron por su baja actividad, pero también por episodios cortos de temblor armónico intercalados por secuencias de pequeñas exhalaciones con emisión de ceniza. Para el 8 de febrero de 2009, se observó que el domo D1105-28, presentaba un tono “grisáceo” y subsidencia, aun cuando había tenido pulsos de crecimiento adicionales (figura 18).

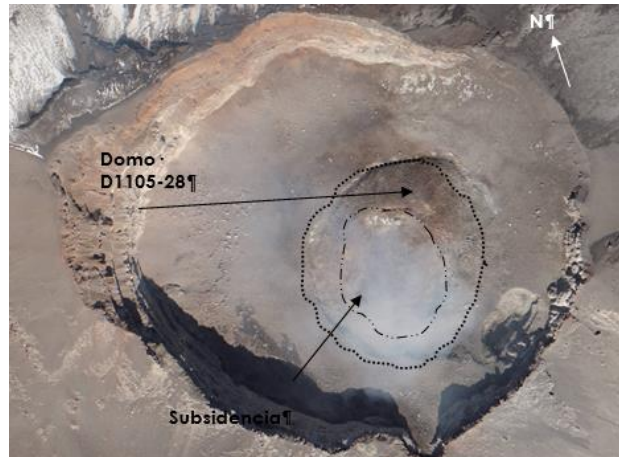


Figura 18. Fotografía del cráter del volcán Popocatepetl del 8 de febrero de 2009, tomada por SCT. Muestra al domo D1105-28

De febrero de 2009 a marzo de 2010 continuó la fase de destrucción del domo D110528. El 29 de marzo de 2010 se aprecia que la subsidencia en este domo creció hasta alcanzar una profundidad aproximada de 40m. Este domo no fue destruido por completo. En esta última fotografía fue posible apreciar una “nueva” boca al sureste del cráter principal.

Domo 29 de Mayo 2010 (D0510-29)

En mayo de 2010 se registra un nuevo aumento en la actividad, particularmente con la detección de algunos episodios de tremor armónico con varias horas de duración, este factor fue el indicativo del inicio del emplazamiento del domo 29 (D0510-29). Fases de destrucción de este domo ocurrieron el 7 de junio y el 23 de agosto. Poca actividad sísmica se detecta entre agosto y septiembre, sin embargo algunos episodios de tremor ocurren, posiblemente asociados con pulsos de crecimiento de este domo. En una fotografía del 27 de octubre se corroboró el emplazamiento del domo D0510-29 (figura 15e), y pudo distinguirse que se había emplazado en la subsidencia de los remanentes del

domo 28. De enero a junio de 2011 la actividad disminuyó. Sin embargo se presentó intermitente actividad volcanotectónica. En junio ocurren explosiones pequeñas que contribuyen a la destrucción del domo D0510-29, siendo la explosión del 7 de junio el evento principal de destrucción.

Domo 30 de Agosto 2011 (D0811-30)

En el período del 29 de agosto al 4 de septiembre de 2011, ocurren secuencias de eventos LP así como de tremor armónico, que marcaron el emplazamiento del domo 30 (D0811-30). Una imagen del 8 de septiembre de 2011 revela este nuevo cuerpo de lava emplazado (figura 15f). La destrucción de este domo se produce principalmente por las explosiones del 26 de septiembre y 20 de noviembre de ese año (figuras 19a y 19b).



Figura 19a. Explosión en el volcán Popocatepetl del 26 de septiembre de 2011. Imagen tomada de www.cenapred.unam.mx.



Figura 19b. Explosión en el Popocatepetl del 20 de noviembre de 2011. Tomada de <http://www.youtube.com/watch?v=tB-9LyEkXAo>.

Domo 31 de Diciembre de 2011 (D1211-31)

Del 7 al 9 de diciembre de 2011 secuencias de Lp's que superaban la centena, y la detección de algunos episodios cortos de tremor armónico, marcaron el emplazamiento del domo 31 (D1211-31). Una imagen del 8 de diciembre muestra un pequeño domo creciendo en el fondo del cráter interior (figura 15g). Fases de destrucción del domo 31 caracterizaron gran parte de enero de 2012. El evento explosivo del 25 de enero de 2012, es considerado el evento principal de destrucción de este cuerpo de lava.

Domo 32 de Abril de 2012 (D0412-32)

El 30 de enero y el 17 de febrero de 2012 ocurren fases de tremor espasmódico, adicionalmente, durante varios días de febrero y marzo de 2012 se registraron nuevos episodios cortos de este tipo de tremor, y el 31 de marzo aumento significativamente el registro de LP's. Toda esta actividad sísmica es el indicativo del emplazamiento del domo 32 (D0412-32). La imagen del 14 de abril de 2012, corrobora la presencia de este nuevo cuerpo (figura 15h). En abril 13 y 14, ocurren fases de tremor espasmódico que indicaron un pulso de crecimiento y explosiones vulcanianas, que probablemente destruyen parcialmente al domo 32.

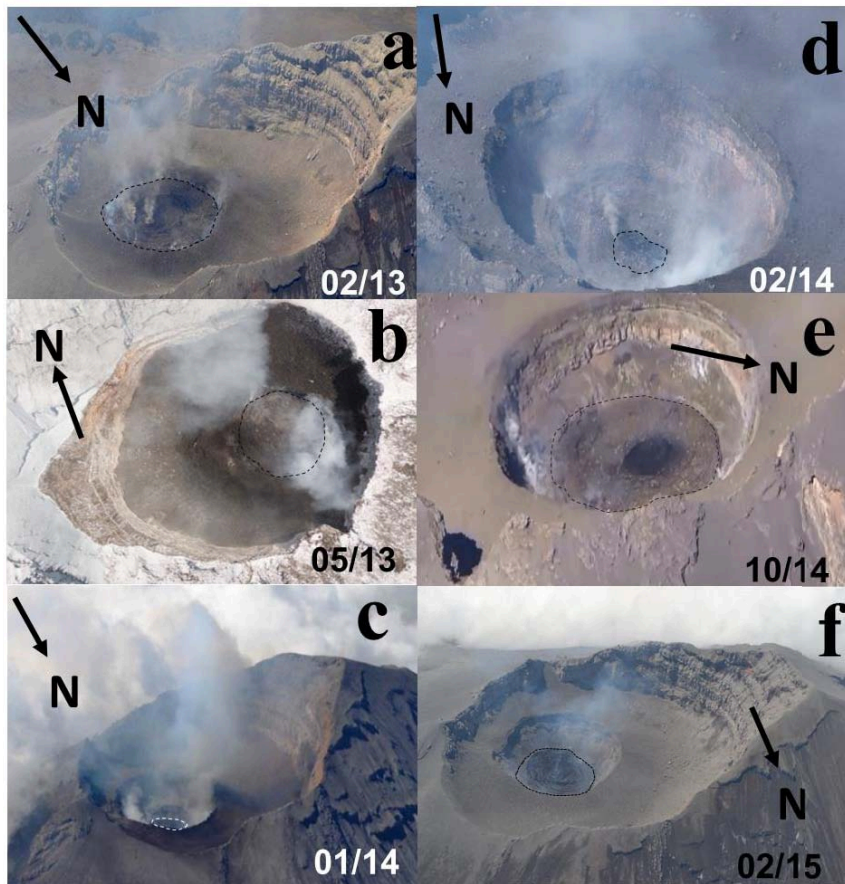


Figura 20. Domos emplazados en el Popocatépetl de febrero de 2013 a febrero 2015

De mayo a julio de 2012 se presentaron episodios importantes de temblor espasmódico, con duración de varias horas y en ocasiones llegando a niveles de saturación, que indicaron un crecimiento adicional de este cuerpo. También ocurrieron varias secuencias de eventos LP y algunos eventos volcanotectónicos. También se observaron pequeñas explosiones que emitían ceniza y una gran cantidad de balísticos (figura 21a) así como un evento explosivo de mayor relevancia el 6 de agosto de 2012 (figura 21b).



Figura 21a. Explosión típica del periodo mayo-julio de 2012.

Tomada de www.cenapred.unam.mx



Figura 21b. Explosión del 6 de agosto de 2012

Tomada de www.cenapred.unam.mx

Durante los siguientes meses de 2012 continuó la actividad vulcaniana con algunas fases de temblor espasmódico, indicando con ello fases de destrucción del domo 32.

Domo 33 de Febrero de 2013 (D0213-33)

Exhalaciones y actividad volcanotectónica ocurrieron durante enero y febrero de 2013. El 10 de febrero de 2013 señales de temblor espasmódico así como eventos LP's, fueron los indicios del emplazamiento del domo 33 (D0213-33). Una imagen del cráter del 5 de marzo muestra el emplazamiento incipiente de este domo. Este cuerpo presentó varios pulsos de crecimiento adicionales durante marzo. Una fotografía del 18 de abril muestra que el domo 33 llenaba casi por completo el cráter interior (Figura 20a). La cota superior de ese domo alcanzaba en esa fecha los ~5150 msnm. En los periodos del 15 al 30 de abril y del 1 al 5 de mayo de ese año, ocurren importantes fases de destrucción por explosiones vulcanianas (figura 22a y 22b).



Figura 22a. Explosión del 19 de abril de 2013,
Tomada de www.cenapred.unam.mx



Figura 22b. Explosión del 5 de mayo de 2013.
Tomada de www.cenapred.unam.mx

Domo 34 de Mayo 2013 (D0513-34)

El 8 de mayo de 2013 una secuencia prolongada de tremores espasmódicos durante horas, así como tremor armónico detectado del 10 al 17 de mayo y algunas secuencias de LP's, permitieron inferir el emplazamiento del domo 34 (D0513-34), el cual fue corroborado con una fotografía del 14 de mayo (Figura 20b). De manera casi contemporánea, intensa actividad explosiva vulcaniana en el mismo período destruyó este domo (figuras 23a y 23b).



Figura 23a. Explosión del 14 de mayo de 2013,
Tomada de www.cenapred.unam.mx



Figura 23b. Explosión del 15 de mayo de 2013.
Tomada de www.cenapred.unam.mx

Durante junio y julio de 2013 fue persistente la fase de destrucción del último y de algunos de los domos emplazados previamente, destacándose las explosiones ocurridas el 13 de junio, así como el 3, 4 y 12 de julio. Con una imagen de un vuelo del 7 de agosto, se corrobora la destrucción total del domo 34. En esta imagen se puede apreciar la formación de un cráter interior con un radio y profundidad aproximadas de ~130m y ~85m, respectivamente (figura 24).



Figura 24. Imagen del 7 de agosto de 2013. Muestra el cráter interior sin restos del domo 34 y solo la emisión de una leve pluma de gases. Imagen tomada de www.cenapred.unam.mx.

Domo 35 de enero 2014 (D0114-35)

El resto del año 2013 se caracterizó por presentar un nivel bajo de actividad, intercalado con algunas fases de destrucción de domos y algunas explosiones menores con emisión de clastos incandescentes. El 15 de enero de 2014, pequeñas secuencias de tremor armónico marcaron el inicio del emplazamiento del domo 35 (D0114-35). Una imagen del 11 de febrero de 2014, muestra un pequeño domo de tono oscuro con lavas en bloques y una forma semejante a un pistón (figura 20c). Después este domo subside, y ocurre el

evento principal de destrucción, el cual se presenta durante la actividad explosiva del 21 de febrero de 2014 (figura 25a).

Domo 36 de Febrero de 2014 (D0214-36)

Secuencias de eventos LP's detectadas el 26 de febrero de 2014 marcan el emplazamiento del domo 36 (D0214-36), una imagen del cráter de ese mismo día muestra un pequeño domo de forma irregular creciendo sobre los remanentes de los domos predecesores (figura 20d). Del 26 de febrero al 03 de marzo ocurren pequeñas fases de tremor armónico y la detección de algunos eventos volcanotectónicos. Posteriormente el 4 de marzo de 2014 ocurrió el evento principal de destrucción del domo 36 (figura 25b).



Figura 25a (izquierda). Evento de destrucción del domo 35, ocurrido el 21 de febrero de 2014. Figura 25b (derecha). Imagen del 04 de marzo de 2014, muestra el evento de destrucción asociado al domo 36.

Imágenes de www.cenapred.unam.mx.

De marzo al inicio de octubre de 2014 la actividad preponderante fueron las fases de destrucción. Una imagen del 14 de octubre de 2014 corrobora esta situación, en ella es posible distinguir que las dimensiones del cráter interno han crecido ligeramente y sólo se observan en el fondo del mismo restos de

escombros y algunos bloques fragmentados de los domos previos que se emplazaron (figura 26).



Figura 26. Imagen del 14 de Octubre de 2014, muestran las condiciones del cráter interior del Popocatepetl, no se observa un cuerpo fresco de lava y se distinguen los escombros finos y algunos bloques grandes fragmentados de domos previos. Imágenes de www.cenapred.unam.mx.

Domo 37 de Octubre de 2014 (D1014-37)

El 20 de octubre de 2014, una secuencia de eventos LP's y algunas fases de tremor fueron el indicativo del emplazamiento del domo 37 (D1014-37). La actividad sísmica posterior registrada, indicó que este domo creció en varios pulsos. Una imagen del 6 de noviembre de 2014, muestra ese domo con una subsidencia, y dentro de la misma el crecimiento de un lóbulo sobre el cuerpo del domo (figura 20e). El crecimiento de este lóbulo ocurrió probablemente con la actividad del 5 de noviembre. Del 6 de noviembre de 2014 hasta la mitad del mes de febrero de 2015 fases intensas de destrucción prevalecieron (figuras 27a y 27b). Con una imagen del sobrevuelo del 19 de diciembre del 2014, pudo corroborarse la destrucción del domo 37 y su lóbulo (figura 28).



Figura 27a (izquierda). Evento de destrucción del domo 37, ocurrido el 11 de noviembre de 2014. Figura 27b (derecha).

Imagen del 8 de diciembre de 2014, ambas muestran eventos de destrucción asociados al domo 37. Imágenes de www.cenapred.unam.mx.

Domo 38 de Febrero de 2015 (D0215-38)

Una secuencia de eventos LP's y algunos episodios de tremor armónico ocurridos el 11 de febrero de 2015, marcan el inicio del emplazamiento del domo 38, (D0215-38) (figura 20f). Este cuerpo creció en el fondo del cráter interno que quedó como resultado de la destrucción de los predecesores, secuencias de LP's y tremor armónico durante casi todo el mes de febrero indicaron nuevos pulsos de crecimiento de este domo, intercalados con eventos de destrucción. Una imagen del 17 de febrero de ese año muestra este domo con secuelas de destrucción, pero con pulsos de crecimiento (figura 29a). Una nueva imagen del 27 de febrero de 2015 nos muestra subsidencia en el domo 38 (figura 29b), pero la actividad sísmica de ese mes indicó que continuaban los pulsos de construcción.



Figura 28. Imagen del 19 de diciembre de 2014. Se muestra el cráter interior con la ausencia de un domo fresco y sólo los remanentes del domo 37 en el fondo del mismo. Imagen de www.cenapred.unam.mx

El 28 de febrero y los días 1,3, 7-8,11-12 de marzo, y 8 de abril de 2015, de acuerdo con la actividad sísmica registrada se produjeron nuevos pulsos de crecimiento intercalados con fases de destrucción del domo 38. En una imagen del 10 de abril de 2015 se muestra el pulso de crecimiento del domo 38 (figura 30), y también se distingue que este cuerpo presenta una clara subsidencia con la presencia de marcado agrietamiento anular.

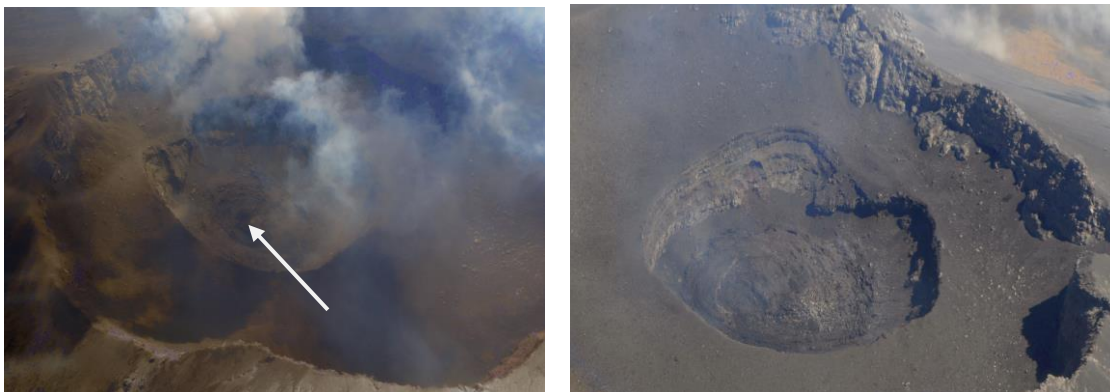


Figura 29a (izquierda). Imagen del 17 de febrero de 2015 que muestra subsidencia en el domo 38 y un pulso de crecimiento del mismo (flecha). Figura 29b (derecha). Imagen del 27 de febrero de 2015 muestra el domo 38 con subsidencia. Imágenes de www.cenapred.unam.mx

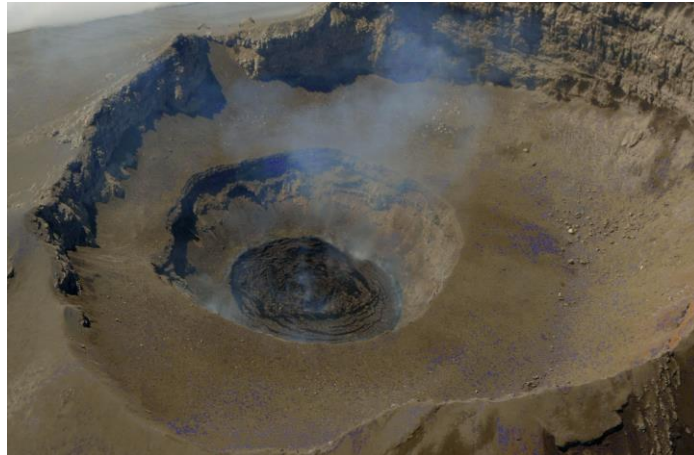


Figura 30. Imagen del 10 de abril de 2015. Se muestra el cráter interior con las dimensiones finales del domo 38, presentando una clara subsidencia. Imagen tomada de www.cenapred.unam.mx

En el anexo 4, se encuentra la tabla 1, donde se indican de manera concisa los volúmenes, espesores, tasas de producción de lava, fechas de emplazamiento y destrucción de los domos y características generales observadas sobre los mismos.

CAPITULO 5.- Regímenes, tasas de extrusión y volúmenes de los domos de lava en el Popocatepetl

5.1. Regímenes del emplazamiento de los domos en el Popocatepetl de marzo de 1996 a febrero de 2015

El emplazamiento de los domos (figuras 11, 12, 13, 15 y 20) y sus principales eventos de destrucción, tiempos de residencia, volúmenes máximos estimados de lava y tasas de extrusión por domo promediadas en el tiempo, todos estos parámetros listados en la Tabla 1 (Anexo 4), constituyen secuencias de datos, cuyo análisis contiene información importante sobre la naturaleza del proceso eruptivo actual en el volcán Popocatepetl. Los domos muestran un comportamiento cambiante. Algunos crecieron rápidamente y fueron destruidos en un corto período de tiempo; otros permanecieron durante largos períodos antes de su destrucción. Este comportamiento cambiante sigue ciertos patrones.

La figura 31 muestra un gráfico del número acumulado de domos y los volúmenes máximos acumulados estimados de los domos en función del tiempo. La región sombreada alrededor de los puntos de volumen acumulados representa la incertidumbre de las estimaciones de volumen acumulado (30% para los primeros 29 domos y 40% para los últimos nueve domos). La propagación de errores a lo largo de los valores acumulativos se estimó utilizando la suma cuadrática de los errores de los domos sucesivos (Taylor 1997). La inspección de la figura sugiere una sucesión de regímenes altos y bajos tanto de las tasas de

emplazamiento como en los volúmenes de los domos, inclusive considerando los errores en las estimaciones de volumen.

A continuación se realiza un análisis de los volúmenes emplazados y las tasas de producción de lava estimadas a partir del análisis de las imágenes disponibles para el cálculo del volumen y la duración de las señales sísmicas volcánicas (LP, tremor armónico) asociadas a la extrusión de lava en dos escalas de tiempo diferentes, una de corto plazo o instantánea y otra de largo plazo: La primera se refiere al comportamiento de los cambios de volumen a una escala de tiempo corto correspondiente al tiempo de crecimiento de cada domo y la segunda tasa se refiere a un cambio de volumen a una escala a largo plazo, basada en los promedios del tiempo sobre la duración de los regímenes sugeridos en la gráfica acumulativa.

Este análisis indica que el proceso de emplazamiento cíclico se desarrolla como una sucesión de tasas promedio altas y bajas de los emplazamientos de los domos (número de domos emplazadas por unidad de tiempo, según se indica en la Tabla 2 (Anexo 5) y la producción media de lava (promedio de la tasa de extrusión de magma a largo plazo, según se indica en la Tabla 2,(Anexo 5)).

La relación entre el volumen acumulado en un momento dado (CV) y el número acumulado de domos emplazados en ese momento (CND) tiene relevancia significativa para la caracterización de regímenes. Esta relación que numéricamente representa el volumen promedio de los domos en una fecha dada

de la secuencia de datos, nos permite identificar con mejor detalle el momento de los cambios de régimen. Asimismo, la tendencia de esta relación a estabilizarse alrededor del valor promedio nos revela un indicativo de que el proceso eruptivo actual tiende a autoregularse, punto que se tratara con mayor detalle en las siguientes secciones. El volumen promedio de los 38 domos estudiados aquí es $V_a = 1,07 \times 10^6 \text{ m}^3$, marcado por la línea continua horizontal (Ver figura 31) referido a la escala del eje vertical derecho. Con esta representación se pueden identificar cinco regímenes sucesivos (I-V marcados en la parte superior de la figura 31). En esta figura se pueden identificar tendencias alternadas entre alta y baja acumulación de extrusión de lava y del número de emplazamientos de domos. Las tendencias se revelan como las pendientes de las gráficas acumulativas que representan los volúmenes de extrusión de lava y el número de emplazamientos de domos, por unidad de tiempo respectivamente. La tasa de extrusión de volumen más alta (régimen III) correspondiente al período de diciembre de 2000 a abril de 2003 también tiene la tasa más alta de domos emplazados (figura 31, Tabla 2 (Anexo 5))

De forma similar, la menor tasa de extrusión de lava (IV), desde abril de 2003 hasta agosto de 2011, corresponde a un período largo en el que se emplazó un número relativamente pequeño de domos.

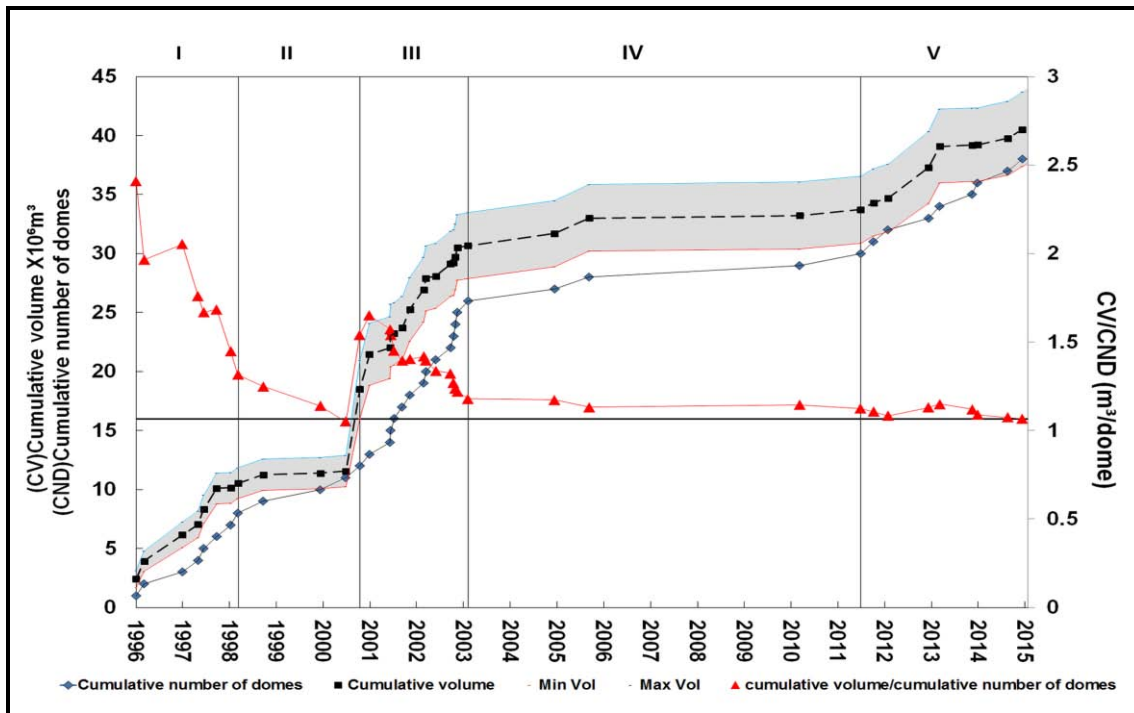


Figura 31. Volumen Acumulado cuadros negros (CV). Número acumulado de domos, son los rombos (CND).

Los triángulos son el cociente de CV/CND. El área sombreada (gris) son los errores asociados a la estimación del volumen

5.2.- Tasas promedio de extrusión de lava de largo plazo durante los regímenes de emplazamiento de domos

Se estimaron las tasas promedio del número de domos emplazados (número de domos emplazados por unidad de tiempo) y las tasas medias de extrusión de lava de largo período para cada régimen, también se calculó el número de domos y el volumen acumulado de lava extruido para cada régimen, dividiéndolos por la duración total de cada régimen para obtener las tasas medias de largo periodo. Los resultados se resumen en la Tabla 2 (Anexo 5). La tasa promedio de producción de lava para todo el período es de $\sim 0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabla 2, final de la columna e, Anexo 5)).

Aunque estas tasas promedio tienen poco significado físico, ya que los domos en este episodio eruptivo del Popocatepetl han crecido a lo largo de períodos de tiempo mucho más cortos que la duración de los regímenes, proporcionan un criterio para comparar entre los diferentes regímenes del volcán. También es importante enfatizar que las tasas más realistas de extrusión de lava de los domos individuales (tasas de corto plazo) pueden ser mayores, como se discute en la siguiente sección. Pero es la relación CV/CND, el parámetro que revela más claramente lo anterior, ya que refleja si el proceso tiende a emplazar lava en menos domos de volumen mayor o en un mayor número de domos de volumen más pequeño. Ambas series, el número acumulado de domos emplazados (CND) y el volumen acumulado máximo estimado alcanzado por cada domo en millones de metros cúbicos (CV) muestran pendientes significativamente diferentes en cada uno de los regímenes, lo que reafirma la alternancia de cada régimen.

5.3.- Volúmenes y tasas de extrusión de corto plazo (Instantáneas) de los domos emplazados durante los regímenes

Los domos emplazados cubren una amplia gama de volúmenes. El domo de volumen más grande, D1200-12, que supera los seis millones de metros cúbicos marca el inicio de un régimen alto. De hecho, la mayoría de las domos que exceden el volumen medio V_a tienden a caer en regímenes altos. En contraste, los domos con volúmenes por debajo de ese promedio no muestran una clara correlación con los regímenes. Por ejemplo, el domo más pequeño, D0214-36 (Tabla 1 (Anexo 4), Figura 20d), con ~6000 metros cúbicos, pertenece al

régimen alto V. Esto sugiere que hay una tendencia para que los domos con volumen mayor sean otra característica de los regímenes altos, mientras que los domos pequeños pueden pertenecer a regímenes altos o bajos.

La tasa media de extrusión de corto plazo de los domos de lava (columna f en la Tabla 2 (Anexo 5)), para todo el período eruptivo de 1996-2015, es $\sim 8.3 \text{ m}^3 / \text{s}$. Aunque las tasas a corto plazo están relacionadas con los regímenes (figura 32), lo es de manera menos clara, ya que algunos domos emplazados durante los regímenes “bajos” muestran “altas” tasas de extrusión de corto plazo, en contraste con las tasas de largo plazo (línea verde horizontal en la figura 32).

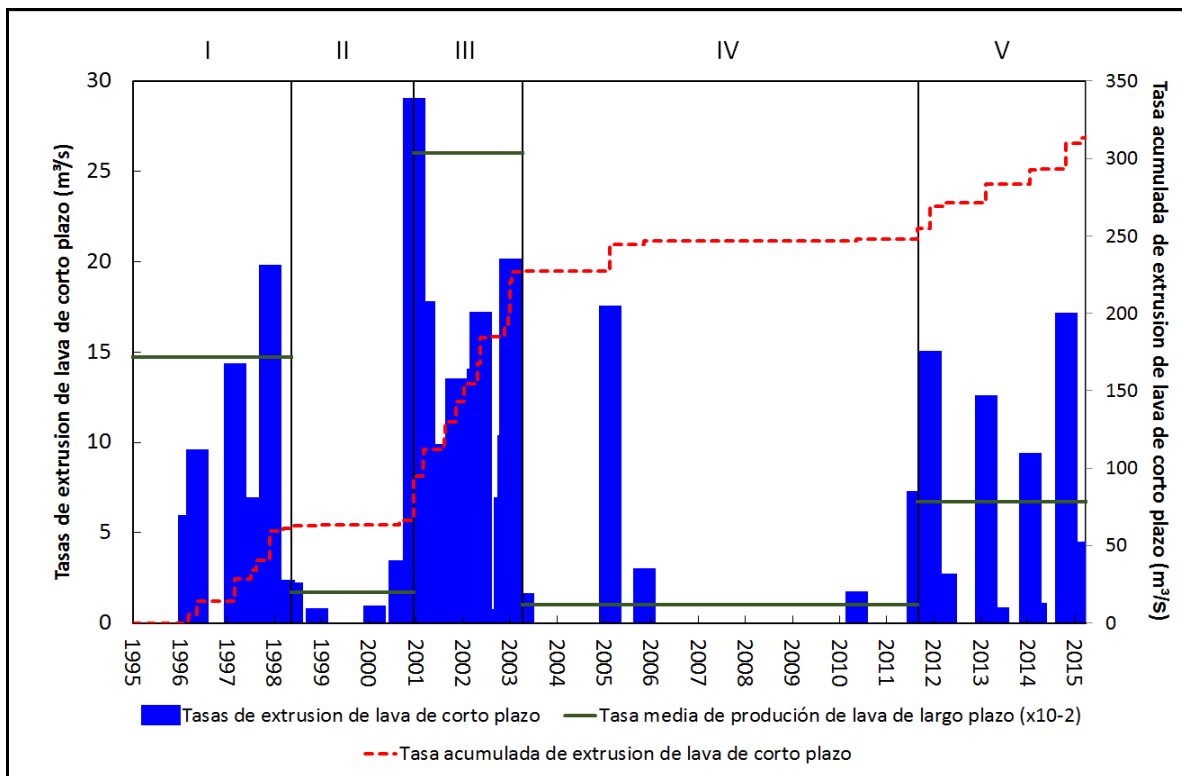


Figura 32. Tasas de extrusión de lava de corto plazo por domo emplazado en el volcán Popocatepetl (barras azules). Tasa acumulada de extrusión de lava a corto plazo de los domos (línea roja discontinua). Las líneas verticales negras marcan los cinco regímenes propuestos para este trabajo. Las líneas verdes horizontales representan (10^{-2}) de la media de las tasas de producción de lava a largo plazo referidas a la escala del eje vertical izquierdo

CAPITULO 6.- Estadística general de los tiempos de emplazamiento, volúmenes y espesores de los domos

Se han identificado cinco regímenes diferentes, caracterizados por periodos alternados de altas y bajas tasas de emplazamiento y producción de lava, identificando los regímenes altos y bajos por las pendientes altas y bajas en el diagrama acumulativo, separados por las líneas verticales en la figura 31. Esto sugiere que la secuencia eruptiva de emplazamientos de domos puede ser un proceso no estacionario. De la tabla 1 se obtiene una serie con los tiempos entre emplazamientos. Un ensayo de media móvil de cinco elementos (Klein 1982) realizado en los tiempos entre los emplazamientos sucesivos, como se ilustra en la figura 33, confirma el carácter no estacionario de la secuencia de emplazamiento (Mendoza-Rosas., et al 2016).

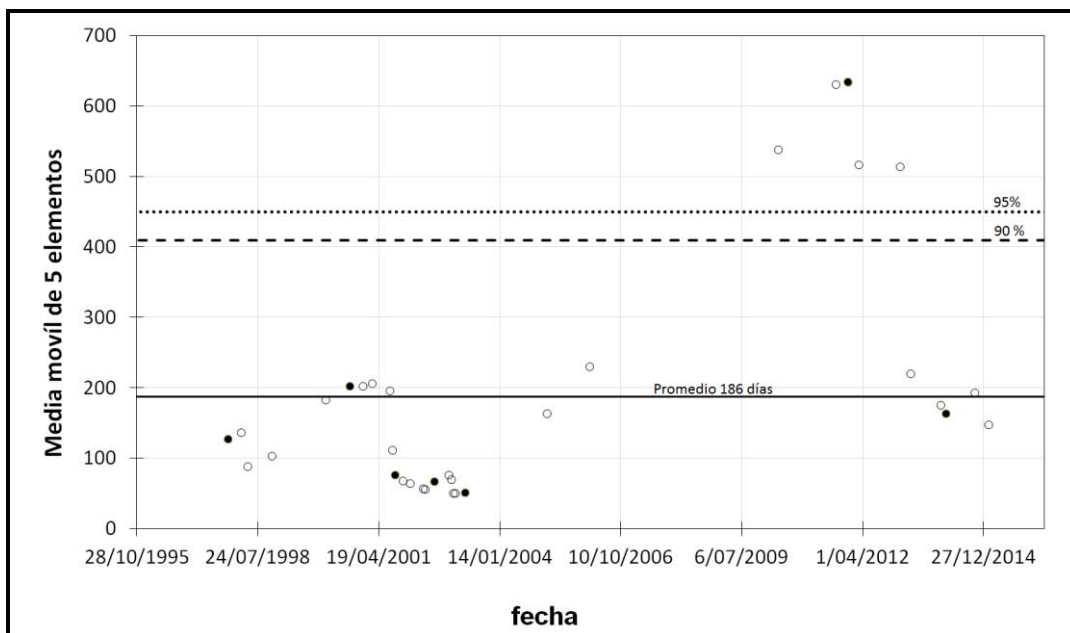


Figura 33. Media móvil de intervalos de tiempo consecutivos entre eventos de emplazamiento de domos de lava (Klein 1982). Los círculos abiertos representan promedios de cinco intervalos de tiempo consecutivos graficados a la fecha del último evento de cada intervalo. Así, cada quinto punto (círculo lleno) es

independiente de los otros. La línea horizontal negra sólida es la media de todos los períodos de tiempo entre eventos. La línea punteada fina representa el nivel de confianza superior del 95%, y la línea discontinua gruesa representa el nivel de confianza superior del 90%. Varios círculos abiertos y al menos un círculo lleno que cae más allá de los intervalos de confianza dados, indican una secuencia no estacionaria.

Para probar el carácter aleatorio del proceso, se buscó una posible dependencia entre períodos de tiempo sucesivos utilizando un diagrama de dispersión de correlación serial (Cox y Lewis 1966). El patrón altamente disperso mostrado en la figura 34 indica que los intervalos de tiempo adyacentes entre los emplazamientos son independientes. Los coeficientes de correlación entre el conjunto T_i y el conjunto $T_i + 1$ de los intervalos de tiempo entre emplazamientos es 0,3, que es lo suficientemente bajo como para rechazar la dependencia.

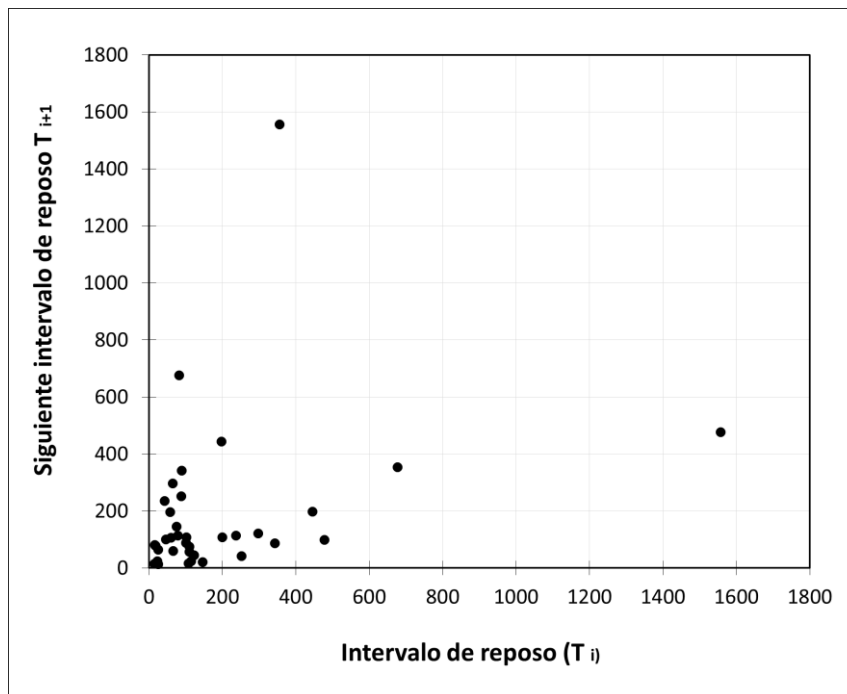


Figura 34. Correlación serial de intervalos sucesivos T_i y $T_i + 1$ entre emplazamientos de domos de lava mostrando alta dispersión y una concentración de puntos cercanos al origen, característica de independencia entre intervalos de tiempo adyacentes. Datos de la Tabla 1.

6.1.- Volúmenes de lava

El análisis de la distribución de tamaños de los domos de lava revela una característica interesante del proceso eruptivo en curso del Popocatepetl. Las columnas con encabezado **N** y **Nco** de la Tabla 3 (Anexo 6), muestran la distribución de frecuencia y la frecuencia acumulativa de los domos en las clases de volumen (en millones de metros cúbicos) de la primera columna obtenida de los datos de la Tabla 1 (Anexo 4). La figura 35a muestra el histograma de la distribución de frecuencias, y la figura 35b, el número de la frecuencia acumulativa (diamantes azules) del número de domos **Nc** que supera un volumen **V**, que muestra un claro decaimiento exponencial. Los errores de las estimaciones de los volúmenes de los domos pueden cambiar la clase en la que se encuentran algunos de los domos. Las barras de error de la figura 35b tienen en cuenta esos errores. Los cuadrados rojos de la figura 35b, representan una función de supervivencia exponencial utilizando la inversa del volumen medio **Va** (en millones de metros cúbicos) de toda la serie de domos, siendo ese valor (1 / 1.07), como media de la distribución:

$$Nc = 38 \exp(-V/Va) \text{-----}(1)$$

Donde V es el límite inferior de cada clase de volumen enumerada en la primera columna de la Tabla 3. La bondad de ajuste entre los valores observados y los valores obtenidos de la Ec. 1 (cuarta columna de la Tabla 3 (anexo 6)) es alta (correlación de Pearson $r^2 = 0.99$), lo que sugiere que el proceso conduce a

distribuir los volúmenes de los domos de tal manera que el número de domos emplazados depende inversamente de sus volúmenes de acuerdo con una simple función de supervivencia exponencial (Ec. 1).

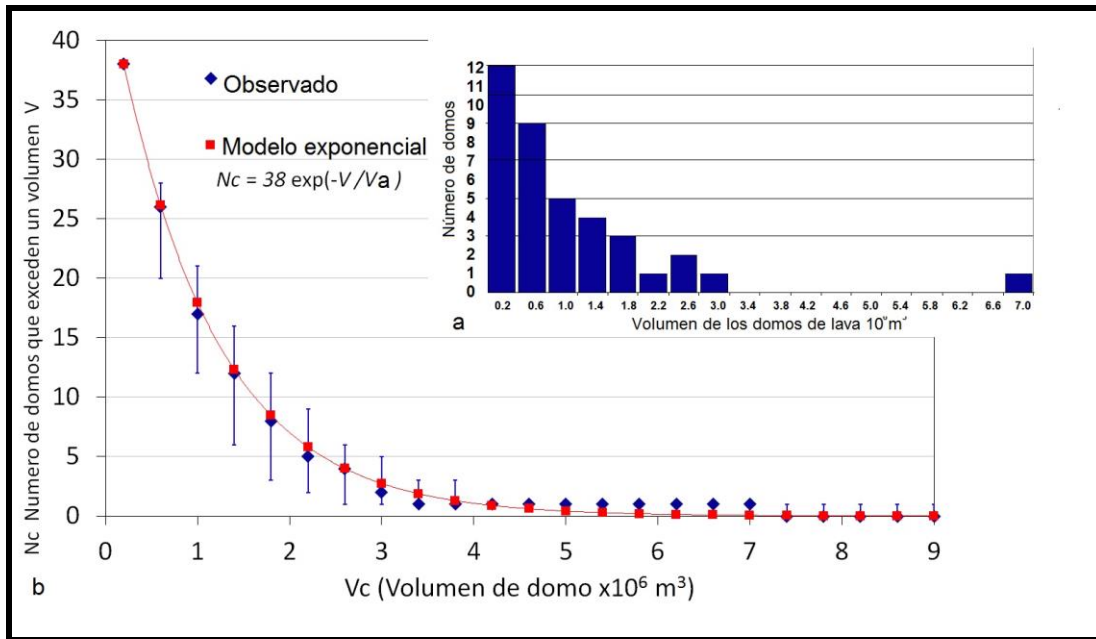


Figura 35a .Histograma de la distribución de frecuencia de los volúmenes de los domos de lava. Figura 35b Frecuencia acumulada de los volúmenes de los domos de lava (diamantes azules). Los cuadrados rojos representan la función de supervivencia exponencial calculada a partir de la inversa del volumen medio

6.2.- Espesores de los domos

De manera similar, el comportamiento de los espesores de los domos de lava, es similar al de los volúmenes; teniendo que la frecuencia acumulativa del número de domos **Nh** que exceden un espesor **Hc**, se ajusta a la función exponencial:

$$N_h = N_d \exp(-H_c/H_m) \text{-----(2)}$$

Donde **Nd** es el número total de emplazamientos (38 a 2015), **Hc** es el espesor estimado de los domos (Tabla 1 (Anexo 4)), y **Hm** es el valor promedio (35 m) de los espesores (figura 36). Las barras de error reflejan los errores derivados de la estimación de los espesores de los domos, ya explicado en secciones anteriores.

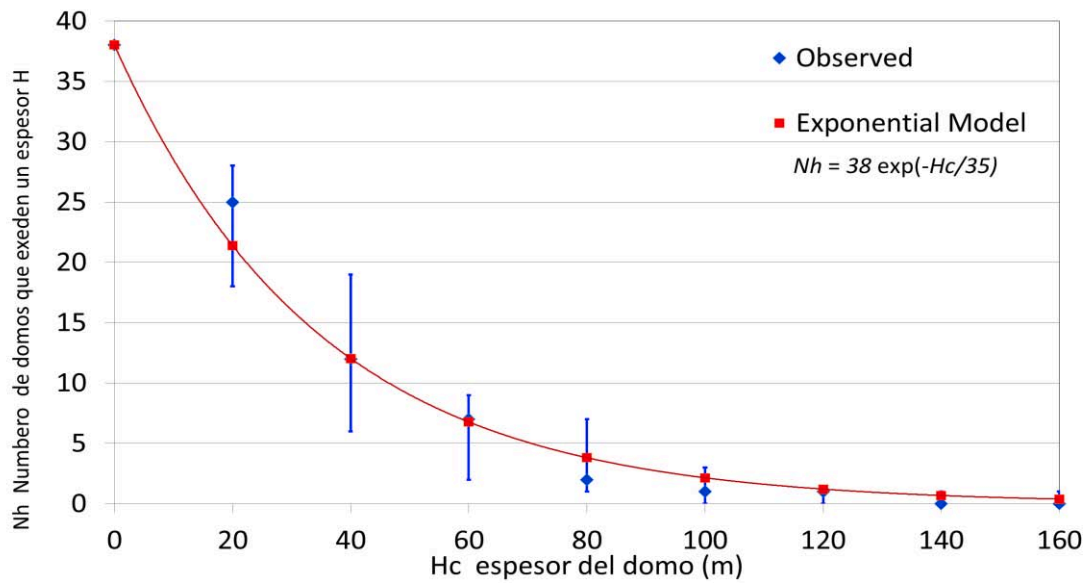


Figura 36. Distribución del número de domos de lava que exceden un espesor Hc (m)

CAPITULO 7.- Discusión y conclusiones generales del proceso de emplazamiento y destrucción de domos en el Popocatépetl

La actividad sostenida del Popocatépetl se manifiesta como un emplazamiento cíclico de los domos, seguido por etapas de destrucción de los mismos, principalmente por explosiones vulcanianas con una amplia gama de intensidades, comportamiento frecuentemente asociado al volcanismo de conducto abierto (Rose et al., 2013).

Desde el comienzo de la fase magmática en 1996 hasta 2015, en este estudio se ha reconocido el emplazamiento de 38 domos dentro del cráter principal de Popocatépetl con un volumen promedio de $\sim 1 \times 10^6 \text{ m}^3$ y una tasa media de producción de magma de largo plazo de $6.8 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{seg}$. Estas estimaciones son aproximadamente el doble de las estimadas para el episodio previo de 1919-1927, lo que sugiere que los dos episodios son probablemente de naturaleza similar, pero diferentes en escala, siendo el actual de mayor duración y con un mayor volumen total de magma emitido asociado al emplazamiento de los domos.

El análisis de episodios históricos anteriores sugiere que desde su última gran fase pliniana, alrededor de 1100 años B.P. (Siebe et al., 1996), este tipo de actividad ha sido típica de Popocatépetl. Sin embargo, es importante destacar que esto no responde a la pregunta de si este tipo de actividad predominantemente efusiva puede conducir a una fase pliniana o no (De la Cruz-Reyna et al., 2016).

La evaluación de los peligros asociados con la actividad eruptiva sostenida del Popocatépetl durante más de una década es, por tanto, un problema que requiere una comprensión clara de los procesos volcánicos actuales, que pueden caracterizarse por su persistencia y no por su magnitud. De hecho, la actual tasa de producción de lava del Popocatépetl es baja en comparación con otras erupciones de otros aparatos volcánicos donde se produce el emplazamiento de domos de lava, como el Mt. St. Helens (1980, 1981-1986, 2004-2005), Unzen (1990-1995), Redoubt (1989-1990), Monserrat (1995-1997), Chaiten (2008), Monte. Pelée (1902-1905), Merapi (2006) o San Vicente (1979), incluso durante los regímenes altos (I, III y V), tal como se ilustra en la figura 37.

Una comparación interesante resulta con la actividad del volcán de Colima, los emplazamientos de domos en este volcán ocurren en un cráter con poca profundidad, en el Popocatépetl hasta ahora todos los emplazamientos se producen en un cráter confinado por lo que la construcción de los domos se encuentra contenida, siendo la componente vertical o espesor de los mismos un valor importante para caracterizar el proceso. Los domos en el volcán de Colima al emplazarse en un cráter poco profundo casi todos de manera inmediata colapsan formando flujos de bloques y cenizas y flujos de lava. Sin embargo cuando la viscosidad y la tasa media de producción de lava es muy baja; como el caso del domo de 2007 que permaneció emplazado por mucho tiempo y casi estático, no fluyó, y fue destruido por actividad explosiva posteriormente (<http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm>).

Sin embargo, los 20 años de actividad persistente en el Popocatepetl, han producido un volumen considerable de magma, siendo el volumen neto bruto acumulado de lava emitida para el período 1996-2015 de unos 40 millones de metros cúbicos. Teniendo en cuenta que la capacidad del cráter de antes de 1994 se ha estimado en 35 millones de metros cúbicos (Macías y Siebe 2005), si los emplazamientos no hubieran sido destruidos y una porción significativa de su volumen no hubiese sido expulsada como escombros y tefras, el cráter del Popocatepetl habría sido sobrepasado hacia el inicio del régimen V.

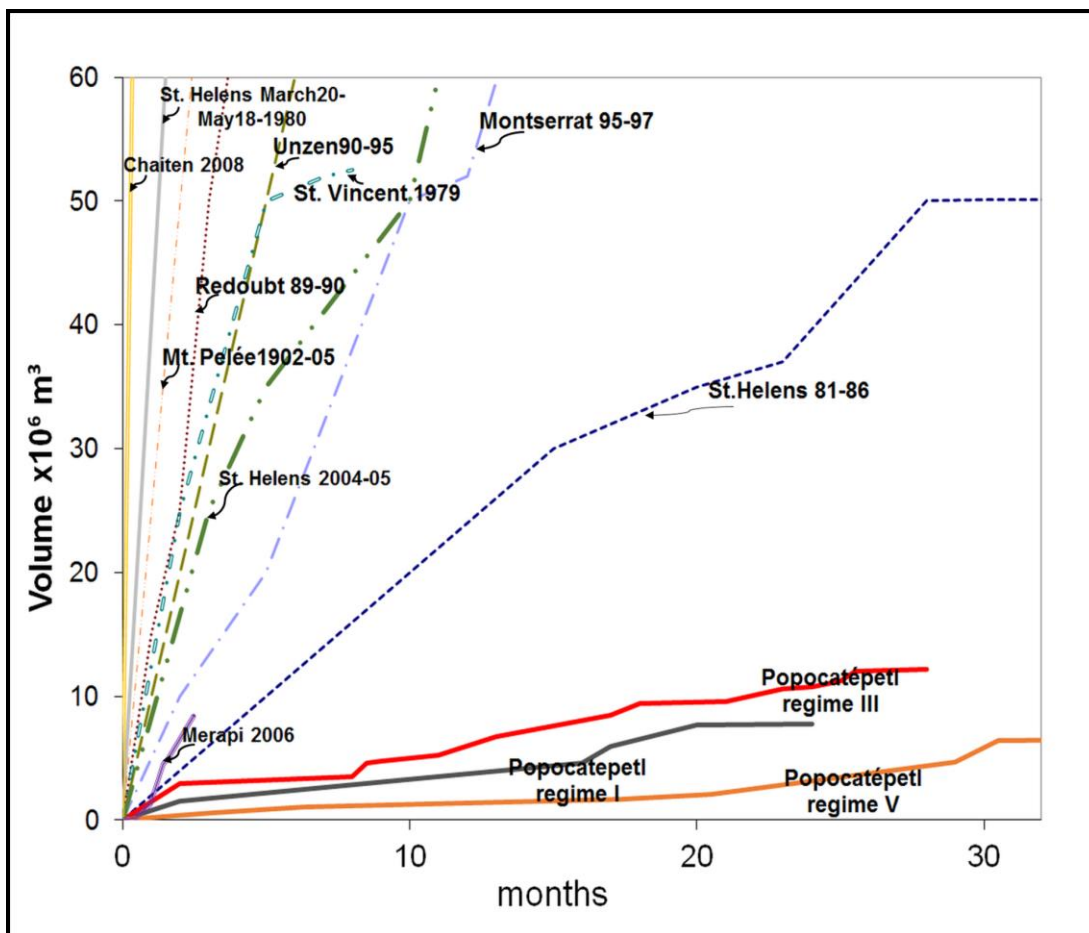


Figura 37. Producción acumulativa de lava para el Popocatepetl (en los regímenes altos I, III y V) en comparación con otros volcanes (Shilling et al. 2008, Pallister et al., 2013, Carr et al., 2016).

El actual episodio eruptivo del Popocatépetl de 1994 a 2015 parece reflejar una tendencia hacia un proceso de autorregulación, como se ilustra en la figura 38, donde la producción de lava y la destrucción de material alcanzan algún grado de equilibrio: a medida que el volumen acumulado de lava emitida aumentó rápidamente entre 1996 y 2003 (línea punteada con cuadros negros en la figura 38), el volumen acumulado del material destruido por eventos explosivos también aumentó a una velocidad similar (línea punteada con círculos azules en la figura 38). La diferencia entre estos valores es el remanente de lo que quedaba de los domos y de los restos acumulados que caían dentro del cráter (línea central con triángulos rojos de la figura 38). Este volumen alcanzó algún equilibrio después de 2003, representado como un valor casi constante del volumen remanente, este factor sin duda ha influido mucho en el manejo del riesgo volcánico en el episodio actual de actividad para el Popocatépetl (De la Cruz-Reyna et al., 2016).

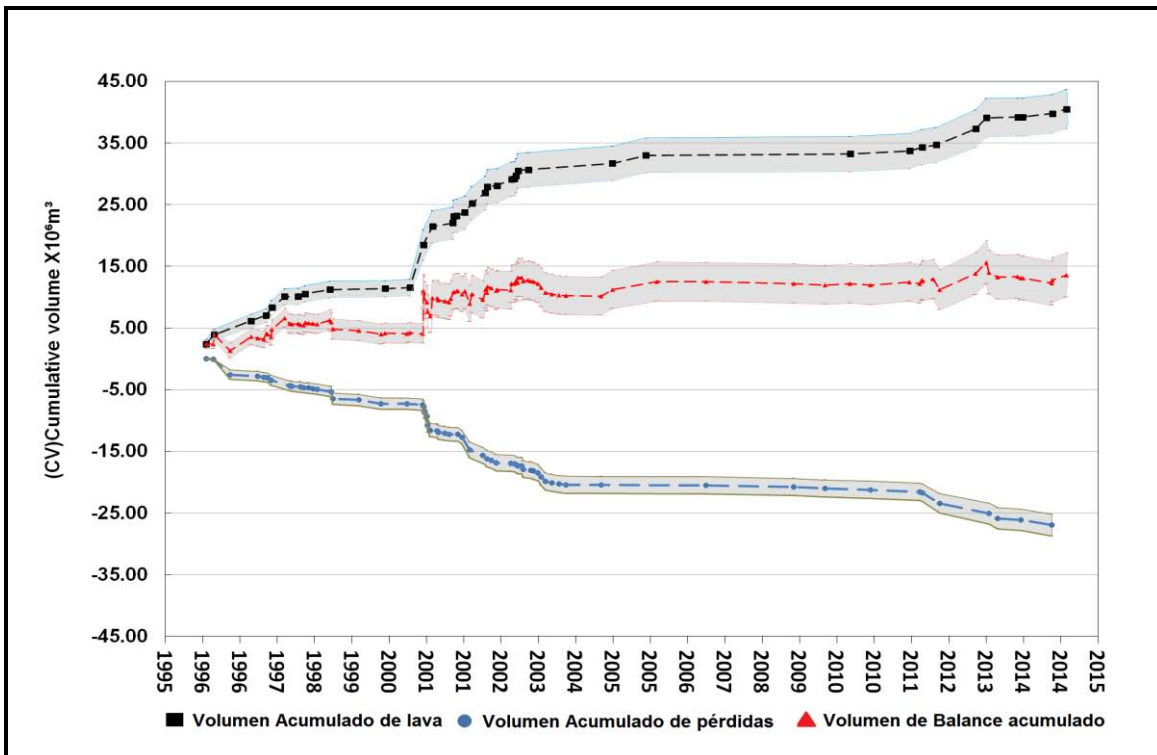


Figura 38. Volumen acumulado de lava extruida (cuadrados negros), volumen acumulado de la pérdida de material en el cráter (círculos azules) y balance entre dichos valores (triángulos rojos) para el período 1996-2015; este representa el material residual que queda en el cráter del volcán producto de los emplazamientos y destrucciones de domos. Las regiones grisáceas alrededor de las líneas representan la incertidumbre (error) de las estimaciones de los volúmenes acumulados utilizando una suma cuadrática de los errores de emplazamientos sucesivos o eventos de destrucción.

Las causas de la actual actividad sostenida en el Popocatepetl, y su evolución futura, son cuestiones que admiten múltiples respuestas. Primero viene el problema sobre la causa que produce el proceso del crecimiento de los domos de la lava. En general, la flotabilidad del magma inducida por el contenido de volátiles proporciona una fuerza primaria que impulsa el proceso de emplazamiento de domos (González-Mellado y De la Cruz-Reyna, 2008).

En el caso del Popocatépetl, la sucesión de domos emplazados puede ser explicada por una fuerza de flotación cambiante en un complejo sistema de conductos causado por el contraste de densidad variable entre el magma rico en volátiles y la roca encajonante. Esta fuerza empuja la columna de magma hacia arriba cuando el contenido volátil excede un cierto límite y cesa cuando el magma ha perdido algunos de sus volátiles. El carácter episódico del ascenso del magma puede ser consecuencia de un proceso de auto-regulación controlado por la desgasificación intensa del magma (González-Mellado y De la Cruz-Reyna 2008; Taisne y Jaupart 2009, Mendoza-Rosas, et al 2017). Desde el comienzo de la actual erupción en 1994, el Popocatépetl ha estado emitiendo de manera pasiva una gran cantidad de gases volcánicos. A pesar de la relativamente baja producción de magma, los flujos medidos de SO₂ han sido típicamente alrededor de 5000 t / d, aunque a veces (por ejemplo, en enero de 1997 y septiembre-diciembre de 1998), las emisiones han alcanzado hasta 40.000-50.000 t / (Delgado-Granados et al., 2001, Wright et al., 2002). Las emisiones totales de SO₂ son considerablemente mayores durante los períodos efusivos (Delgado-Granados et al., 2001).

Mientras que el magma rico en volátiles sea lo suficientemente “flotante” como para ascender, la desgasificación intensa y la cristalización aumentan su densidad, al menos en una porción significativa de la parte superior de los conductos, haciendo que la extrusión de lava se detenga e incluso se invierta produciendo subsidencia, como ha sido el caso de varios de los domos, por ejemplo, D0801-14 (figura 12f) y D0215-38 (figuras 20f y 30f). En tal situación, la

profundidad de la desgasificación y la permeabilidad y estructura del conducto poco profundo en Popocatépetl pueden estar controlando los cambios entre el volcanismo explosivo y efusivo como sugiere Cross et al. (2012).

El proceso cíclico de emplazamiento y destrucción de los domos en Popocatépetl puede contemplarse entonces en términos de un modelo simple en el que los volúmenes de los domos emplazados son controlados principalmente por dos parámetros variables: el contenido volátil del magma y su capacidad de exsolución.

Dichos volúmenes se distribuyen de acuerdo con una ley exponencial (Ec.1), que refleja la energía liberada durante el emplazamiento de cada domo de manera similar a la distribución de magnitudes de terremotos en una región tectónicamente activa. En el caso de los sismos tectónicos, la magnitud es una medida de la energía (y por lo tanto la deformación) liberada por cada rompimiento, y la ley de escalamiento sísmica, también una distribución exponencial (Utsu, 1971), establece si la energía sísmica es liberada por muchos rompimientos pequeños o algunos grandes sismos, dependiendo de cómo el esfuerzo tectónico es redistribuido por la liberación de la tensión de los sismos en todo el rango de magnitud (por ejemplo, Utsu y Hirota, 1968, y Helmstetter et al., 2005) La distribución exponencial acumulativa de los volúmenes de los domos de lava describe un comportamiento similar para los volúmenes de los mismos, que refleja la energía liberada durante el emplazamiento de cada domo (figura 39).

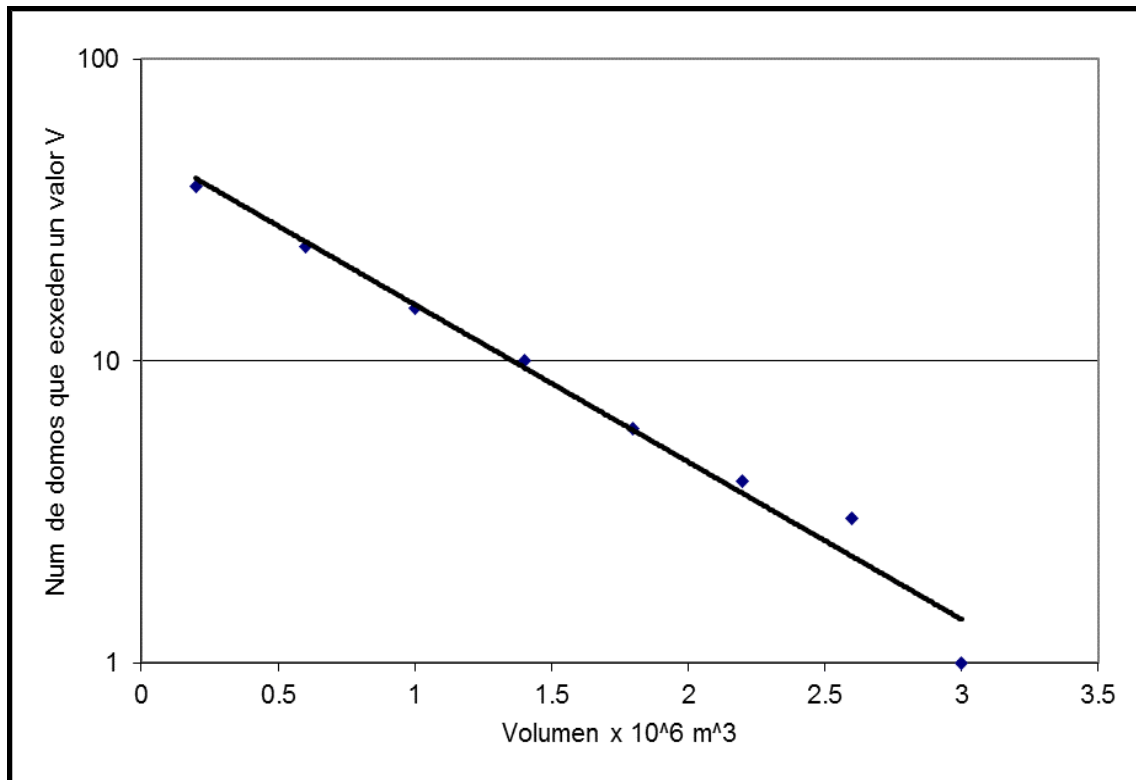


Figura 39. Frecuencia acumulada de los volúmenes de los domos de lava (diamantes). La línea negra es una función de aproximación logarítmica

Cuando el contenido volátil produce una fuerza de flotabilidad que actúa contra la gravedad y las fuerzas de fricción, libera una cantidad de energía gravitacional relacionada con la altura de cada uno de los domos (González-Mellado y De la Cruz-Reyna 2008; Taisne y Jaupart 2008, Mendoza-Rosas, et al 2017) cuando el emplazamiento de los domos ocurre en un cráter confinado, en el cual el volumen depende proporcionalmente del grosor o espesor del domo (Tabla 1 (Anexo 4)).

Se puede concluir que mientras este episodio eruptivo mantenga un proceso de autorregulación, la altura de los domos no generará una sobrepresión

excesiva en el sistema magmático y la actividad efusiva puede continuar indefinidamente sin exceder un nivel relativamente bajo de explosividad de destrucción de los domos. Sin embargo, si el volumen o altura de un domo excede el nivel del domo D1200-12, que está casi fuera de las expectativas planteadas por la Ec. 1, la naturaleza de la erupción puede evolucionar a un nivel diferente. La sobrepresión puede causar una explosión más fuerte que despeje un mayor volumen del contenido del conducto, conduciendo a una despresurización y desestabilización repentinas de todo el sistema magmático.

CAPITULO 8.- Estudios futuros. Correlaciones de algunos otros parámetros geofísicos con el emplazamiento y destrucción de domos en el Popocatepetl

8.1.- Deformaciones superficiales

Un aspecto importante de la evaluación de la dinámica volcánica se centra en la detección de cambios en el sistema magmático profundo. Sin embargo, el sistema magmático profundo no es directamente observable, pero puede ser detectado por firmas que son observables usando técnicas aplicadas en la superficie o desde el espacio. La deformación del suelo es una observación volcanológica primaria (Donovan et al, 2012). La mayor presión sobre la litosfera producida por una inyección o desplazamiento de magma genera una deformación que se extiende a la superficie, con una magnitud que depende de su profundidad, del volumen de la fuente de esfuerzos, de la homogeneidad del medio y de las estructuras geológicas existentes. La deformación en la litósfera se puede medir en la superficie mediante diversos dispositivos como son GPS, EDM, Inclínometría nivelación geodésica, y métodos satelitales como el InSAR. Con estas técnicas y con los modelos de inversión adecuados es posible determinar la naturaleza y características de la fuente que las produce, tomando en cuenta los factores de no unicidad en este análisis, limitando las posibles soluciones del problema inverso por medio de la mayor cantidad posible de información adicional e independiente proporcionada por diferentes parámetros medibles.

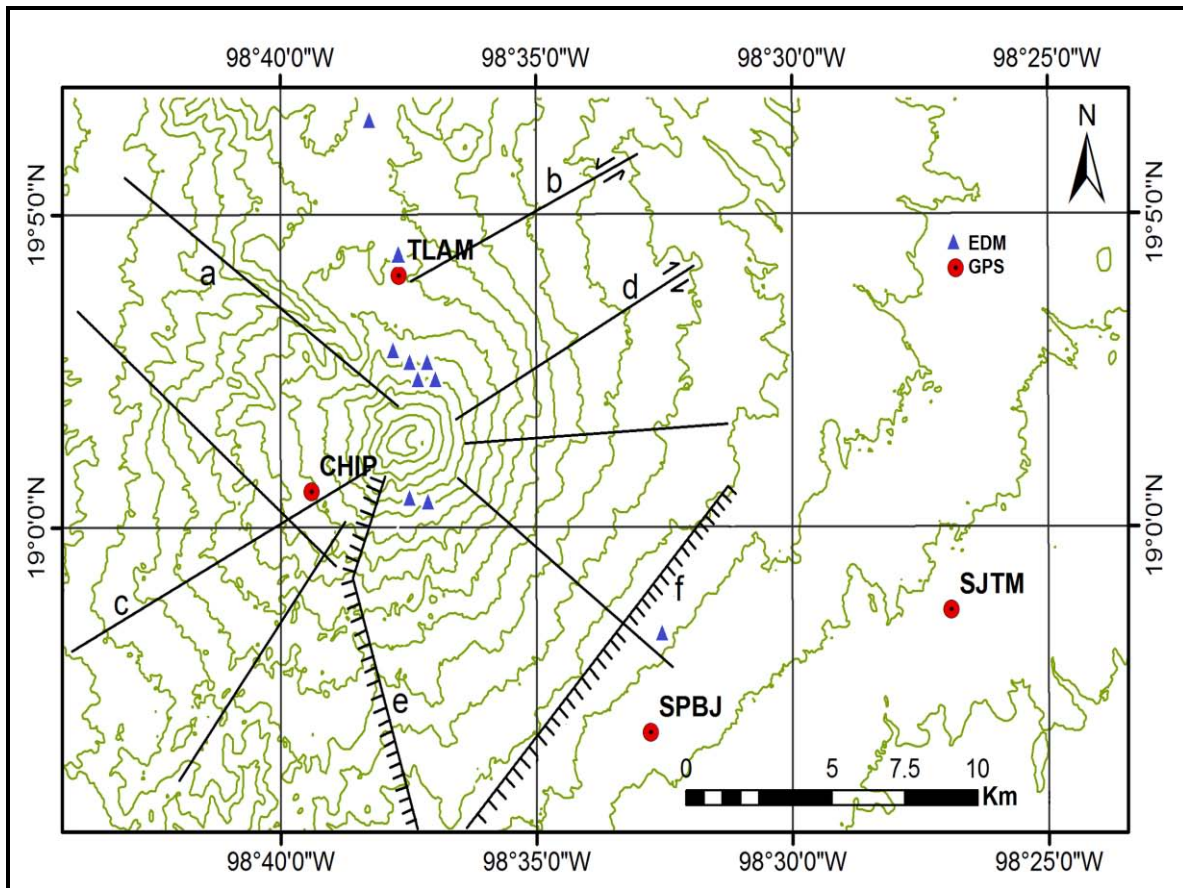


Figura 40. Red de GPS y EDM en el volcán Popocatepetl

Para el Popocatepetl, existen datos de monitoreo sísmico desde las primeras etapas de la actividad precursora, casi 5 años antes del inicio del episodio eruptivo actual (De la Cruz-Reyna et al, 2008). Además de estaciones sísmicas de período corto y de banda ancha, y otros dispositivos de monitoreo, visuales, térmicos, geoquímicos e infrasónicos, que han operado desde las primeras etapas de la erupción en curso. Sin embargo, el monitoreo de la deformación del terreno ha estado limitado a 3 estaciones inclinométricas y 2 redes geodésicas basadas en EDM en los flancos N y SE de la estructura principal del edificio volcánico (Fig. 40). Un sistema automático de EDM ubicado en el sitio de monitoreo Tlamacas (TLAM), en el flanco N del volcán operó entre

1999 y 2004. Con la excepción de algunas oscilaciones de corto período detectadas durante el emplazamiento y destrucción de los domos más grandes en el período marzo 1997 a diciembre de 2000 (Gómez-Vázquez et al, 2016), no se han observado deformaciones importantes en el Popocatépetl con esos instrumentos de medición (Cabral-Cano et al, 2008; Pinel et al, 2011, Espíndola et al, 2004).

Sin embargo con estudios futuros reprocesaremos los datos disponibles de EDM (figura 41a), así como la información recabada en tiempo real, de esta técnica así como de los datos GPS (figura 41b).



Figura 41a. Mediciones EDM en el flanco norte del Popocatépetl



Figura 41b Estación GPS al sureste del Popocatépetl

Reflexiones finales y recomendaciones

Al momento de la redacción de este trabajo (diciembre 2016), dos nuevos episodios de emplazamiento de domos detectados en enero de 2016 (figura 42) y noviembre-diciembre de 2016 (figura 43), conformarían los domos 39 y 40 en el período de marzo de 1996 a diciembre de 2016. La actividad efusiva en el Popocatepetl no cesa, por lo que es importante continuar con este estudio con fines de mejorar la comprensión del proceso eruptivo en curso.



Figura 42. Domo # 39, emplazado en enero de 2016. Imagen tomada de www.cenapred.unam.mx



Figura 43. Domo # 40, emplazado en noviembre-diciembre de 2016. Imagen tomada de www.cenapred.unam.mx

Los resultados más importantes de este trabajo se encuentran en los apéndices 1 y 2, y son dos artículos de investigación uno publicado y otro recomendado para su publicación con correcciones menores

Referencias

Arambula-Mendoza R (2002). Interpretación del tremor registrado en el volcán Popocatepetl durante la crisis eruptiva de diciembre del 2000. Tesis de licenciatura de Ingeniería Geofísica. Facultad de Ingeniería UNAM.

Aparicio Resco P (2013). Fotogrametría y arqueología virtual: insertando la técnica en la metodología de investigación histórico arqueológica, Universidad de Burgos. Documento electrónico, <https://ubuvirtual.ubu.es>.

Boudal C, Robin C (1989) Volcán Popocatepetl: recent eruptive history, and potential hazards and risks in future eruptions. In: Latter JH (ed) Volcanic hazards. IAVCEI Proc. Volcanol. Springer, Berlin, pp 110–128

Cox DR, Lewis PAW (1966) The Statistical Analysis of Series of Events, Methuen and Co., London

CENAPRED. (2012). <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/225-HISTORIADELAACTIVIDADDELVOLCNPOPOCATPETL-17AOSDEERUPCIONES.PDF>

Cabral Cano E, Correa Mora F, Meertens C (2008). Deformation of Popocatepetl volcano using GPS: Regional geodynamic context and constraints on its magma chamber. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 170, 24–34

Cross JK, Roberge J, Jerram DA (2012) Constraining the degassing processes of Popocatepetl Volcano, Mexico: A vesicle size distribution and glass geochemistry study. *J Volcanol Geotherm Res* 225-226: 81-95.

De la Cruz-Reyna, S, Quezada, JL, Peña C, Zepeda O, Sánchez T (1995) Historia de la actividad del Popocatepetl (1354-1995). In: *Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*. CENAPRED-UNAM, México, D.F, pp 3-22.

De la Cruz-Reyna S, Siebe C (1997) The giant Popocatepetl stirs. *Nature* 388 (6639): 227

De la Cruz Reyna S, Tilling R (2008a) Scientific and Public Responses to the Ongoing Volcanic Crisis at Popocatepetl Volcano, México: Importance of an Effective Hazards Warning System. *J Volcanol Geotherm Res* 170: 121-134.

De la Cruz-Reyna S, Yokoyama I, Martínez-Bringas A, Ramos E (2008b) Precursory Seismicity of the 1994 Eruption of Popocatepetl Volcano, Central Mexico. *Bull Volcanol* 70(6): 753-767

De la Cruz Reyna S, Tilling R, Valdés-González C (2016) Challenges in responding to a sustained, continuing volcanic crisis: the case of Popocatepétl volcano, Mexico, 1994- present. In: D Bird, G Jolly, K Haynes, B McGuire, and C Fearnley (Eds.) Volcanic Crisis Communication - Observing the Volcano World. Advances in Volcanology series. Springer-Verlag (In preparation).

Delgado-Granados H, Cárdenas-González L, Piedad-Sánchez N. (2001) Sulfur dioxide emissions from Popocatépetl volcano (Mexico): case study of a high emission rate, passively degassing eruptive volcano. J Volcanol Geotherm Res 108: 107–120

Diefenbach AK, Bull KF, Wessels RL, McGimsey RG (2013) Photogrammetric monitoring of lava dome growth during the 2009 eruption of Redoubt Volcano. J Volcanol Geotherm Res 259: 308–316

Dietz H (2010) Use Your Camera To Capture"3D" Anaglyphs. <http://www.instructables.com/id/Use-Your-Camera-To-Capture-3D-Anaglyphs/>

Donnadiou F, Kelfoun K, Van Wyk de Vries B, Cecchi E, Merle O (2003) Digital photogrammetry as a tool in analogue modelling: applications to volcano instability. J Volcanol Geotherm Res 123: 161-180

Donovan A, Oppenheimer C, Bravo M. (2012). Science at the policy interface: volcano-monitoring technologies and volcanic hazard management. *Bull Volcanol* 74:1005–1022. doi:10.1007/s00445-0120581-5

Dr Atl (1939) *Volcanes de México. Vol. I. La Actividad del Popocatépetl*, Editorial Polis, México

Espíndola J M, Godinez M L, ESPINDOLA V H. (2004). Models of Ground Deformation and Eruption Magnitude from a Deep Source at Popocatepetl Volcano, Central Mexico. *Natural Hazards* 31: 191–207.

Friedländer I (1921) La erupción del Popocatépetl. *Memorias Sociedad Científica Antonio Alzate. México* 40: 219–227.

Gil Cruz F, Chouet B A (1997). Long-period events, the most characteristic seismicity accompanying the emplacement and extrusion of a lava dome in Galeras Volcano, Colombia, in 1991. *J Volcanol Geotherm Res* 77 121- 158.

González-Mellado A & De la Cruz-Reyna S (2008) A simplified equation of state for the density of silicate hydrous magmas: An application to the Popocatépetl buoyancy- driven dome growth process. *J Volcanol Geotherm Res* 171: 287-300

Gómez Santiago F (2009). Sismicidad del Volcán Popocatepetl durante el crecimiento de dos domos de lava en Agosto de 2001. Tesis de maestría Facultad de Ingeniería. UNAM.

Gomez-Vázquez A. (2012). Procesos de emplazamiento y destrucción de domos en el volcán Popocatepetl (1996-2008). Tesis profesional MsC. UNAM.

Guevara E, Quaas R, Castelán G, Ortiz J, Vázquez J, Morquecho C, Alarcón A M, Martínez-Bringas A, Gómez-Vázquez A, Espitia G, Alonso P y Cárdenas L (2003). Instrumentación y monitoreo del volcán Popocatepetl. Ed. CENAPRED. pp101. ISBN: 970-628-733-7

Helmstetter A, Kagan YY, Jackson DD (2005) Importance of small earthquakes for stress transfers and earthquake triggering. J Geophys Res. doi:10.1029/2004JB003286.

Kanamori H, Anderson DL (1975) Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bull Seism Soc Am 65: 1073-1096

Lerma García, J.L. (2002): Fotogrametría moderna: analítica y digital. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. España.

Macias JL, Siebe C (2005) Popocatepetl's crater filled to the brim: significance for hazard evaluation. J Volcanol Geotherm Res 141: 327-330

Marsella M, Nardinocchi C, Proietti C, Daga L, Coltelli M (2014) Monitoring active volcanos using aerial images and the orthoview tool. Remote Sens. doi:10.3390/rs61212166.

Martínez Bringas Alicia (2003). Variaciones temporales de la atenuación de las ondas coda y del valor b, asociadas a la actividad del volcán Popocatépetl de 1995 a 2003. Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM.

Matthews SJ, Gardeweg MC, Sparks RSJ (1997) The 1984 to 1996 cyclic activity of Lascar Volcano, northern Chile: cycles of dome growth, dome subsidence, degassing and explosive eruptions. Bull Volcanol 59: 72–82.

McNutt SR (2000). Seismic Monitoring In Encyclopedia of Volcanoes .Sigurdsson, H., B. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer, and J. Stix (eds.), Academic Press, San Diego, CA, 1095-1119

Mendoza-Rosas A.T. Gómez-Vázquez A., De la Cruz-Reyna S. (2016). Statistical analysis of the sustained lava dome emplacement and destruction processes at Popocatépetl volcano, central México. En revision. Bull. Volcanol.

Moffitt F H , Bouchard H (1982) Surveying. Ed Harper and Row. Seventh Edition

Pinel V, Hooper A, De la Cruz-Reyna S, Reyes-Davila G, Doin M P, Bascou P, (2011). The challenging retrieval of the displacement field from InSAR data for

andesitic stratovolcanoes: Case study of Popocatepetl and Colima volcano, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*200: 49-61. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.12.002.

Ramirez-García N (2008). Sistema de visión estereoscópica basado en anaglifo para aplicaciones en realidad virtual. MSc thesis, School of Geology, IPN, México

Robin C, Boudal C (1987) A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern volcano Popocatépetl. *J Volcanol Geotherm Res* 31: 115–130

Rose WI, Palma JL, Delgado-Granados H, Varley N (2013) Open-vent volcanism and related hazards: Overview. *Geol Soc Am Special Paper* 498. pp vii-xiii.

Ryan GAS, Loughlin C, James MR, Jones LD, Calder ES, Christopher T, Strutt MH, Wadge G (2010) Growth of the lava dome and extrusion rates at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, West Indies: 2005–2008. *Geophys Res Lett* 37: 1-5

Sánchez-Sobrino J A (2007) Introducción a la Fotogrametría. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Cátedra de Topografía. Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

SEAN (1986) Bulletin of the Scientific Event Alert Network. 11(1): 10-11.

Schilling SP, Thompson RA, Messerich JA, Iwatsubo EY (2008) Use of digital aerophotogrammetry to determine rates of lava dome growth, Mount St. Helens, Washington, 2004–2005. *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004–2006*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1750: 145-167

Siebe C, Abrams M, Macías JL, Obenholzner J (1996). Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, Central Mexico: past key to the future? *Geology*, 24, 399-402.

Siebe C, Macías JL (2004). Volcanic hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoess and monogenetic scoria cones in the Sierra de Chichinautzin volcanic field. *Fieldtrip Books, Vol 1*, Geological Society of America.

Siebe Claus, Salinas Sergio, Arana-Salinas Lilia, Macías José Luis, Gardner James and Bonasia Rosanna.(2017). The ~23,500y 14C BP White Pumice Plinian eruption and associated debris avalanche and Tochimilco lava flow of Popocatepetl volcano, México. *J Volcanol Geotherm*. En prensa. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.01.011.

Stasiuk MV, Jaupart C (1997). Lava flow shapes and dimensions as reflections of magma system conditions. *J Volcanol Geotherm Res* 78: 31-50.

Taisne, B., and Jaupart C. (2009), Dike propagation through layered rocks, J. Geophys. Res., 114(B9), B09203, doi:10.1029/2008jb006228

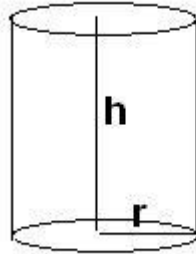
Utsu T (1971) Aftershocks and Earthquake statistics (III). J Geophys Bull Hokkaido Univ 3(5): 379-441.

Utsu T, Hirota T (1968). A Note on the Statistical Nature of Energy and Strain Release in Earthquake Sequences. J Geophys Bull Hokkaido Univ 3(2): 49-64.

Waitz P (1921). La nueva actividad y el estado actual del Popocatépetl. Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate, México. 37: 295-313.

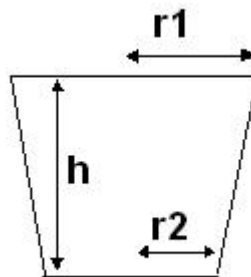
Wright R, De La Cruz-Reyna S, Harris A, Flynn L, Gomez-Palacios JJ (2002) Infrared satellite monitoring at Popocatepétl: explosions, exhalations, and cycles of dome growth. J Geophys Res 107: 2–16.

Anexo 1. Catalogo de formulas para el cálculo de los domos utilizados en este estudio



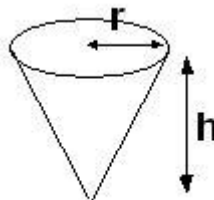
Cilindro

$$\text{Volumen cilindro} = \pi * r^2 * h$$



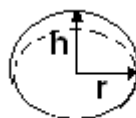
Cono truncado

$$\text{Volumen cono truncado} = \frac{\pi \cdot h}{3} (r1^2 + r1 * r2 + r2^2)$$



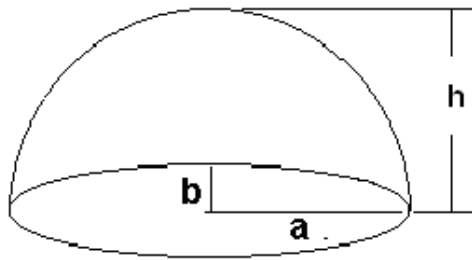
Cono

$$\text{Volumen cono} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot h}{3}$$



Semiesfera

$$\text{Volumen de la semiesfera} = \frac{2\pi \cdot r^3}{3}$$



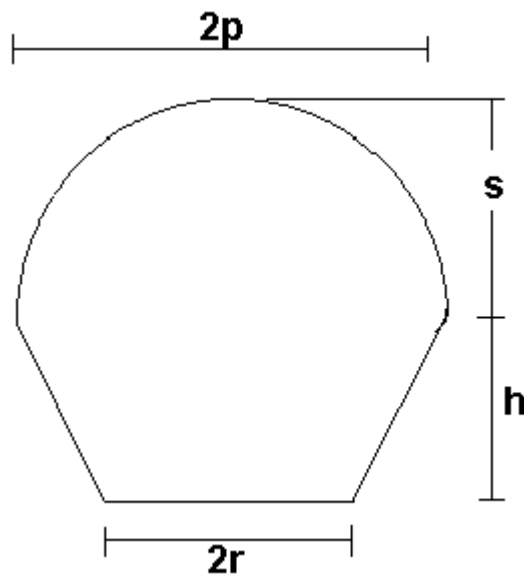
Domo hemisférico de base elíptica

Primero se obtienen dos elementos de la formula general del volumen para facilidad de cálculo (p y w).

$$p = (a * b)^{1/2}$$

$$w = \frac{p^2 + h^2}{2h}$$

$$\text{Volumen} = \frac{\pi}{3} \cdot [h^2 * ((3 * w) - h)]$$



Domo semiesférico sobre un cono truncado invertido

$$w = \frac{p^2 + s^2}{2s}$$

$$Volumen = \frac{\pi}{3} \cdot \left[s^2 * ((3 * w) - s) + \frac{1}{3} * \pi * h * (p^2 + r * p + r^2) \right]$$

Anexo 2. Notas complementarias para el cálculo del volumen de los domos de lava emplazados en el cráter del volcán Popocatepetl

A.2.1.-Fotogrametría analógica

La fotogrametría es la técnica de obtener información fidedigna cuantitativa y cualitativa a partir de imágenes fotográficas denominadas fotogramas o fotografías especialmente obtenidas en pares para este propósito y con una cámara especial. La fotogrametría tiene como base sobrevuelos del territorio tomando fotografías estereoscópicas de formato especial, de eje vertical, cubriendo el terreno con fotogramas que se traslapan tanto longitudinal como transversalmente. Como norma general, estos traslapes o recubrimientos suelen ser del 60% en el eje longitudinal y del 20% en el eje transversal (figura 44) aunque dependiendo del objetivo del vuelo, estos porcentajes pueden variar (Gómez-Vázquez, 2012)

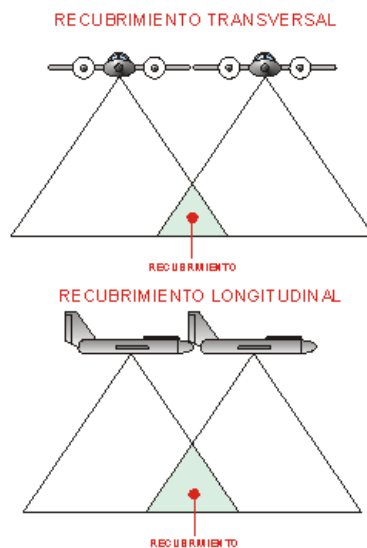


Figura 44. Recubrimientos en una fotografía Aérea

Las fotografías aéreas resultantes de un vuelo fotogramétrico no tienen una escala exacta, al ser el resultado de una perspectiva cónica y por el efecto ondulante del terreno. Así, cada punto dentro de una foto tiene su propia escala, dependiendo del lugar con respecto al centro de la foto y de la altura del terreno. No obstante, es posible establecer una escala media aproximada de los fotogramas, (Moffitt et al 1982). A la vez, la escala media de los fotogramas está ligada a los objetivos del vuelo; generalmente la finalidad del vuelo es formar cartografía a partir de restitución fotogramétrica, en cuyo caso hay que tener en cuenta la escala de la cartografía buscada (Gómez-Vázquez, 2012).

Los fotogramas resultantes de un vuelo fotogramétrico deben contener además de la información gráfica del territorio de análisis, la siguiente información:

- Organismo contratante del vuelo.
- Empresa que realiza el vuelo.
- Zona del vuelo.
- Fecha.
- Hora.
- Escala aproximada de los fotogramas.
- Número de pasada.
- Número de foto.
- Información sobre la cámara métrica (distancia focal, modelo).
- Marcas fiduciales (marcas ubicadas en las esquinas de la foto que son la referencia para calcular el centro geométrico de la misma. Son un elemento imprescindible para la posterior restitución).
- Nivel para comprobar la verticalidad del fotograma.

- Altimetro, con indicación de la altura aproximada sobre el nivel del mar.

El recubrimiento común entre los fotogramas; permite obtener imágenes estereoscópicas.

Posteriormente, aparatos denominados estereoscopios (figura 45) permiten visualizar las imágenes en tres dimensiones. Para que se puedan reproducir la estereoscopía se deben satisfacer dos condiciones esenciales, como son que cada ojo vea sólo la perspectiva que le corresponde y que las visuales tengan intersección entre sí. Con respecto a este último aspecto, esa intersección se produce cuando los fotogramas tienen zonas en común, por eso es esencial el recubrimiento estereoscópico. La incorporación de una segunda perspectiva de la misma zona incrementa notablemente la información tridimensional, con la incorporación del concepto de par estereoscópico (dos fotografías consecutivas) (Gómez-Vázquez, 2012).



Figura 45. Estereoscopio de Espejos.

A.2.2.-Fotogrametría digital

Con el desarrollo de los ordenadores, hacia 1960, se produce el inicio de la fotogrametría analítica, apareciendo el restituidor analítico,. La diferencia fundamental entre un restituidor analógico y uno analítico, es que en el analógico los procesos de orientación se realizaban mediante métodos ópticos y mecánicos, mientras que en los analíticos se hacen mediante procesos en un ordenador (Sánchez, 2006).

Así se fue incorporando cierto automatismo al proceso fotogramétrico, sobre todo en el cálculo matemático posterior a la toma de las imágenes. Sin embargo, una buena calibración de las cámaras seguía siendo necesaria ya que si no sería imposible realizar correctamente el levantamiento fotogramétrico (Aparicio, 2013). Finalmente, con la aparición de potentes software surge la fotogrametría digital, aquí ya la gran mayoría de los procesos son automáticos y se realizan en un ordenador (Aparicio, 2013). El tipo de archivos que se obtienen es mucho más completo de lo que se lograba anteriormente y así se pueden generar modelos tridimensionales, ortofotos, cartografía digital, etc. Por lo tanto, podríamos definir a la fotogrametría digital como una técnica para la generación semiautomática de modelos tridimensionales a partir de fotografías digitales y de un software de computadora, obteniendo con ello las propiedades geométricas de los objetos registrados (Aparicio, 2013).

Este desarrollo de la fotogrametría (digital) está ligado a la rápida y constante evolución de la electrónica, al incremento de la potencia de las

computadoras personales y a la aparición de software especializado de tratamiento digital de imágenes (Gómez-Vázquez, 2012)

La parte final del proceso fotogramétrico tanto digital como analógico es la restitución fotogramétrica. En ella converge todo el trabajo anterior (vuelo y apoyo) para trazar los mapas propiamente dichos. Algunos de los inconvenientes en el empleo del proceso digital son: debemos de contar con imágenes de alta resolución, deben de tener un traslape de al menos 60%; se deben conocer las características geométricas de la cámara digital utilizada (distancia focal, etc).

A.2.3.-Anaglifos

Las Imágenes Anaglifos son imágenes de dos dimensiones capaces de provocar un efecto tridimensional, cuando se ven con lentes especiales (las cuales están compuestas de un color diferente para cada ojo).

Se basan en el fenómeno de visión binocular. Las imágenes de anaglifo se componen de dos capas de color, superpuestas pero movidas ligeramente una respecto a la otra para producir el efecto de profundidad. La imagen contiene dos imágenes filtradas por color, una para cada ojo (para el ojo izquierdo el rojo; para el derecho el azul); que cuando se ve a través de las Gafas anaglifo, se revelará una imagen tridimensional. La corteza visual del cerebro fusiona esto dentro de la percepción de una escena con profundidad, debido a que nuestros ojos suprimen el color del filtro por el que observan, y acentúa el color contrario (<https://teoridelaimagenana.tumblr.com>).

Anexo 3. Identificación de domos emplazados mediante mediciones de deformación con EDM y señales sísmicas (tremor y LP's).

A.3.1.-EDM

Una forma para identificar cuando ha ocurrido un emplazamiento de domos en el volcán Popocatepetl ha sido a través de mediciones con EDM (Electronic Distance Meter) y Estaciones Totales Topográficas. Esta técnica se basa en colocar estaciones remotas donde se instala el EDM o Estación total, complementadas con hitos cercanos al centro de emisión o cráter donde se han colocado prismas (reflectores). Estación remota y prisma reflector conforman una red de líneas de medición de distancias, que para el caso del Popocatepetl esta conformada hasta 2016 con al menos 6 estaciones remotas y 10 vértices para prisma; situadas al norte y al sureste del cráter (figuras 39 y 40). Cambios en las distancias que conforman estas líneas de medición, pueden ser de dos vertientes; en reducción o en aumento en la distancia, cuando ocurre el primero se puede inferir que el volcán presenta una inflación y si ocurre en el mismo tiempo que ocurren secuencias sísmicas de tremor armónico relevante o de eventos LP's podemos inferir que este acortamiento en las distancias esta asociados con el emplazamiento de un domo.

Los cambios en las distancias medidas se atribuyen específicamente a variaciones en la presión del conducto magmático causados por el tránsito de

magma al nivel donde se ubican los prismas, generando una deformación temporal (reversible) (figura 47) (Gómez-Vázquez, 2012).

En el Popocatépetl las mediciones EDM se han realizado con un distanciómetro Leica DI3000S montando en un Teodolito Wild T2 (figura 48) (Gómez V. 2000), y se realizan desde 1993 hasta la fecha.

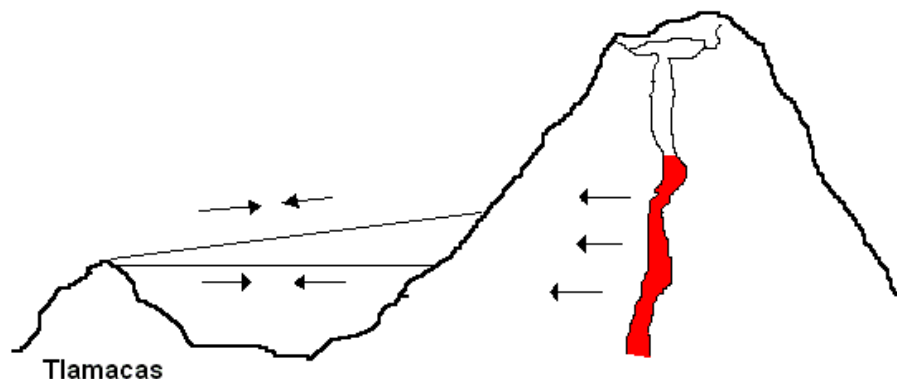


Figura 47. Esquema idealizado que muestra cuáles serían las direcciones ideales de los desplazamientos asociados con el ascenso de magma al cráter del volcán Popocatépetl, y que serían medidos con EDM.

Los cambios en las mediciones con EDM realizadas desde 1993, se han correlacionado los episodios de formación de los domos, 1,2,3 y 4 ocurridos en los años 1996 y 1997, y los cambios observados oscilaron entre 1.2cm a 2.5cm. En la figura 49 se muestran los cambios en la distancia de la línea Tlamacas hacia el vértice 3 Amigos, situada en la ladera norte del volcán a una elevación promedio de ~4500 msnm. Otro ejemplo de estos cambios, se muestra en la figura 50 con la línea de medición Tlamacas-Texcalco, en ella son muy notorios los cambios temporales en las gráficas asociados con inflaciones reversibles que ocurrieron

contemporáneas con la formación de domos, 1,2,3, y 4 emplazados en los años 1996 y 1997 (Gómez-Vázquez, 2012).



Figura 48. Mediciones con EDM (Leica DI3000S) desde Tlamacas en el flanco norte del volcán Popocatepetl. A la derecha distanciómetro Leica DI3000S

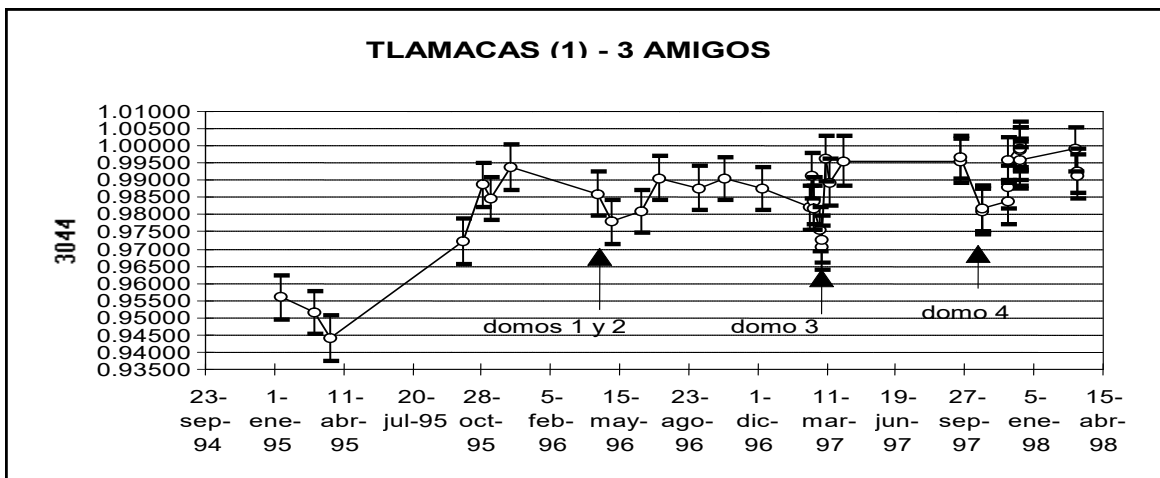


Figura 49. Mediciones EDM en el período de septiembre de 1994 a abril de 1998. La escala vertical son 5mm por división. Los datos son de la línea Tlamacas 3 Amigos en el flanco norte del volcán Popocatepetl. Las flechas indican la fecha de emplazamiento de domos

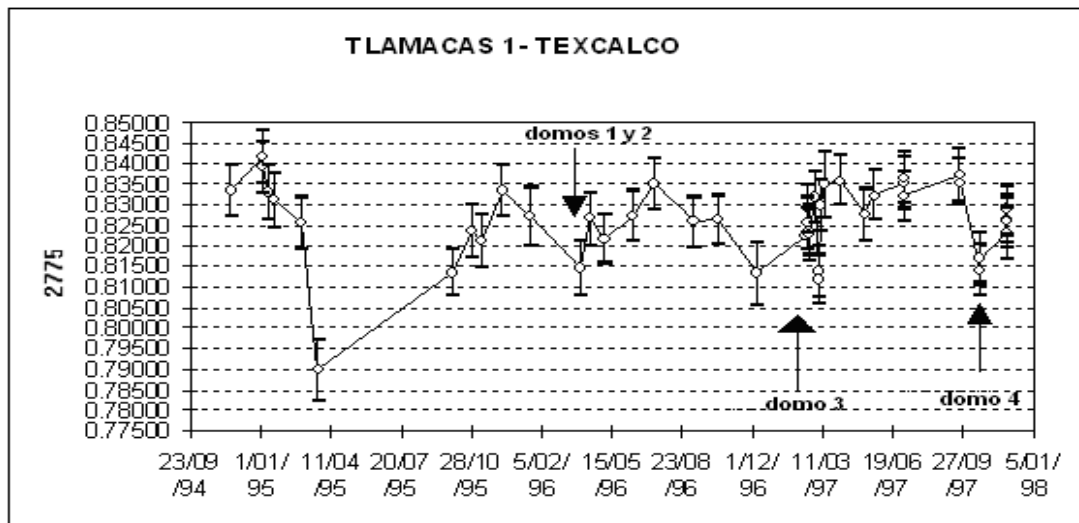


Figura 50. Mediciones EDM en el período de septiembre de 1994 a abril de 1998. La escala vertical son 5mm por división. Los datos son de la línea Tlamacas - Texcalco en el flanco norte del volcán Popocatépetl. Las flechas indican la fecha de emplazamiento de domos

En la figura 51 podemos apreciar un ejemplo adicional de desplazamientos observados con EDM en el años 2001 y que se asociaron con el emplazamiento de los domos ocurridos ese año 2001.

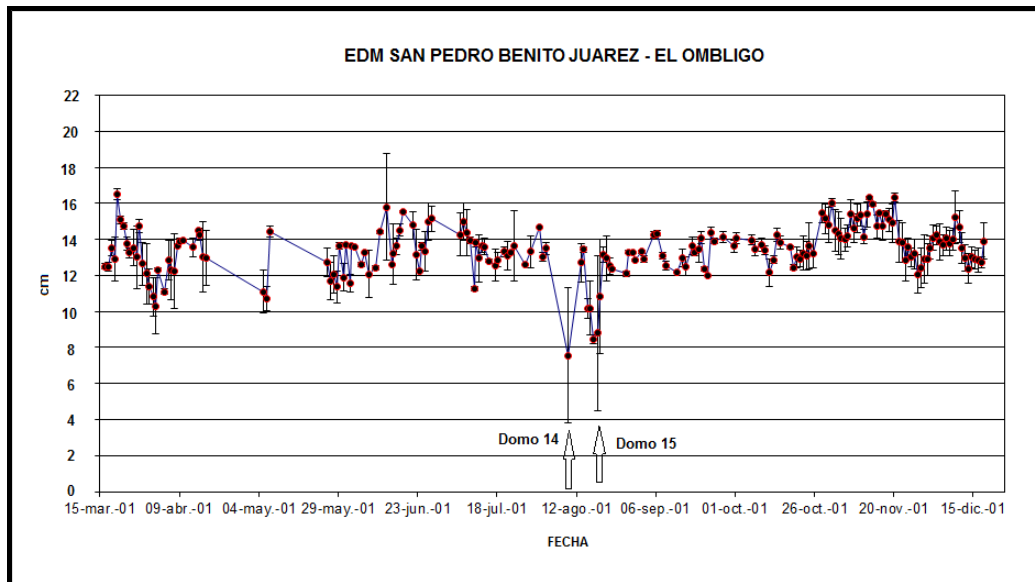


Figura 51. Mediciones EDM en el período de enero de 2001 a diciembre 2001. La escala vertical son 2cm por división. Los datos son de la línea San Pedro Benito Juárez - Ombligo en el flanco sureste del volcán Popocatepetl y fueron mediciones manuales diarias. Las flechas indican la fecha de emplazamiento de domos.

A.3.2. Tremor y eventos de largo período (LP's)

Dentro de las señales sísmicas características asociadas al movimiento de fluidos en el interior de un volcán activo se encuentra el tremor volcánico. En el caso del Popocatepetl, esta señal mantiene amplitudes y frecuencias más o menos constantes, por un tiempo sostenido que puede ir de varios minutos a horas. Presenta un contenido espectral con picos agudos y centrados en las bajas frecuencias. En ocasiones es común observar una o dos frecuencias dominantes (Arambula 2002). Presentan frecuencias de 0.1 a 3.0 Hz, generalmente en múltiplos de 0.5 y 1 Hz (Martínez, 2003) (figura 52)

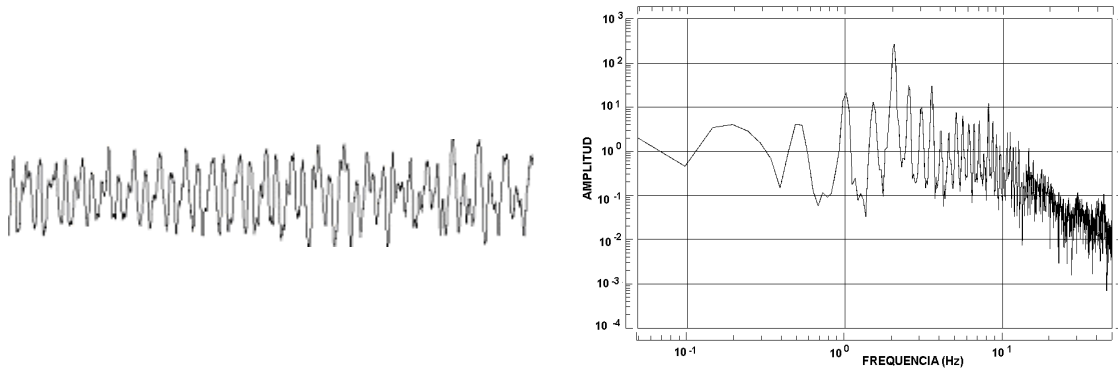


Figura 52. Tremor armónico en el Popocatépetl: a la derecha el registro sísmico y a la izquierda su correspondiente espectro, sus picos mayores se encuentran entre 1-3 Hz en múltiplos de 0.5 Hz

La fuente del tremor se atribuye a una actividad sostenida interna producto del flujo de fluidos, gases o magma (Arambula, 2002)(Martínez, 2003). De acuerdo con muchos autores el tremor es una serie sucesiva de eventos de baja frecuencia (McNutt, 2000).

En el actual período eruptivo que presenta el volcán Popocatépetl, este tipo de señales ha ocurrido en diversos períodos y se ha asociado comúnmente al movimiento de magma en el interior y posteriormente la formación de domos en el cráter del volcán, particularmente cuando se trata de tremores armónicos sostenidos (figura 53). Secuencias de tremor relevante y una fotografía posterior del cráter en una gran mayoría de casos ha permitido vincular estas señales con la construcción o pulsos de crecimiento de los domos en el Popocatépetl.

Un ejemplo de ello es el caso del registro de tremor ocurrido el 3 de agosto de 2006 (figura 53); Una fotografía del cráter del 24 de noviembre de 2006 se pudo corroborar un crecimiento adicional del domo # 28 mostrado en la figura 54.

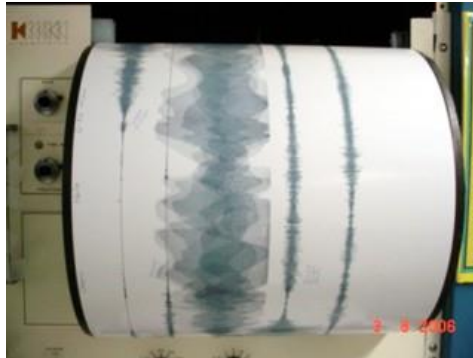


Figura 53. Tremor armónico del 3 de agosto de 2006 en el volcán Popocatépetl, asociado con un crecimiento adicional del domo # 28

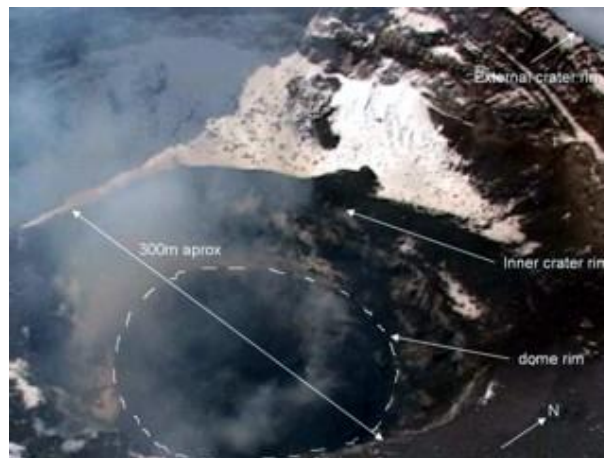


Figura 54. Imagen del cráter del volcán Popocatépetl del 24 de noviembre de 2006, muestra el domo número 28 con un crecimiento adicional, este domo inicio su emplazamiento desde 2005.

En diciembre de 2000, se presentó el episodio de registro de tremor más importante ocurrido en el volcán Popocatépetl en los últimos 20 años. El tremor armónico se sostuvo por aproximadamente 36 horas, saturando los registros (figura 55a). Con una fotografías aéreas posteriores fue posible corroborar el

crecimiento del domo, que hasta ahora ha sido el domo emplazado de mayores dimensiones (figura 55b).



Figura 55a, derecha, imagen de los registros de tembor asociados al domo formado en el cráter del volcán Popocatépetl el 18 y 19 de diciembre de 2000. 55b izquierda imagen del cráter con el domo emplazado en diciembre de 2000.

Otra de las señales sísmicas asociadas a emplazamiento de domos es los eventos LP, el cuál presentan una pequeña pre-fase de duración variable, seguida de una señal de baja frecuencia (Martínez, 2003). Estos eventos sísmicos LP tienen características espectrales semejantes al tembor y pueden persistir durante varias horas. A diferencia del tembor los LPs, tienen una onda P emergente (McNutt, 2000). Asimismo también hay una estrecha vinculación entre las señales de sismos LPs con el tembor, dado su contenido espectral semejante. En el período de 1996 a 2009 en el Popocatépetl, se ha observado que la señal de LP's en algunos episodios, es casi continua. Esta característica también ha sido observada en otros volcanes, como por ejemplo en el volcán Galeras (Gil Cruz F, et al 1996). Este tipo de señal ha sido observada particularmente en agosto de 2001 (figura 56), la frecuencia dominante de los eventos LPs que formaron estos domos en particular estuvo en el rango de 2 Hz (Gómez, 2009), y fue observada

por varias horas. Un día después, en un sobrevuelo se detecto la formación de un nuevo domo.

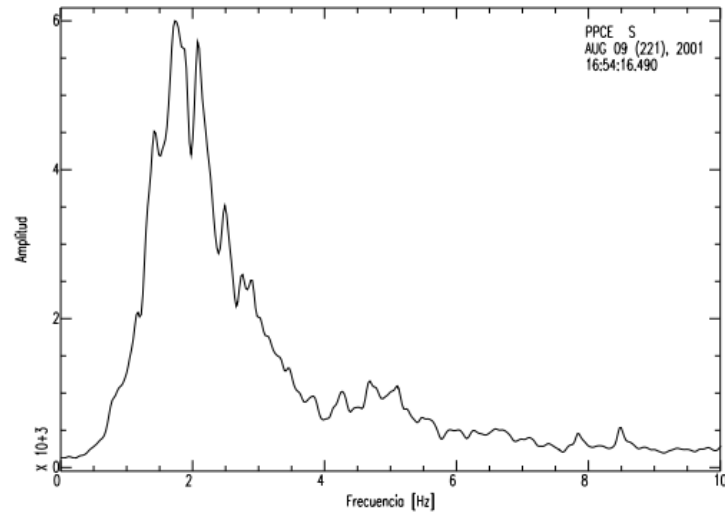


Figura 56. Promedio de los espectros de todas las estaciones de la red sísmica del Popocatépetl, el 9 de agosto de 2001. Tomada de Gómez, 2009.

Anexo 4.

Tabla 1. Descripción de algunos de los parámetros asociados con el emplazamiento y destrucción de los domos en el Popocatépetl

| Figura | Domo ID Dmmaa-# | Tiempo entre emplazamientos (días) | Tiempo entre eventos principales de destrucción (días) | Tiempo de residencia (días) | Volumen máximo estimado (10^6 m^3) | Tasa de extrusión de lava instantánea (m^3/s) | Espesor de cada domo (metros) | Señal sísmica asociada al emplazamiento |
|---------|-----------------|------------------------------------|--|-----------------------------|--|---|-------------------------------|---|
| Fig.11a | D0396-1 | 0 | 0 | 56 | 2.41 | 5.4 | 124 | Tremor armónico |
| Fig.11b | D0596-2 | 64 | 181 | 173 | 1.52 | 9.0 | 71 | Tremor armónico |
| Fig.11c | D0397-3 | 297 | 245 | 121 | 2.23 | 13.8 | 37 | Tremor armónico |
| Fig.11d | D0797-4 | 122 | 43 | 42 | 0.88 | 5.8 | 16 | Tremor armónico |
| Fig.11e | D0897-5 | 46 | 28 | 24 | 1.30 | 6.4 | 21 | Tremor armónico |
| Fig.11f | D1297-6 | 101 | 106 | 29 | 1.77 | 19.2 | 41 | Tremor armónico |
| Fig.11g | D0398-7 | 109 | 87 | 7 | 0.03 | 1.8 | 11 | Tremor armónico |
| Fig.11h | D0598-8 | 57 | 146 | 96 | 0.39 | 1.6 | 30 | Tremor armónico |
| Fig.12a | D1198-9 | 197 | 108 | 7 | 0.72 | 0.2 | 32 | Tremor armónico |
| Fig.12b | D0200-10 | 445 | 540 | 102 | 0.14 | 0.4 | 14 | Tremor armónico |
| Fig.12c | D0800-11 | 199 | 133 | 36 | 0.17 | 2.9 | 12 | Tremor armónico |
| Fig.12d | D1200-12 | 109 | 111 | 38 | 6.93 | 28.5 | 91 | Tremor armónico LP's |
| Fig.12e | D0201-13 | 75 | 84 | 47 | 2.97 | 17.2 | 43 | Tremor armónico , LP's |
| Fig.12f | D0801-14 | 146 | 121 | 22 | 0.56 | 7.6 | 34 | LP's y Tremor armonico |
| Fig.12g | D0801-15 | 22 | 6 | 6 | 1.06 | 9.3 | 57 | LP's y Tremor armónico |

| | | | | | | | | |
|---------|----------|------|-----|-----|------|------|----|--------------------------------------|
| Fig.12h | D0901-16 | 24 | 49 | 31 | 0.14 | 0.8 | 10 | LP's y Tremor armonico |
| Fig.13a | D1101-17 | 65 | 62 | 28 | 0.50 | 12.9 | 34 | LP's y Tremor armónico |
| Fig.13b | D0102-18 | 60 | 71 | 39 | 1.54 | 11.7 | 73 | Tremor armónico |
| Fig.13c | D0402-19 | 107 | 82 | 14 | 1.68 | 13.5 | 65 | LP's y Tremor armónico |
| Fig.13d | D0502-20 | 17 | 36 | 33 | 0.97 | 16.6 | 11 | LP's y Tremor armónico |
| Fig.13e | D0802-21 | 78 | 142 | 97 | 0.18 | 0.2 | 14 | LP's y Tremor armónico |
| Fig.13f | D1202-22 | 114 | 42 | 25 | 1.03 | 6.4 | 50 | LP's y Tremor armónico |
| Fig.13g | D1202-23 | 25 | 5 | 5 | 0.10 | 9.8 | 10 | LP's y Tremor armónico |
| Fig.13h | D0103-24 | 14 | 17 | 8 | 0.49 | 19.6 | 11 | Tremor armónico |
| Fig.15a | D0103-25 | 15 | 36 | 29 | 0.79 | 6.0 | 20 | Tremor armónico |
| Fig.15b | D0403-26 | 82 | 69 | 16 | 0.16 | 1.1 | 15 | Tremor armonico |
| Fig.15c | D0405-27 | 677 | 913 | 252 | 1.03 | 17.0 | 44 | Tremor armónico |
| Fig.15d | D1105-28 | 355 | 868 | 765 | 1.32 | 2.4 | 32 | Tremor armónico |
| Fig.15e | D0510-29 | 1556 | 820 | 29 | 0.21 | 1.2 | 20 | Tremor armonico |
| Fig.15f | D0811-30 | 477 | 476 | 28 | 0.50 | 6.7 | 19 | LP's y Tremor armónico |
| Fig.15g | D1211-31 | 100 | 121 | 49 | 0.59 | 14.5 | 20 | LP's y Tremor armónico |
| Fig.15h | D0412-32 | 89 | 84 | 44 | 0.38 | 2.1 | 20 | LP's y Tremor espasmódico |
| Fig.20a | D0213-33 | 342 | 362 | 64 | 2.60 | 12.0 | 75 | LP's y Tremor armónico y espasmódico |

| | | | | | | | | |
|---------|----------|-----|-----|----|------|------|----|------------------------------------|
| Fig.20b | D0513-34 | 87 | 25 | 2 | 1.80 | 0.3 | 60 | LP's y Tremor armónico espasmódico |
| Fig.20c | D0114-35 | 252 | 287 | 37 | 0.11 | 8.8 | 15 | Tremor armónico |
| Fig.20d | D0214-36 | 42 | 11 | 6 | 0.01 | 0.5 | 10 | LP's y Tremor armónico |
| Fig.20e | D1014-37 | 236 | 235 | 5 | 0.55 | 16.6 | 30 | LP's y Tremor armónico |
| Fig.20f | D0215-38 | 114 | 123 | 14 | 0.76 | 3.9 | 30 | LP's y Tremor armónico |

Anexo 5.

Tabla 2.

Domos promedio emplazados y tasas de extrusión del magma para los cinco regímenes propuestos y que se muestran en la figura 31. (a) Régimen, (b) Inicio del régimen, (c) Duración (días), (d) Número de domos emplazadas en el régimen, (e) Tasa promedio de extrusión de magma a largo plazo (m^3/seg) (f) Tasa promedio de corto plazo (m^3/seg), (g).Tasa de emplazamiento de domos (número de domos/tiempo en años, en el régimen), (h) Tiempo promedio de residencia y (i) Volumen total extruido a lo largo de la duración de cada régimen ($\times 10^6 \text{ m}^3$)

| a | b | c | d | e | f | g | h | i |
|---------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| I | 5-Mar-1996 | 796 | 7 | 0.15 | 8.8 | 3.2 | 65 | 10.1 |
| II | 10-May-1998 | 950 | 4 | 0.02 | 1.3 | 1.5 | 60 | 1.4 |
| III | 15-Dec-2000 | 844 | 14 | 0.26 | 11.4 | 6.1 | 30 | 18.9 |
| IV | 8-Apr-2003 | 3065 | 4 | 0.01 | 5.4 | 0.5 | 266 | 2.7 |
| V | 29-Aug-2011 | 1262 | 9 | 0.07 | 7.3 | 2.6 | 28 | 7.3 |
| Global | 5-Mar-1996 al presente | 6917 | 38 | 0.07 | 8.3 | 2.8 | 64 | 40.5 |

Anexo 6.

Tabla 3. Distribución de frecuencia de los volúmenes de los domos. *V*: Clases de los volúmenes en millones de metros cúbicos. *N*: Numero de domos en cada clase de volumen. *Nco*: Numero acumulativo de domos que exceden el límite de la clase inferior. *Nc*: Número esperado de domos que exceden el límite de clase inferior calculado a partir de la función de supervivencia (Eq. 1)

| <i>V x 10⁶m³</i> | <i>N</i> | <i>Nco</i> | <i>Nc</i> |
|--|----------|------------|-----------|
| 0.0-0.4 | 12 | 38 | 38.0 |
| 0.4-0.8 | 9 | 26 | 26.1 |
| 0.8-1.2 | 5 | 17 | 18.0 |
| 1.2-1.6 | 4 | 12 | 12.3 |
| 1.6-2.0 | 3 | 8 | 8.5 |
| 2.0-2.4 | 1 | 5 | 5.8 |
| 2.4-2.8 | 2 | 4 | 4.0 |
| 2.8-3.2 | 1 | 2 | 2.8 |
| 3.2-3.6 | 0 | 1 | 1.9 |
| 3.6-4.0 | 0 | 1 | 1.3 |
| 4.0-4.4 | 0 | 1 | 0.9 |
| 4.4-4.8 | 0 | 1 | 0.6 |
| 4.8-5.2 | 0 | 1 | 0.4 |
| 5.2-5.6 | 0 | 1 | 0.3 |
| 5.6-6.0 | 0 | 1 | 0.2 |
| 6.0-6.4 | 0 | 1 | 0.1 |
| 6.4-6.8 | 0 | 1 | 0.1 |
| 6.8-7.2 | 1 | 1 | 0.1 |



The ongoing dome emplacement and destruction cyclic process at Popocatépetl volcano, Central Mexico

Angel Gómez-Vazquez¹ · Servando De la Cruz-Reyna² · Ana Teresa Mendoza-Rosas²

Received: 17 February 2016 / Accepted: 30 July 2016
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Abstract The ongoing eruptive activity of Popocatépetl volcano has been characterized by emplacement and subsequent destruction of a succession of lava domes. Between the onset of the current eruption in 1994 and the time of this submission, 38 episodes of lava dome formation and removal have been identified. Each dome has showed particular features related to the magma extrusion process. Among other manifestations, dome-emplacement events have been usually accompanied by relatively low-intensity, protracted explosions referred to as exhalations. After variable times of residence, emplacements have ended in partial or total destruction of the domes by strong vulcanian explosions that produced sizeable ash plumes, with most of them also ejecting incandescent debris onto the volcano flanks. Here, we present a detailed account for the observed activity related to the domes' growth and destruction, related seismic monitoring signals, and morphological features of the domes based on 19 years of visual observations and image analysis. We then discuss a model for the process of dome growth and destruction and its hazard implications.

Keywords Popocatépetl volcano · Dome emplacement rates · Sustained effusive activity

Communicated by: J. Fierstein

✉ Servando De la Cruz-Reyna
sdelacr@geofisica.unam.mx

¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, C. Universitaria, 04510 Mexico, D.F., Mexico

² Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, C. Universitaria, 04510 Mexico, D.F., Mexico

Introduction

Popocatépetl volcano is located in the central Mexican Volcanic Belt approximately 70 km south-east of downtown Mexico City, one of the world's largest cities, which along with other cities located within a 100-km radius of the volcano includes a population of more than 20 million. The volcano rises 5454 m above sea level, and its history indicates that it has the potential to produce a wide range of eruption styles, including catastrophic events, such as the one dated at ca. 23,000 years B.P. which destroyed a previous edifice, generating massive debris avalanches (Robin and Boudal 1987; Boudal and Robin 1989) with an estimated volume of 9 km³ that reached up to 70 km from the summit and covered an area of 600 km² (Capra et al. 2002; Macías 2007). In addition, at least three major Plinian events have occurred since 5000 years B.P. (ca. 3000 B.C., between 800 and 200 B.C., and ca. A.D. 800) damaging human settlements (Siebe et al. 1996; De la Cruz-Reyna and Siebe 1997; Siebe and Macías 2006). Since the last major Plinian event 1200 years ago, Popocatépetl has produced only moderate eruptions. Historical records provide a good description of such activity. Eyewitness reports indicate that about 16 small and 3 moderate eruptive episodes have occurred within the past 500 years (VEI range 2~3), some of them probably associated with episodes of dome growth and destruction similar to the current eruptive episode (De la Cruz-Reyna et al. 1995; De la Cruz-Reyna and Tilling 2008a; De la Cruz-Reyna et al. 2016).

The eruption prior to the current one began in late 1919 and probably ended in 1927. It was a fairly well-documented episode of dome building and destruction, as described in the next section. Then, after nearly 70 years of quiescence (except for a minor fumarolic event in 1947), a seismic station near Popocatépetl volcano began recording volcano-tectonic earthquakes in 1990, and observations of increased fumarolic

activity began in 1993 (De la Cruz-Reyna et al. 2008b). By October 1994, this activity further increased and culminated on 21 December 1994 with a series of phreatic explosions causing ash falls on several towns to the east and northeast of the volcano, including Puebla City approximately 45 km from the volcano (De la Cruz-Reyna and Siebe 1997). A year later, relatively low-intensity, protracted explosions, herein referred to as exhalations, and seismicity increased again, and in late March 1996, a lava dome was observed growing on the crater floor for the first time since 1927. These events marked the beginning of a series of at least 38 cycles of dome growth and destruction that have continued up until the date of this submission. Here, we present a detailed account for this cyclic process of dome emplacement and destruction, including morphological features of the domes, growth rates, and other characteristics that were inferred from the aerial photographs and the seismic monitoring data. Some possible causes for the recurring process of dome growth and destruction, and the relevance of this process to the volcanic hazard, are also discussed below.

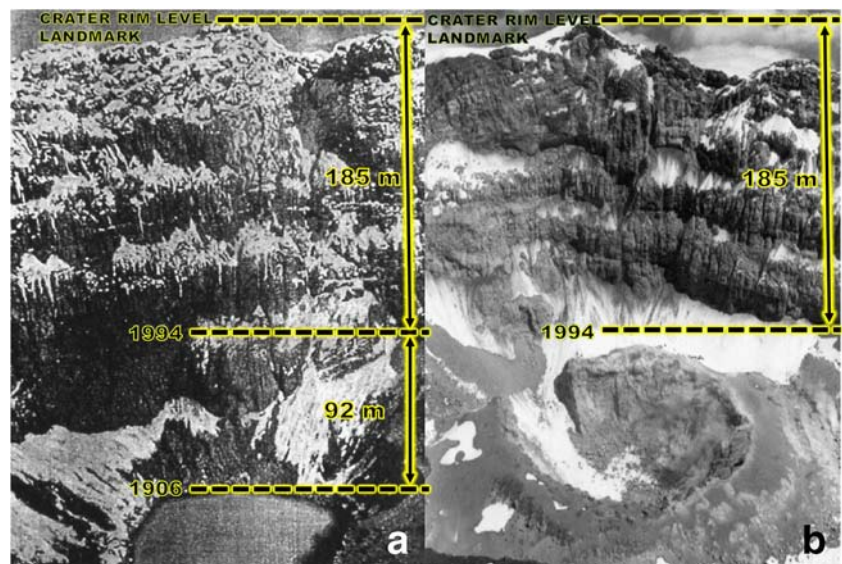
Evolution of the crater morphology of Popocatepetl prior to 1994

The historical descriptions of eruptive episodes since 1500 AD suggest that some of them involved cycles of dome emplacement and destruction (De la Cruz-Reyna and Tilling 2008a). The strongest of those eruptions probably occurred between 1663 and 1665, producing a sizable dent in the SE crater rim, and leaving a deep crater that likely persisted with few morphological changes for about 250 years, except for the sporadic presence of a small seasonal crater lake (De la Cruz-Reyna et al. 1995). Figure 1a shows how the crater looked in 1906 (Friedländer 1921). The depth of the crater from a crater

rim point (upper dashed line in Fig. 1a) to the water level of the crater lake (lower dashed line marked 1906) is estimated to have been 277 m at the time of the photo. The diameter of the almost circular crater lake in Fig. 1a is estimated at 116 m. That lake disappeared during the 1919 eruption, which, like the current episode, was probably of phreatic nature in its initial phases. According to newspapers and other reports (Dr Atl 1939), magmatic activity did not begin until the spring of 1920. Waitz (1921) reported that a new formation of black blocks was growing on the crater floor, “similar to an enormous bread crust” measuring about 100 m in the NW-SE direction, about 70–80 m in the perpendicular direction, and about 40 to 50 m high, and recognized this formation as the result of an extrusion of solid lava filling the upper volcano conduit. Subsequent expeditions to the crater rim describe that in 1923, the lava dome was partially destroyed by explosions and reported the end of the episode in 1927. Figure 1b (Macias and Siebe 2005) shows the crater of Popocatepetl with remnants of the internal crater on the dome left after the 1919–1927 activity. The dashed line in Fig. 1b labeled 1994 marks the level of the crater floor, unchanged until the onset of the current magmatic episode in 1994.

The morphology of the main crater is summarized in Fig. 2. The NW-SE cross section shows the approximate profiles before and after the 1920–1927 lava dome emplacements. We estimate the volume of the dome remnants, debris, and fall-back materials deposited within the crater during that episode as $3.8 \times 10^6 \text{ m}^3$, and the volume or capacity of the small central crater formed after 1924 on the dome as $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. The latter figure may be considered as a crude estimate of the volume of the last dome emplaced during that episode. Since the volume of the first dome observed by Waitz (1921) may be estimated as $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, it is reasonable to infer that the typical volume of the emplaced domes was about $0.3\text{--}0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. We may thus infer that about 10 domes

Fig. 1 **a** The crater of Popocatepetl volcano. Photograph by Immanuel Friedländer, taken in August 1906. (Friedländer 1921). **b** The crater of Popocatepetl in 1978 (from Macias and Siebe 2005). This photo was shot from a viewpoint similar to that in **a**. Some features of the main crater rim and walls remain unchanged and have been used to scale the photographs



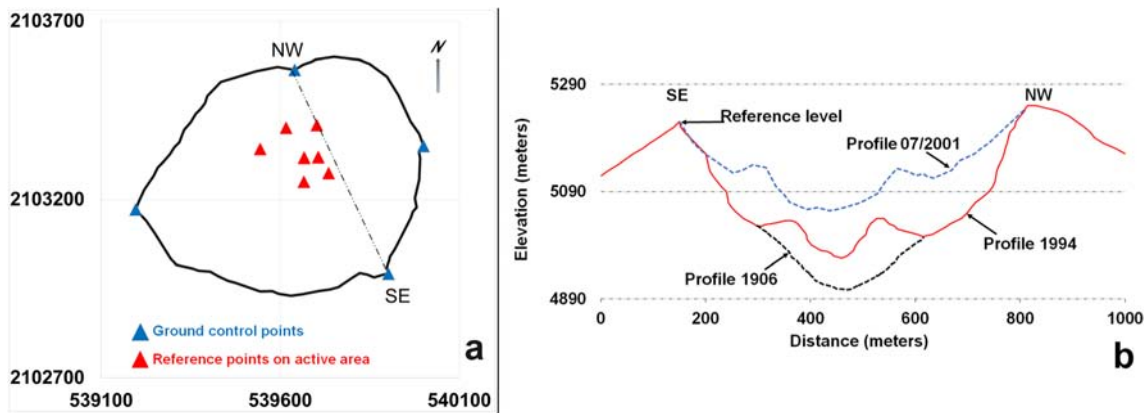


Fig. 2 **a** Horizontal section of the crater of Popocatepetl (UTM coordinates). The NW-SE dashed line marks the direction of the vertical cross section in **b**. The blue triangles on the crater rim indicate the ground control points used to scale the dimensions of the domes. The red

triangles mark the reference points used by SCT to measure the vertical displacements by photogrammetric restitution. **b** Cross section of the crater of Popocatepetl showing the profile of the crater floor at different times

were employed at that time. Since no measurable amounts of pyroclastic materials were ejected outside the crater, we may figure out that about $3.8 \times 10^6 \text{ m}^3 / (4 \text{ years}) \approx 3 \times 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ represents a lower bound of the average lava production rate over the duration of the 1920–1927 episode.

institutions (De la Cruz-Reyna and Tilling 2008a). As is the case for other volcanoes with active lava domes, the need to visually monitor the lava production rates is evident (Donnadieu et al. 2003; Shilling et al. 2008; Ryan et al.

Ongoing activity at Popocatepetl volcano (1994–2015)

The predominantly phreatic exhalation activity that began in December 1994 persisted through 1995 and early 1996, with a decreasing trend (De la Cruz-Reyna and Siebe 1997). In the spring of 1996, the volcanic activity increased again. By late March 1996, a fresh lava dome was observed growing on the inner 1919–1927 crater (Fig. 3a), marking the first appearance of juvenile lava of the current episode (Siebe and Macías 2006). The first dome-destroying explosion occurred on April 30, 1996, followed by a series of at least 37 other episodes of dome growth and destruction until the date of this submission. The April 30, 1996, explosion caused the only reported fatalities directly related to the Popocatepetl eruptive activity. Five mountaineers had climbed to the summit crater and were hit by hot explosion debris during their descent, a few hundreds of meters downslope from the crater (De la Cruz-Reyna et al. 2016).

Since 1994, the National Center for Disaster Prevention of Mexico (CENAPRED), which is a technical body of the National System of Civil Protection depending on the Mexican Ministry of the Interior, has been in charge of the visual (from surrounding web cameras (<http://www.cenapred.gob.mx:8080/monitoreoPopocatepetl/>; <http://www.webcamsdemexico.com/webcam-popocatepetl/>)), seismic, geodetic, and geochemical monitoring of Popocatepetl in collaboration with the National Autonomous University of Mexico (UNAM), the US Geological Survey and other

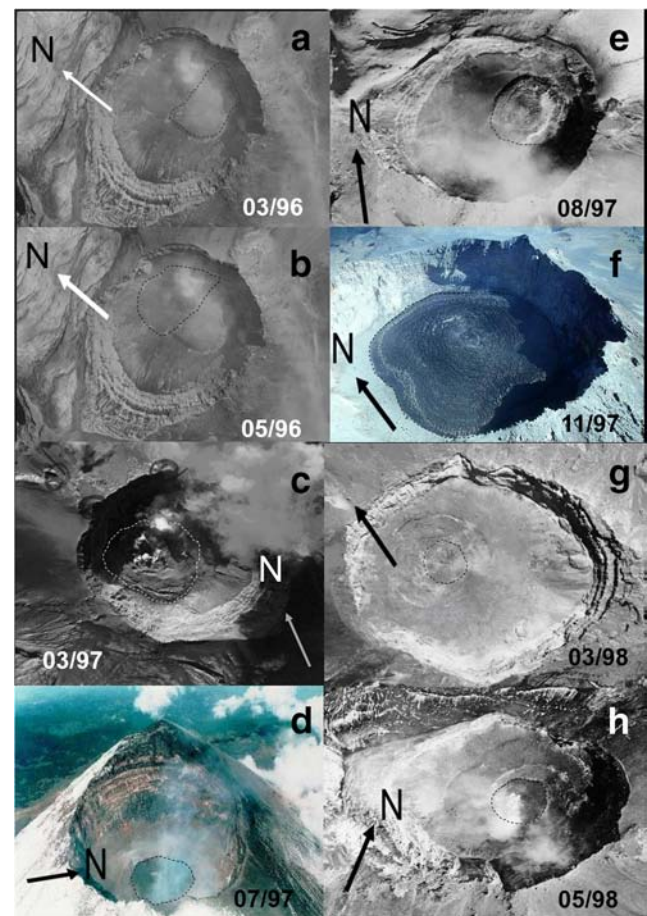


Fig. 3 Photos of domes emplaced in the crater of Popocatepetl between March 1996 and May 1998. Photos by the Mexican Ministry of Transportation and Communications (SCT), Secretaría de Marina (SEMAR), Policía Federal, and CENAPRED, courtesy of CENAPRED

2010; Diefenbach et al. 2013). Therefore, since 1994, at the request of CENAPRED, photogrammetry flights by the Mexican Ministry of Transportation and Communications (SCT) and other observation flights from various institutions have been performed with different aircrafts, particularly when seismic and visual (from the webcams) monitoring data suggested that lava emission was taking place within the crater.

Methodology and data limitations of lava dome volume calculations

The morphological descriptions and the volume estimations of the lava domes discussed here resulted from the analysis of aerial photos obtained with different types of cameras at irregular intervals depending on the level of volcanic activity, aircraft availability, and weather conditions. Two types of images were obtained from nearly 150 flights: vertical stereophotogrammetric images obtained from high-altitude flights of SCT aircrafts, using floor-mounted, large-format film cameras, and conventional oblique photographs obtained from more frequent lower-altitude flybys in helicopters or fixed-wing aircrafts. The sporadic character of the flights compelled us to combine the results of the analyses of both types of images in order to keep a follow-up of the shape and volume evolution of each of the emplaced domes. The vertical photographs clear of clouds and fumaroles from 72 photogrammetric flights in the period 1996–2010 were analyzed by SCT using conventional analog photogrammetric restitution. This processing returned x , y , z coordinates, from which the coordinates of four control points on the rim of the volcano (assumed fixed), and seven reference points in the most active area within the crater (Fig. 2a) were systematically handed to us along with a pair of stereographic images per flight. The control points located on the crater rim made it possible to scale the images and to calculate the horizontal dimensions of the domes. The vertical displacements of the inner reference points obtained from the SCT restitutions permitted us to calculate the volume gains (or losses caused by the explosions) and to estimate the time-averaged lava production rates of 29 domes.

In addition, we analyzed the oblique conventional digital photographs from numerous low-altitude flights since 1996 to identify significant changes of the dome morphology. In particular, we used the images of nine lower-altitude flights made after the last photogrammetric SCT survey in 2010, to construct anaglyphs for 3D viewing of the domes with the methods described by Ramírez-García (2008) and Dietz (2010). Such images were taken at short time intervals along flights over the crater rim, with overlaps between them of approximately 60 %. With the 3D anaglyphs, and using the fixed reference points of the photogrammetric images, and

other recognizable landmarks to scale the oblique images, it has been possible to maintain a reasonable account for the quantitative evolution of the shape and dimensions of each dome in the period 2011–2015.

For the calculation of the volumes, we approximate the 3D shapes of the domes to combinations of basic geometrical shapes, such as truncated cones, hemispheres, or sections of tri-axial ellipsoids. Volumes of domes are then estimated from the distances measured in both types of images, vertical photogrammetric photos, and oblique anaglyphs scaled to the fixed control points and other recognizable landmarks in the case of the oblique photos, using a catalog of volume formulas.

Most of the vertical photogrammetric images were obtained at an approximate 1:14,000 scale. The domes' horizontal dimensions were measured on the photogrammetric prints using a mirror stereoscope and a scale ruler, with a resolution better than 1 mm, corresponding to about 10 m on the ground. Vertical accuracy from restitution provided a higher resolution. Since volumes vary as the cube of the linear dimensions, the error in the volume estimates of a dome say 100 m wide would vary as three times the linear fractional uncertainty (Taylor 1997); this is $3 \times 10/100$. We are thus assuming a typical error of 30 % in the volumes estimated from the vertical photogrammetric images, and because of the diversity of cameras, lenses, and flight conditions, we assume a 40 % error in the estimation of the lava dome volumes from oblique photographs. These errors are similar to those in dome volume estimations of other volcanoes using approximations to simple geometries (Sparks et al. 1998; Valenzuela 2011).

The dome growth rate was estimated dividing the volume calculated from the images by the accumulated duration of the seismic signals related to lava extrusion (significant LPs and tremors) detected between the beginning of the dome emplacement and the time of the photograph. This rate is hereafter called the short-term lava extrusion rate. The maximum volume of a dome is extrapolated from the measured volume in available photos using the estimated magma extrusion rate and the total duration of volcanic seismic signals between the time of the photo and the main dome-destruction event.

Identification of each dome emplacement involves some ambiguities mostly resulting in how a new emplacement is defined. Dome count differences have raised from different observation groups using different criteria. To differentiate each new dome emplacement, we first verify that a significant destruction of the previous dome has occurred and then analyze the texture, color, and morphological features in the images of the newly detected lava. Other observers counted some lava emissions and lobes as new domes, particularly for observations made between 2006 and 2010, generating a slightly different dome count for that period (CENAPRED 2012). Although both methods may be equally valid, in this study, we use the former criterion, i.e., a new dome implies a

significant textural, color, and shape change of a fresh lava emplacement occurring after a major dome destruction explosion. We thus define the residence time of each dome as the period of time between the assumed (from the first photographic evidence and the significant preceding seismic information) date of emplacement and the date of destruction, as inferred from explosions, column height, and amplitude and duration of seismic signal (Table 1).

Sequence of dome emplacements and destructions 1996–2015

After the initial stage of phreatic activity, the first evidence of a magmatic influence was reported on 26 March 1996. Aerial observations confirmed the presence of extruded lava forming a dark hemispherical dome, which flattened with time, forming a set of concentric subsidence rings. From available imagery, the maximum volume estimated for this dome (D0396–1, Table 1) was $2.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ and its growth rate was estimated at $5.4 \text{ m}^3/\text{s}$. After the March–April 1996 dome (Fig. 3a) was destroyed on 21 May 1996, harmonic tremor signals from the seismic monitoring stations, particularly from the highest altitude one, located at about 2 km from the crater, marked the growth of a second lava dome (D0596-2, Table 1, Fig. 3b). By the end of May, the lava of both domes had covered the floor of the main crater. This second dome grew at a higher rate ($9 \text{ m}^3/\text{s}$) reaching a volume of $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ before its destruction. As has been the case of several domes, at some stage of the lava emplacement, its central part subsided, forming ring fractures on its surface. This effect has been observed in other volcanoes (e.g., Lascar; Matthews et al. 1997). Intensive explosive activity from November 1996 until late January 1997 marked the destruction phase of dome D0596-2.

Volumes and lava production rates for all domes, as well as details of the further dome emplacements and destructions, are described in Table 1. Domes were destroyed by explosions of variable intensity. For example, the explosion that destroyed most of dome D0397-3 on 30 June 1997 produced a 13 km high (a.s.l.) ash column, causing a conspicuous ash fall on Mexico City and stopping ground operations at the International Airport of Mexico City for nearly 12 h.

The emplacement of dome D1200-12 on December 17–18, 2000 (Fig. 4d) was preceded and accompanied by hour-long episodes of the strongest harmonic tremors ever recorded at Popocatepetl, saturating for hours most of the short-period seismic monitoring stations. That dome also presented the highest magma extrusion rate so far recorded at Popocatepetl volcano, estimated at $28.5 \text{ m}^3/\text{s}$, rapidly reaching a record volume of $6.9 \times 10^6 \text{ m}^3$. This dome was destroyed by multiple explosions along late December 2000 and January 2001. The strongest explosion, on 22 January 2001, produced a 13.5-km

high eruptive column, and it is the only one that caused major pyroclastic flows descending on the volcano slopes.

From 2002 to 2010, the rate of dome emplacement dropped significantly, defining a stage with the lowest average rate of emplacements, although some of the individual domes showed relatively high lava extrusion rates, as exemplified by domes D0102-18 (Table 1, Fig. 5b) and D0402–19 (Table 1, Fig. 5c). Dome-destruction explosions were also relatively powerful, throwing large amounts of incandescent debris on the volcano flanks, as exemplified by the explosions on 23 December 2002 and 14 February 2003, respectively, associated with the destruction of domes D1202-23 and D0103-25.

Dome D0811-30 marked the beginning of a new stage of high dome-emplacement rate (Fig. 6f) which raised the floor level of the main crater. Nevertheless, increased explosivity and associated dome-destruction again excavated the main crater floor, as exemplified by the destruction explosions of dome D0811-30 on 26 September 2011 and 20 November 2011.

The succession of high and low rates of emplacements, and the balance between the lava production and dome destruction, reveals a pattern of the evolution of the emplacement process, as described in the next section.

Regimes of cyclical emplacement of lava domes

The emplacement of domes (Figs. 3, 4, 5, 6 and 7) and their main destruction events, and the estimated maximum emplaced lava volumes and time-averaged dome extrusion rates of individual domes, all listed in Table 1, are time series whose analysis contains important information about the nature of the eruptive episode at Popocatepetl volcano. Individual domes show a changing behavior. Some grew rapidly and were destroyed within a short time frame; others remained over long periods before destruction. However, this changing behavior does not seem to be random. High and low rates of lava dome emplacement and cumulative dome volumes seem to cluster in time. Figure 8 shows a plot of the cumulative number of domes and the cumulative estimated maximum volumes of the domes as a function of time. The shaded region around the cumulative volume points represents the uncertainty of the cumulative volume estimations (30 % for the first 29 domes and 40 % for the last nine domes). The error propagation along the cumulative values was estimated using the quadratic sum of the errors of successive domes (Taylor 1997).

Inspection of the figure suggests a succession of high and low regimes of both, emplacement rates and dome volumes, even considering the errors in the volume estimations. To elicit this, an analysis of the emplaced volumes and lava production rates estimated from image analysis and the duration of the volcanic seismic signals (LP, tremor) associated to lava

Table 1 Summary of the domes emplaced in the summit crater of Popocatepetl volcano from 1996 to 2015

| Figure | Dome ID | Dome emplacement date | Signal/parameter used to estimate emplacement date | Date of main destruction, estimated from the column height of explosion(s) | Estimated maximum volume (m ³) ^a | Short-term lava extrusion rate (m ³ /s) ^b | Residence time (days) ^c | Height/thickness of each dome (m) ^d | Shape/texture/main features of the dome final stages |
|---------|----------|-----------------------|--|--|---|---|------------------------------------|--|---|
| Fig. 3a | D0396-1 | 05/03/1996 | Harmonic tremor | 30/04/1996 | 2.4×10^6 | 5.4 | 56 | 124/124 | Hemispheric/dark lava blocks/subsidence rings |
| Fig. 3b | D0596-2 | 08/05/1996 | Harmonic tremor | 28/10/1996 | 1.5×10^6 | 9.0 | 173 | 143/71 | Hemispheric/dark lava blocks/subsidence rings, partially destroyed |
| Fig. 3c | D0397-3 | 01/03/1997 | Harmonic tremor | 30/06/1997 | 2.2×10^6 | 13.8 | 121 | 94/37 | Irregular piston-like/dark lava/irregular subsidence, partially destroyed |
| Fig. 3d | D0797-4 | 01/07/1997 | Harmonic tremor | 12/08/1997 | 0.9×10^6 | 5.8 | 42 | 104/16 | Piston-like/dark lava/subsidence rings |
| Fig. 3e | D0897-5 | 16/08/1997 | Harmonic tremor | 09/09/1997 | 1.3×10^6 | 6.4 | 24 | 139/21 | Piston/dark lava blocks/subsidence rings, partially destroyed |
| Fig. 3f | D1297-6 | 25/11/1997 | Higher-frequency tremor | 24/12/1997 | 1.8×10^6 | 19.2 | 29 | 167/41 | Low aspect-ratio/dark lava blocks/subsidence rings, partially destroyed |
| Fig. 3g | D0398-7 | 14/03/1998 | Harmonic tremor | 21/03/1998 | 3×10^4 | 1.8 | 7 | 104/11 | Small truncated cone/Gy lava/partially destroyed |
| Fig. 3h | D0598-8 | 10/05/1998 | Harmonic tremor | 14/08/1998 | 0.4×10^6 | 1.6 | 96 | 144/30 | Truncated cone/dark blocky lava/partially destroyed |
| Fig. 4a | D1198-9 | 23/11/1998 | Harmonic tremor | 30/11/1998 | 0.7×10^6 | 0.2 | 7 | 114/32 | Truncated cone/dark lava/fully destroyed |
| Fig. 4b | D0200-10 | 11/02/2000 | Harmonic tremor | 23/05/2000 | 0.1×10^6 | 0.4 | 102 | 83/14 | Piston-like/gray blocky lava/fully destroyed |
| Fig. 4c | D0800-11 | 28/08/2000 | Harmonic tremor | 03/10/2000 | 0.2×10^6 | 2.9 | 36 | 94/12 | Piston-like/dark blocky lava/fully destroyed |
| Fig. 4d | D1200-12 | 15/12/2000 | large-amplitude harmonic tremor, LP's | 22/01/2001 | 6.9×10^6 | 28.5 | 38 | 189/91 | Low-aspect ratio truncated cone/dark blocky lava/subsidence rings, partially destroyed |
| Fig. 4e | D0201-13 | 28/02/2001 | Harmonic tremor, LP's | 16/04/2001 | 2.9×10^6 | 17.2 | 47 | 136/43 | Low aspect-ratio/dark blocky lava/subsidence rings, fully destroyed |
| Fig. 4f | D0801-14 | 24/07/2001 | LP's and harmonic tremor | 15/08/2001 | 0.6×10^6 | 7.6 | 22 | 127/34 | Low-aspect ratio dome/dark blocky lava/major subsidence |
| Fig. 4g | D0801-15 | 15/08/2001 | LP's and harmonic tremor | 21/08/2001 | 1.1×10^6 | 9.3 | 6 | 162/57 | Low-aspect ratio dome/dark blocky lava/subsidence, partial destruction |
| Fig. 4h | D0901-16 | 08/09/2001 | Harmonic tremor, LP's | 09/10/2001 | 0.1×10^6 | 0.8 | 31 | 154/10 | Low-aspect ratio truncated cone/dark blocky lava/subsidence rings, partially destroyed |
| Fig. 5a | D1101-17 | 12/11/2001 | Harmonic tremor, LP's | 10/12/2001 | 0.5×10^6 | 12.9 | 28 | 162/34 | Low-aspect ratio dome/dark blocky lava/fully destroyed |
| Fig. 5b | D0102-18 | 11/01/2002 | Harmonic tremor | 19/02/2002 | 1.5×10^6 | 11.7 | 39 | 144/73 | Hemispheric dome growing in relatively deep crater left by previous destruction/dark-gray blocky lava/destroyed |
| Fig. 5c | D0402-19 | 28/04/2002 | LP's and harmonic tremor | 12/05/2002 | 1.7×10^6 | 13.5 | 14 | 158/65 | Dome growing in crater of previous explosion/dark blocky lava/subsidence, partial destruction |

Table 1 (continued)

| Figure | Dome ID | Dome emplacement date | Signal/parameter used to estimate emplacement date | Date of main destruction, estimated from the column height of explosion(s) | Estimated maximum volume (m ³) ^a | Short-term lava extrusion rate (m ³ /s) ^b | Residence time (days) ^c | Height/thickness of each dome (m) ^d | Shape/texture/main features of the dome final stages |
|---------|----------|-----------------------|--|--|---|---|------------------------------------|--|--|
| Fig. 5d | D0502–20 | 15/05/2002 | Harmonic tremor, LP's | 17/06/2002 | 1.0 × 10 ⁶ | 16.6 | 33 | 156/11 | Dome growing in subsidence of previous dome/dark blocky lava/subsidence followed by full destruction |
| Fig. 5e | D0802–21 | 01/08/2002 | Harmonic tremor, LP's | 06/11/2002 | 0.2 × 10 ⁶ | 0.2 | 97 | 142/14 | Lava contained in crater left by previous destruction/dark blocky lava/fully destroyed |
| Fig. 5f | D1202–22 | 23/11/2002 | LP's and harmonic tremor | 18/12/2002 | 1.0 × 10 ⁶ | 6.4 | 25 | 162/50 | Dome confined in previous crater/dark blocky lava/partially destroyed |
| Fig. 5g | D1202–23 | 18/12/2002 | Harmonic tremor, LP's | 23/12/2002 | 0.1 × 10 ⁶ | 9.8 | 5 | 157/10 | Irregular shape dome in crater left by previous explosion/dark blocky lava/subsidence, partial destruction |
| Fig. 5h | D0103–24 | 01/01/2003 | Harmonic tremor | 09/01/2003 | 0.5 × 10 ⁶ | 19.6 | 8 | 163/11 | Piston-like/dark blocky lava/subsidence and partial destruction |
| Fig. 6a | D0103–25 | 16/01/2003 | Harmonic tremor | 14/02/2003 | 0.8 × 10 ⁶ | 6.0 | 29 | 165/20 | Elliptical dome/dark blocky lava/partially destroyed |
| Fig. 6b | D0403–26 | 08/04/2003 | Harmonic tremor | 24/04/2003 | 0.16 × 10 ⁶ | 1.1 | 16 | 144/15 | Dome growing in crater of previous explosion/dark gray blocky lava/fully destroyed |
| Fig. 6c | D0405–27 | 13/02/2005 | Harmonic tremor | 23/10/2005 | 1.0 × 10 ⁶ | 17.0 | 252 | 149/44 | Truncated cone/dark-gray blocky lava/subsidence and partial destruction |
| Fig. 6d | D1105–28 | 03/02/2006 | Harmonic tremor | 09/03/2008 | 1.3 × 10 ⁶ | 2.4 | 765 | 166/32 | Elliptical dome/dark blocky lava/subsidence and partial destruction |
| Fig. 6e | D0510–29 | 09/05/2010 | Harmonic tremor | 07/06/2010 | 0.2 × 10 ⁶ | 1.2 | 29 | 164/20 | Dome contained in crater of previous explosions/dark blocky lava/subsidence rings, fully destroyed. New vent opened at the base of the SE wall of the main summit crater (white arrow) |
| Fig. 6f | D0811–30 | 29/08/2011 | Harmonic tremor, LP's | 26/09/2011 | 0.5 × 10 ⁶ | 6.7 | 28 | 174/19 | Dome confined in crater of previous explosions/dark blocky lava/subsidence rings. Fully destroyed |
| Fig. 6g | D1211–31 | 07/12/2011 | Harmonic tremor, LP's | 25/01/2012 | 0.6 × 10 ⁶ | 14.5 | 49 | 169/20 | Elliptical dome/dark blocky lava/destroyed, leaving much debris deposited in the crater |
| Fig. 6h | D0412–32 | 05/03/2012 | Spasmodic tremor, LP's | 18/04/2012 | 0.4 × 10 ⁶ | 2.1 | 44 | 176/20 | Dome growing in crater left by previous explosions/gray-dark lava blocks/subsidence rings. Destroyed. Large amounts of debris deposited in the crater |
| Fig. 7a | D0213–33 | 10/02/2013 | | 15/04/2013 | 2.6 × 10 ⁶ | 12.0 | 64 | 184/75 | |

Table 1 (continued)

| Figure | Dome ID | Dome emplacement date | Signal/parameter used to estimate emplacement date | Date of main destruction, estimated from the column height of explosion(s) | Estimated maximum volume (m ³) ^a | Short-term lava extrusion rate (m ³ /s) ^b | Residence time (days) ^c | Height/thickness of each dome (m) ^d | Shape/texture/main features of the dome final stages |
|---------|----------|-----------------------|--|--|---|---|------------------------------------|--|---|
| | | dd/mm/yy | | dd/mm/yy | | | | | |
| | | | Spasmodic and harmonic tremor, LP's | | | | | | Irregular-shape dome contained in crater produced by previous explosions/dark blocky lava/partially destroyed. Abundant debris deposited in the crater. |
| Fig. 7b | D0513–34 | 08/05/2013 | Spasmodic and harmonic tremors, LP's | 10/05/2013 | 1.8×10^6 | 0.3 | 2 | 184/60 | Irregular shape dome/dark lava blocks/fully destroyed by several explosions |
| Fig. 7c | D0114–35 | 15/01/2014 | Harmonic tremor | 21/02/2014 | 0.1×10^6 | 8.8 | 37 | 109/15 | Slowly-growing piston-like/dark blocky lava/subsidence and full destruction |
| Fig. 7d | D0214–36 | 26/02/2014 | LP's and harmonic tremor | 04/03/2014 | 6.0×10^3 | 0.5 | 6 | 114/10 | Small, slowly growing dome growing on bottom of crater left by previous explosions/dark blocky lava/fully destroyed |
| Fig. 7e | D1014–37 | 20/10/2014 | Harmonic tremor, LP's | 25/10/2014 | 0.6×10^6 | 16.6 | 5 | 114/30 | Dome growing on the floor of crater left by previous explosions and growth of small lobe/dark blocky lava/subsidence rings, fully destroyed |
| Fig. 7f | D0215–38 | 11/02/2015 | LP's and Harmonic tremor | 25/02/2015 | 0.8×10^6 | 3.9 | 14 | 119/30 | Dome growing on the floor of crater left by previous explosions and growth by pulses/dark blocky lava/subsidence rings, and partial destruction |

^a The maximum volume (m³) is extrapolated from the measured volume in available photos using the estimated magma extrusion rate and the total duration of volcanic seismic signals

^b The short-term lava extrusion rate (m³/s) is estimated as the ratio of the emplaced volume to the duration of LP or tremor seismic signal

^c The residence time is calculated as the difference between the dome emplacement and the main destruction date (days)

^d Height of dome (meters above the crater floor of 1994)/thickness of dome (vertical extent of each emplacement, meters)

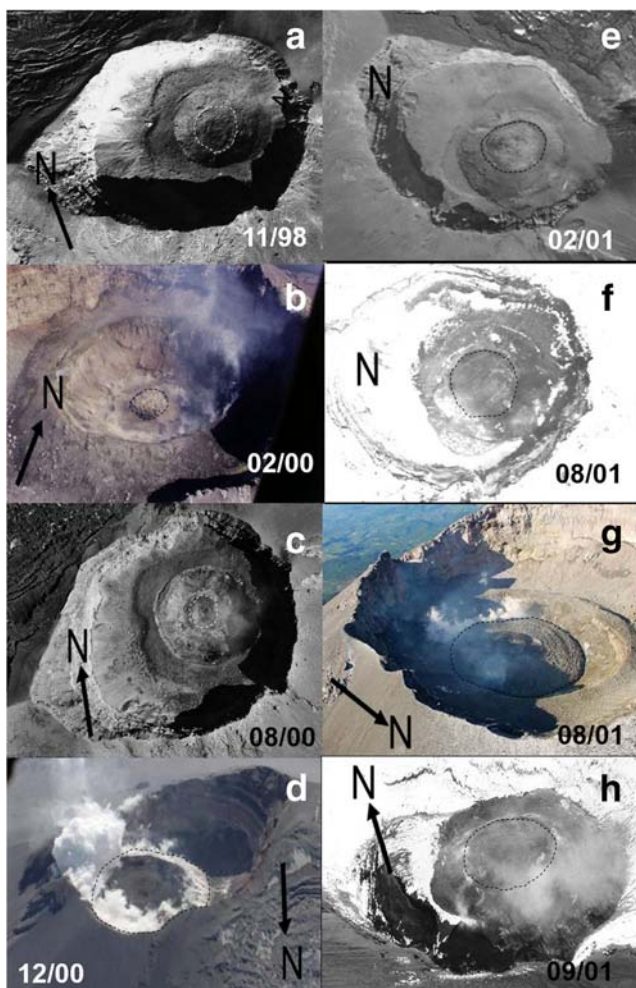


Fig. 4 Photos of domes emplaced in the crater of Popocatepetl between November 1998 and September 2001 photo credits as in Fig. 3

extrusion is made here in two different time scales: a short-term scale mostly referred to the behavior of the time-averaged volume changes of individual domes and a long-term scale, based on averages over the duration of the regimes suggested by the cumulative plots. This analysis indicates that the cyclic emplacement process develops as a succession of high and low average rates of dome emplacements (number of domes emplaced per unit time, as listed in Table 2) and mean lava production (average long-term magma extrusion rate, as listed in Table 2).

The ratio of the cumulative volume at a given time (CV) to the cumulative number of domes emplaced at that time (CND) seems to have significant relevance for the characterization of regimes. Such ratio $(CV/CND)_t$, calculated at the time t indicates the average lava volume of the domes accounted until that time. The average volume of the 38 domes studied here is $V_a = 1.07 \times 10^6 \text{ m}^3$, marked by the horizontal solid line in Fig. 8, referred to the right vertical axis scale. With this representation, five successive regimes (I–V marked in the upper part of Fig. 8) may be identified in the figure as alternating

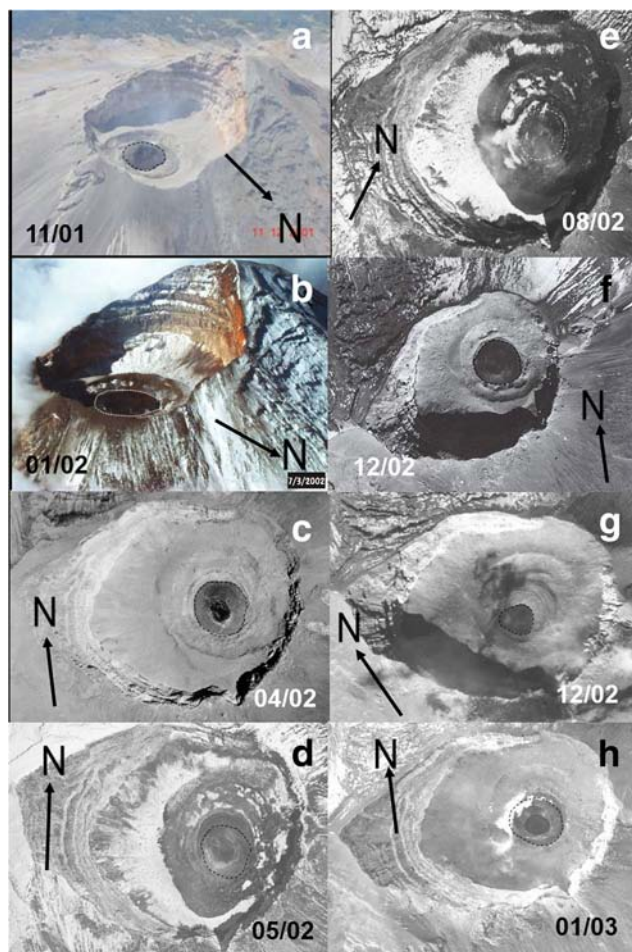


Fig. 5 Domes emplaced at Popocatepetl between November 2001 and January 2003. Photo credits as in Fig. 3

trends between high and low cumulative lava extrusion and number of dome emplacements. The trends are revealed as the slopes of the cumulative plots representing the mean rates of lava extrusion and of number of dome emplacements, respectively.

The highest volume extrusion rate (regime III) corresponding to the period December 2000 to April 2003 also has the highest rate of emplaced domes (Fig. 8; Table 2). Similarly, the lowest lava extrusion rate regime (IV), from April 2003 to August 2011, corresponds to a long period in which a relatively small number of domes were emplaced.

Long-term averages of lava extrusion and dome emplacements for the regimes

The average rates of the number of domes emplaced, and the average long-term lava extrusion rates, were estimated for the regimes calculating the number of domes and the cumulative lava volume extruded in each regime and dividing them by each regime's total duration. The results are summarized in Table 2. The average long-term lava eruption rate for the

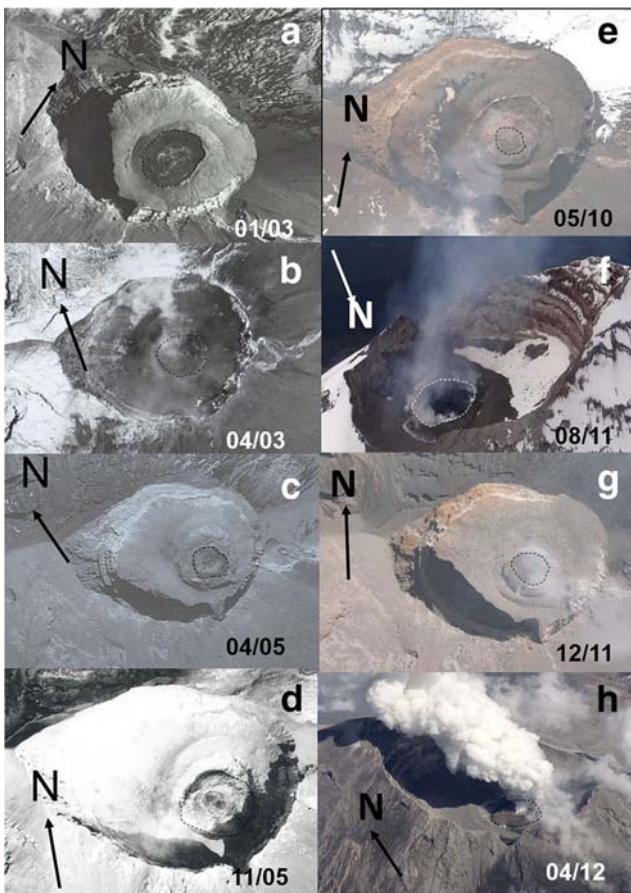


Fig. 6 Domes emplaced at Popocatepetl between January 2003 and April 2012. Photo credits as in Fig. 3

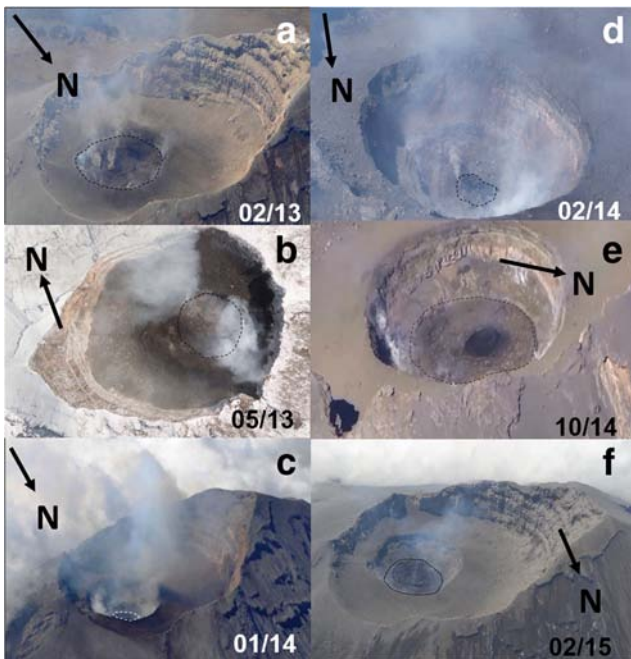


Fig. 7 Domes emplaced at Popocatepetl between February 2013 and February 2015. Photo credits as in Fig. 3

whole period is $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$. Although these average rates have little physical meaning, as the domes grow over periods of time much shorter than the duration of the regimes, they provide a criterion to compare among the different regimes of the volcano. However, it must be emphasized that the actual lava extrusion rates of individual domes (short-term rates) may be much higher, as discussed in the next section. But it is the ratio CV/CND of the parameter that more clearly reveals the abovementioned regimes, as it reflects whether the process tends to emplace lava in fewer larger domes or in a larger number of smaller domes. Both of the series, the cumulative number of emplaced domes (CND), and the estimated cumulative maximum volume reached by each dome in millions of cubic meters (CV) show significantly different slopes in each of the regimes.

Individual dome volumes and short-term lava extrusion rates

Emplaced domes cover a wide range of volumes. The largest dome, D1200-12, exceeding six million cubic meters marks the onset of the “high” regime III. In fact, most domes exceeding the average volume V_a tend to fall in “high” regimes. Contrastingly, domes with volumes below that average do not show a clear correlation with the regimes. For example, the smallest dome, D0214-36 (Table 1, Fig 7d), with about 6000 cubic meters belongs to the “high” regime V. This suggests a trend for larger volumes of individual domes to be another characteristic of the “high” regimes, while small domes may be emplaced in high or low regimes.

The average short-term extrusion rate of lava domes (fifth column in Table 2), for the whole eruptive period 1996–2015, is $\sim 8.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Although short-term rates are related to the regimes (Fig. 9), it is so in a less clear way, as a few domes emplaced during “low” regimes show “high” extrusion rates, in contrast with the long-term rates (green dashed lines in Fig. 9).

The distribution of dome volumes

The analysis of the size distribution of lava domes reveals an interesting characteristic of the ongoing Popocatepetl eruptive process. The second and third columns in Table 3 show the frequency distribution and cumulative frequency of the domes in the volume classes (in millions of cubic meters) of the first column obtained from the data in Table 1. Figure 10a shows the histogram of the frequency distribution, and Fig. 10b, the plot of the cumulative frequency (blue diamonds) of the number of domes N_c exceeding a volume V_i , which shows a clear exponential decay. The errors of the dome volumes’ estimations may change the class in which some of the domes are.

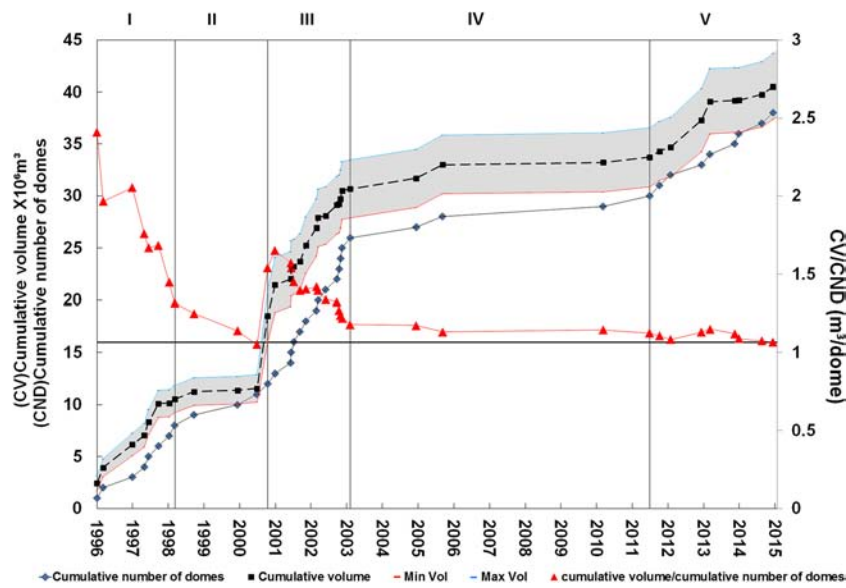


Fig. 8 Cumulative number of domes emplaced at Popocatepetl volcano (blue diamonds), accumulated volume in millions of cubic meters (black squares), and ratio of the above parameters (red triangles). The horizontal line represents the average volume of the domes ($\sim 1 \times 10^6 \text{ m}^3$), referred to the right hand scale. The shaded region around the cumulative volume

points represents the uncertainty of the cumulative volume estimations calculated using the quadratic sum of the errors of successive domes. The vertical lines separate five regimes characterized by alternate high and low rates of dome emplacement and mean lava extrusion rates

The error bars in Fig. 10b account for those errors. The red squares in Fig. 10b represent an exponential survival function using the inverse of the average volume Va (in millions of cubic meters) of the whole series of domes ($1/1.07$) as the distribution mean:

$$Nc = 38\exp(-V/Va) \tag{1}$$

where V is the lower limit of each volume class listed in the first column of Table 3. The goodness of fit between the mean observed values and the values obtained from Eq. 1 (fourth column in Table 3) is high (Pearson correlation $r^2 = 0.99$) suggesting that the driving process distributes the volumes of the domes in such a way that the number of emplaced domes inversely depends upon their volumes according to a

simple exponential survival function (Eq. 1). Further statistical analysis and implications of this distribution is beyond the scope of this paper, and those subjects are to be discussed in a separate paper.

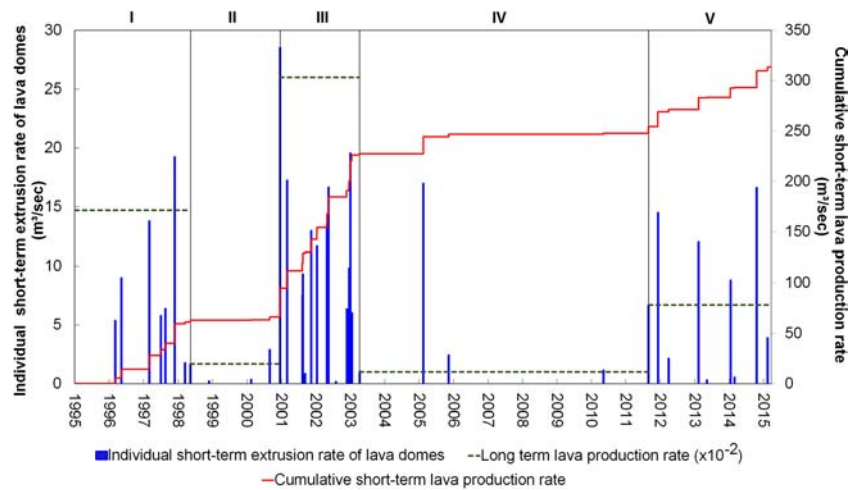
Discussion and conclusions

The sustained activity of Popocatepetl is manifested as cyclical emplacement of domes, followed by stages of dome destruction, mostly by vulcanian explosions with a wide range of intensities, a behavior frequently associated with “open-vent” volcanism (Rose et al. 2013). From the beginning of the magmatic phase in 1996 to 2015, we have recognized the emplacement of 38

Table 2 Dome emplacement rate and magma extrusion rate for the proposed regimes shown in Fig. 8

| Regime (start date) | Regime duration (days) | Number of emplaced domes | Average long-term magma extrusion rate in the regimes (m^3/s) | Regime average short-term magma extrusion rate (m^3/s) | Rate of dome emplacements (number of domes/year) in the regimes | Average residence time in the regimes (days) | Total lava volume extruded along the duration of each regime (10^6 m^3) |
|---------------------|------------------------|--------------------------|---|--|---|--|---|
| I (5-03-1996) | 796 | 7 | 0.15 | 8.8 | 3.2 | 65 | 10.1 |
| II (10-05-1998) | 950 | 4 | 0.02 | 1.3 | 1.5 | 60 | 1.4 |
| III (15-12-2000) | 844 | 14 | 0.26 | 11.4 | 6.1 | 30 | 18.9 |
| IV (8-04-2003) | 3065 | 4 | 0.01 | 5.4 | 0.5 | 266 | 2.7 |
| V (29-08-2011) | 1262 | 9 | 0.07 | 7.3 | 2.6 | 28 | 7.3 |
| Global (5-03-1996) | 6917 | 38 | 0.07 | 8.3 | 2.8 | 64 | 40.5 |

Fig. 9 Short-term lava production rates of individual domes emplaced at Popocatepetl volcano (blue bars). Cumulative short-term lava production rate of domes (red line). Vertical black lines mark the five regimes proposed in this work. Horizontal dashed green lines represent 10^{-2} of the mean long-term lava production rates referred to the left vertical axis scale



domes within the main crater of Popocatepetl with an average volume $V_a \sim 1 \times 10^6 \text{ m}^3$, and a long-term average magma production rate of $6.8 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$. These estimates are about twice those estimated above for the 1919–1927 eruption, suggesting that the two episodes are probably similar in nature but different in scale, with the current one having a longer duration and a larger total volume of erupted magma. The analysis of previous historical episodes hints that this type of

activity has been typical of Popocatepetl since its last major Plinian phase about 1200 years B.P. (Siebe et al. 1996). However, this does not answer the question of whether this type of predominantly effusive activity may lead to a Plinian phase or not (De la Cruz-Reyna et al. 2016). Assessing the hazards associated with decade-long sustained eruptive activity is thus a problem that requires a clear understanding of the current volcanic processes, which may be characterized by their persistence, rather than by their magnitude. Indeed, the current lava production rate of Popocatepetl is low when compared to other dome-building eruptions such as Mt. St. Helens (1980; 1981–1986; 2004–2005), Unzen (1990–1995), Redoubt (1989–1990), Monserrat (1995–1997), Chaiten (2008), Mt. Pelée (1902–1905), Merapi (2006), or St. Vincent (1979) even during the “high” regimes I, III, and V, as illustrated in Fig. 11. However, the 20 years of persistent activity has produced a considerable volume of magma. The net gross accumulated volume of emitted lava for the period 1996–2015 at Popocatepetl is about 40 million cubic meters. Considering that the capacity of the pre-1994 crater has been estimated as 35 million cubic meters (Macías and Siebe 2005), had the emplaced domes not been destroyed and significant proportions of their volume ejected as debris and tephra, the main crater would have been fully filled by 2012, at the beginning of regime V.

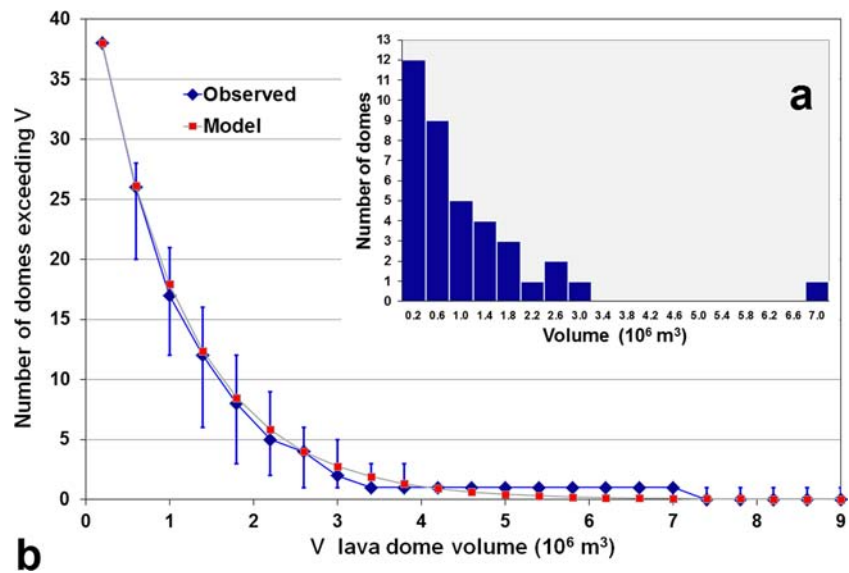
The 1994–2015 eruptive episode of Popocatepetl seemingly reflects a trend towards a self-regulating process, as illustrated in Fig. 12, in which the lava production and the material removal reach some degree of balance: as the cumulative volume of emitted lava increased rapidly between 1996 and 2003 (solid line in Fig. 12), the cumulative volume of the material removed by explosive events also increased at a similar rate (dotted line in Fig. 12). The difference between these values is the remnant of what was left of the domes and the accumulated debris falling

Table 3 Frequency distribution of lava dome volumes

| $V (10^6 \text{ m}^3)$ | N | N_{co} | N_c |
|------------------------|-----|----------|-------|
| 0.0–0.4 | 12 | 38 | 38.0 |
| 0.4–0.8 | 9 | 26 | 26.1 |
| 0.8–1.2 | 5 | 17 | 18.0 |
| 1.2–1.6 | 4 | 12 | 12.3 |
| 1.6–2.0 | 3 | 8 | 8.5 |
| 2.0–2.4 | 1 | 5 | 5.8 |
| 2.4–2.8 | 2 | 4 | 4.0 |
| 2.8–3.2 | 1 | 2 | 2.7 |
| 3.2–3.6 | 0 | 1 | 1.9 |
| 3.6–4.0 | 0 | 1 | 1.3 |
| 4.0–4.4 | 0 | 1 | 0.9 |
| 4.4–4.8 | 0 | 1 | 0.6 |
| 4.8–5.2 | 0 | 1 | 0.4 |
| 5.2–5.6 | 0 | 1 | 0.3 |
| 5.6–6.0 | 0 | 1 | 0.2 |
| 6.0–6.4 | 0 | 1 | 0.1 |
| 6.4–6.8 | 0 | 1 | 0.1 |
| 6.8–7.2 | 1 | 1 | 0.1 |

V volume classes in millions of cubic meters, N number of domes in each volume class, N_{co} cumulative number of domes exceeding the lower class boundary, N_c expected number of dome exceeding the lower class boundary calculated from the survival function (Eq. 1)

Fig. 10 **a** Histogram of the frequency distribution of lava dome volumes. **b** Cumulative frequency (blue diamonds) of the number of domes exceeding a volume V . Red squares represent the exponential survival function calculated from the inverse of the average volume. Error bars are not symmetrical because the errors in the lava dome volumes may produce a different counting upwardly and downwardly



back within the crater (central line in Fig. 12). This volume reached some equilibrium after 2003, represented as an almost constant value of the remnant volume, a factor that has greatly influenced the management of the volcanic risk (De la Cruz-Reyna et al. 2016).

The causes of the current sustained activity at Popocatepetl, and its future evolution, are matters that admit multiple answers. However, some of the features discussed in this paper offer some insight into the underlying physical process causing the current eruption of Popocatepetl. First comes the matter of the force driving the lava dome growth process. In general, magma buoyancy induced by the volatile content provides a primary force driving many terrestrial dome eruptions (Stasiuk and Jaupart 1997). In the case of Popocatepetl, the succession of domes emplaced may be explained by a changing buoyancy force in a complex conduit system caused by the

variable density contrast between volatile-rich magma and the country rock. This force pushes the column of magma upward when the volatile content exceeds a certain limit and ceases when the magma has outgassed some of the volatiles. The episodic character of magma ascent may thus be a consequence of a self-regulating process controlled by intense outgassing of the magma (González-Mellado and De la Cruz-Reyna 2008; Taisne and Jaupart 2008). Since the beginning of the current eruption in 1994, Popocatepetl has been passively outgassing very large quantities of volcanic gases. Despite the relatively low magma output, mean SO₂ fluxes have typically been about 5000 t/d, although at times (e.g., in January 1997 and September–December 1998), emissions have reached as much as 40,000–50,000 t/d (Delgado-Granados et al. 2001; Wright et al. 2002). Total SO₂ emissions are considerably larger during effusive periods (Delgado-Granados et al. 2001). While volatile-rich magma is buoyant enough to ascend, intense outgassing and crystallization increase its density, at least in a significant portion of the conduits, causing the lava extrusion to stop, and even to reverse, producing subsidence, as has been the case for several domes, e.g., D0801-14 (Fig. 4f) and D0215-38 (Fig. 7e). In such a situation, the depth of the degassing and the permeability and structure of the shallow conduit at Popocatepetl may be controlling the changes between explosive and effusive volcanism as suggested by Cross et al. (2012). The cyclic process of dome emplacement and destruction at Popocatepetl may thus be envisioned in terms of a simple model, in which the volumes of the emplaced domes are mostly controlled by two variable parameters, namely the magma’s volatile content and its capacity to outgas volatiles. Such volumes are distributed according to an exponential law (Eq. 1), in a fashion similar to the distribution of earthquake magnitudes in a

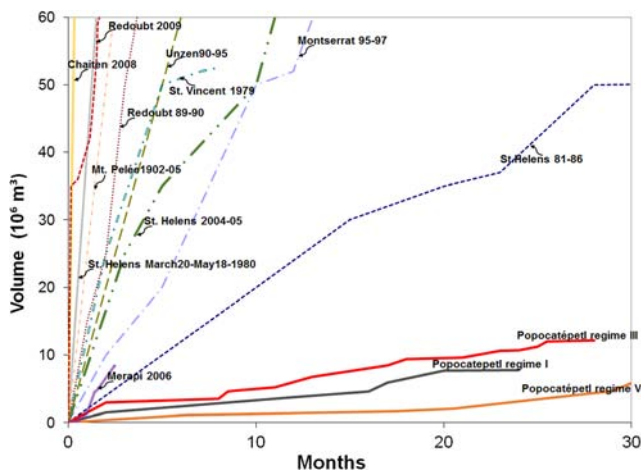
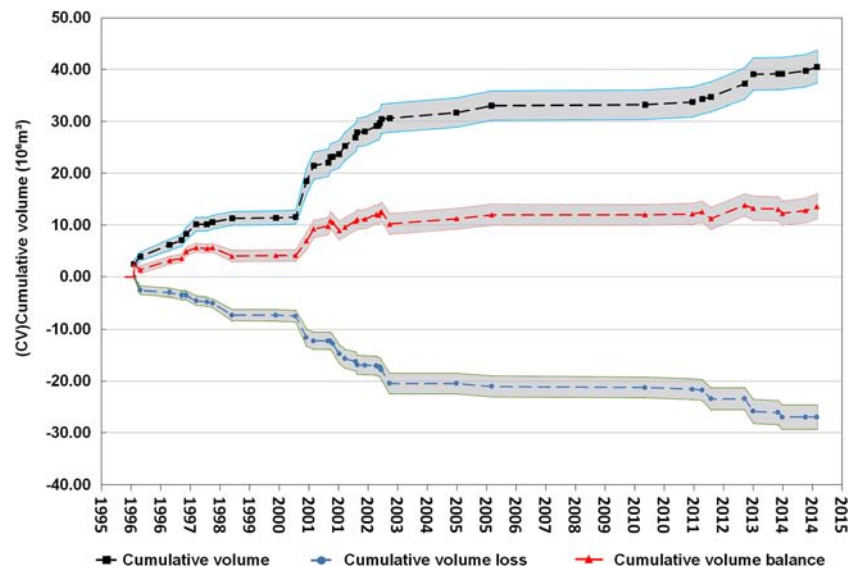


Fig. 11 Cumulative lava dome production for Popocatepetl (in the high regimes I, III, and V) compared with other volcanoes (Shilling et al. 2008; Pallister et al. 2013; Carr et al. 2016)

Fig. 12 Cumulative volume of extruded lava (black squares), cumulative volume of in-crater material loss (blue circles), and balance between these values (red triangles) for the period 1996–2015; this represents the residual material left in the crater of Popocatepetl volcano. The gray-shaded regions around the lines represent the uncertainty of the cumulative volume estimations using a quadratic sum of the errors of successive emplacements or destruction events



tectonically active region. In the case of tectonic earthquakes, the magnitude is a measure of the energy (and thus the strain) released by each shock, and the seismic scaling law, also an exponential distribution (Utsu, 1971), establishes whether the seismic energy is released by many small shocks or a few large earthquakes, depending upon how the tectonic stress is redistributed by the strain release of earthquakes over the whole magnitude range (e.g., Utsu and Hirota 1968; Kanamori and Anderson 1975; Helmstetter et al. 2005). The cumulative exponential distribution of the lava dome volumes describes a similar behavior for dome volumes, which is also controlled by the energy released during emplacement of each dome. When the volatile content produces a buoyancy force that works against the gravity and the frictional forces, it releases an amount of gravitational energy related to the height of each of the domes (González-Mellado and De la Cruz-Reyna 2008; Taisne and Jaupart 2008), since in a confined crater, as is the case at Popocatepetl, the volume depends on the dome thickness (considering the internal geometry of the crater, Table 1).

We may conclude that as long as this eruptive episode maintains a self-regulating process, the height of the domes will not generate an excessive overpressure in the magmatic system, and the effusive activity may continue indefinitely without exceeding a relatively low level of dome-destruction explosivity. However, if the volume or height of a dome exceeds the level of dome D1200-12, which is almost outside the expectations posed by Eq. 1, the nature of the eruption may evolve to a different level. The overpressure may cause a stronger explosion clearing a larger volume of the conduit content, possibly leading to a sudden depressurization and destabilization of the whole magmatic system.

Acknowledgments The authors are grateful to CONACYT (scholarship 230925) and DGAPA-PAPIIT-UNAM (project IN-106312) for the financial support. The National Center for Disaster Prevention (CENAPRED) provided valuable monitoring data and aerial photographs for which we are indebted. Most images were obtained from aircrafts of the Mexican Ministry of Transportation and Communications (SCT), The Mexican Navy (Secretaría de Marina, SEMAR), and the Federal Police (Policía Federal). We wish to express our appreciation to both anonymous referees and the editor J. Fierstein for the helpful and constructive reviews of this manuscript.

References

- Boudal C, Robin C (1989) Volcán Popocatepetl: recent eruptive history, and potential hazards and risks in future eruptions. In: Latter JH (ed) Volcanic hazards. IAVCEI proc. Volcanol. Springer, Berlin, pp. 110–128
- Capra L, Macías JL, Scott KM, Abrams M, Garduño-Monroy VH (2002) Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the trans-Mexican volcanic belt, Mexico—behavior, and implications for hazard assessment. *J Volcanol Geotherm Res* 113:81–110. doi:10.1016/S0377-0273(01)00252-9
- Carr BB, Clarke AB, Vanderkluyssen L (2016) The 2006 lava dome eruption of Merapi volcano (Indonesia): detailed analysis using MODIS TIR. *J Volcanol Geotherm Res* 311:60–71
- CENAPRED (2012) Historia de la actividad del Volcán Popocatepetl. 17 años de erupciones: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/225-HISTORIADELAActividadDELVolcANPOPOCATPETL-17AOSDEERUPCIONES.PDF>
- Cross JK, Roberge J, Jerram DA (2012) Constraining the degassing processes of Popocatepetl volcano, Mexico: a vesicle size distribution and glass geochemistry study. *J Volcanol Geotherm Res* 225:226: 81–95
- De la Cruz-Reyna, S, Quezada, JL, Peña C, Zepeda O, Sánchez T (1995) Historia de la actividad del Popocatepetl (1354–1995). In: Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994–1995. CENAPRED-UNAM, México, D.F, pp 3–22
- De la Cruz-Reyna S, Siebe C (1997) The giant Popocatepetl stirs. *Nature* 388(6639):227

- De la Cruz-Reyna S, Tilling R (2008a) Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatepetl volcano, México: importance of an effective hazards warning system. *J Volcanol Geotherm Res* 170:121–134
- De la Cruz-Reyna S, Yokoyama I, Martínez-Bringas A, Ramos E (2008b) Precursory seismicity of the 1994 eruption of Popocatepetl volcano, Central Mexico. *Bull Volcanol* 70(6):753–767
- De la Cruz-Reyna S, Tilling R, Valdés-González C (2016) Challenges in responding to a sustained, continuing volcanic crisis: the case of Popocatepetl volcano, Mexico, 1994-present. In: Bird D, Jolly G, Haynes K, McGuire B, Feamley C (Eds.) *Volcanic crisis communication - observing the volcano world. Advances in Volcanology series.* Springer-Verlag (in press)
- Delgado-Granados H, Cárdenas-González L, Piedad-Sánchez N (2001) Sulfur dioxide emissions from Popocatepetl volcano (Mexico): case study of a high emission rate, passively degassing eruptive volcano. *J Volcanol Geotherm Res* 108:107–120
- Diefenbach AK, Bull KF, Wessels RL, McGimsey RG (2013) Photogrammetric monitoring of lava dome growth during the 2009 eruption of redoubt volcano. *J Volcanol Geotherm Res* 259:308–316
- Dietz H (2010) Use your camera to capture “3D” anaglyphs. <http://www.instructables.com/id/Use-Your-Camera-To-Capture-3D-Anaglyphs/>
- Donnadieu F, Kelfoun K, Van Wyk de Vries B, Cecchi E, Merle O (2003) Digital photogrammetry as a tool in analogue modelling: applications to volcano instability. *J Volcanol Geotherm Res* 123:161–180
- Dr Atl (1939) *Volcanes de México. Vol. I. La Actividad del Popocatepetl.* Editorial Polis, México
- Friedländer I (1921) La erupción del Popocatepetl. *Memorias Sociedad Científica Antonio Alzate. México* 40: 219–227
- González-Mellado A, De la Cruz-Reyna S (2008) A simplified equation of state for the density of silicate hydrous magmas: an application to the Popocatepetl buoyancy-driven dome growth process. *J Volcanol Geotherm Res* 171:287–300
- Helmstetter A, Kagan YY, Jackson DD (2005) Importance of small earthquakes for stress transfers and earthquake triggering. *J Geophys Res.* doi:10.1029/2004JB003286
- Kanamori H, Anderson DL (1975) Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull Seism Soc Am* 65:1073–1096
- Macías JL (2007) Geology and eruptive history of some active volcanoes of México. In Alaniz-Álvarez SA, Nieto-Samaniego AF (Eds) *Geology of México. Geol Soc Am Sp Paper* 422: 183–232. doi:10.1130/2007.2422(06)
- Macías JL, Siebe C (2005) Popocatepetl’s crater filled to the brim: significance for hazard evaluation. *J Volcanol Geotherm Res* 141:327–330
- Matthews SJ, Gardeweg MC, Sparks RSJ (1997) The 1984 to 1996 cyclic activity of lascar volcano, northern Chile: cycles of dome growth, dome subsidence, degassing and explosive eruptions. *Bull Volcanol* 59:72–82
- Pallister JS, Diefenbach AK, Burton WC, Muñoz J, Griswold JP, Lara LE, Lowenstem JB, Valenzuela CE (2013) The Chaitén rhyolite lava dome: eruption sequence, lava dome volumes, rapid effusion rates and source of the rhyolite magma. *Andean Geol* 40:277–294. doi:10.5027/andgeoV40n2-a06
- Ramire-García N (2008) Sistema de visión estereoscópica basado en anaglifo para aplicaciones en realidad virtual. MSc thesis, School of Geology, IPN, México
- Robin C, Boudal C (1987) A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern volcano Popocatepetl. *J Volcanol Geotherm Res* 31:115–130
- Rose WI, Palma JL, Delgado-Granados H, Varley N (2013) Open-vent volcanism and related hazards: overview. *Geol Soc Am Special Paper* 498. pp vii–xiii
- Ryan GAS, Loughlin C, James MR, Jones LD, Calder ES, Christopher T, Strutt MH, Wadge G (2010) Growth of the lava dome and extrusion rates at Soufriere Hills volcano, Montserrat, West Indies: 2005–2008. *Geophys Res Lett* 37:1–5
- Schilling SP, Thompson RA, Messerich JA, Iwatsubo EY (2008) Use of digital aerophotogrammetry to determine rates of lava dome growth, Mount St. Helens, Washington, 2004–2005. A volcano rekindled: the renewed eruption of Mount St. Helens, 2004–2006. *US Geological Survey Professional Paper* 1750:145–167
- Siebe C, Abrams M, Macías JL, Obenholzner J (1996) Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, Central Mexico: past key to the future? *Geology* 24:399–402
- Siebe C, Macías JL (2006) Volcanic hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the sierra de Chichinautzin volcanic field. *Geological Society of America Special Paper* 402:253–329. doi:10.1130/2004.VHITMC.PFG
- Sparks RSJ, Young SR, Barclay J, Calder ES, Cole P, Darroux B, Davies MA, Druitt TH, Harford C, Herd R, James M, James M, Lejeune A, Loughlin S, Norton G, Skeritt G, Stasiuk MV, Stevens NS, Toothill J, Wadge G, Watts R (1998) Magma production and growth of the lava dome of the Soufriere Hills volcano, Montserrat, West Indies: November 1995 to December 1997. *Geophys Res Lett* 25(18): 3421–3424
- Stasiuk MV, Jaupart C (1997) Lava flow shapes and dimensions as reflections of magma system conditions. *J Volcanol Geotherm Res* 78: 31–50
- Taisne B, Jaupart C (2008) Magma degassing and intermittent lava dome growth. *Geophys Res Lett* 35:L20310. doi:10.1029/2008GL035432
- Taylor JR (1997) *An introduction to error analysis, 2nd edn.* University Science Books, Sausalito CA 327 pp
- Utsu T (1971) Aftershocks and earthquake statistics (III). *J Geophys Bull Hokkaido Univ* 3(5):379–441
- Utsu T, Hirota T (1968) A note on the statistical nature of energy and strain release in earthquake sequences. *J Geophys Bull Hokkaido Univ* 3(2):49–64
- Valenzuela CE (2011) Tasa de crecimiento del complejo de domos del volcán Chaitén, periodo mayo 2008 - diciembre 2009. BSc Geol thesis Fac. Ciencias Fis. y Mat. U. de Chile. Santiago
- Waitz P (1921) La nueva actividad y el estado actual del Popocatepetl. *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate, México.* 37: 295–313
- Wright R, De La Cruz-Reyna S, Harris A, Flynn L, Gomez-Palacios JJ (2002) Infrared satellite monitoring at Popocatepetl: explosions, exhalations, and cycles of dome growth. *J Geophys Res* 107:2–16

APENDICE 2. Artículo 2:**Statistical analysis of the sustained lava dome emplacement and destruction processes at Popocatépetl volcano, central México.**

Ana Teresa Mendoza-Rosas ¹, Ángel Gómez-Vázquez ³, Servando De la Cruz-Reyna ^{2*}

1 CONACYT - Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Av. Playa Pie de la Cuesta 702. San Pablo. Querétaro, Qro. México.

2 Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, C. Universitaria, CDMX, México 04510, México.

3 Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, C. Universitaria, CDMX 04510, México.

* Corresponding author. Email: sdelacrr@geofisica.unam.mx

ABSTRACT

Popocatépetl volcano reawakened in 1994 after nearly 70 years of quiescence. Between 1996 and 2015, a succession of at least 38 lava domes have been irregularly emplaced and destroyed, with each dome reaching particular volumes at specific emplacement rates. The complexity of this sequence is analyzed using statistical methods in an attempt to gain insight into the physics and dynamics of the lava dome emplacement and destruction process, and to objectively assess the hazards related to that volcano. The time series of emplacements, dome residences, lava effusion lulls and emplaced dome volumes and thicknesses are modeled using the simple exponential and Weibull distributions, the compound non-homogeneous generalized Pareto-Poisson process (NHPPP) and the mixture of exponentials distribution (MOED). The statistical analysis reveals that the sequence of dome emplacements is a non-stationary, self-regulating process most likely controlled by the balance between buoyancy-driven magma ascent and volatile exsolution crystallization. This balance has supported the sustained effusive activity for decades, and may persist for

an undetermined amount of time. However, the eruptive history of Popocatépetl includes major Plinian phases that may have resulted from a breach in that balance. Certain criteria to recognize such breaching conditions are inferred from this statistical analysis.

Key words. Popocatépetl volcano. Dome emplacement. Statistical analysis. Volcanic hazard

INTRODUCTION

Popocatépetl volcano (19.02°N, 98.62°W) is a high (5452 m a.s.l.) conical volcanic edifice located in the central Trans-Mexican Volcanic Belt. This volcano is surrounded by a densely populated area with more than 20 million people living within a radius of 100 km. Around 23000 years BP a major eruption destroyed an earlier volcanic edifice and produced massive debris avalanches reaching as far as 70 km and blanketing 600 km² (Robin and Boudal 1987; Boudal and Robin 1989, Siebe et al. 1995; Capra et al. 2002; Macías 2007). The Popocatépetl eruptive record shows evidence of at least seven major explosive eruptions and many smaller eruptions occurring since then (Siebe and Macias, 2006; Mendoza-Rosas and De la Cruz Reyna, 2008; Siebe et al., 2017). In the last 1100 years, the eruptive activity at Popocatépetl has remained moderate. Historical reports describe about 16 minor and 3 moderate eruptive episodes occurring within the past 500 years, with some of them likely involving dome growth-and-destruction processes similar to those characterizing the current activity (De la Cruz-Reyna et al. 1995; De la Cruz-Reyna and Tilling 2008, De la Cruz-Reyna et al. 2016; Gómez-Vazquez et al. 2016). Both the geological and historical records have been statistically analyzed by Mendoza-Rosas and De la Cruz-Reyna (2008, 2009)

The current eruptive episode, or lava dome eruption following the nomenclature of Wolpert et al. (2016), began in the early hours of December 21, 1994, with a series of phreatic explosions. Afterwards, the ash emissions became less frequent, showing a characteristic emerging seismic waveform that was hence referred to as “exhalations” (De la Cruz-Reyna and Siebe 1997; De la Cruz-Reyna and Tilling 2008). In the spring of 1996, the volcanic

activity increased again. In late March 1996, a fresh lava dome was observed growing within the crater (Siebe and Macías 2006). A strong explosion on April 30, 1996 destroyed this first dome, resulting in the only reported fatalities directly related to the Popocatepetl activity (De la Cruz-Reyna et al. 2016). Between then and 2015, at least 37 other lava domes have been emplaced and destroyed within the crater of Popocatepetl (Gómez-Vazquez et al. 2016). This activity is ongoing as of the date of this submission.

Aiming to develop a better understanding of the dynamics and physics of this sustained volcanic process and its probable future behavior, we analyze the point process associated with the lava dome eruption as sequences of lava dome emplacement and destruction events at Popocatepetl, a process which is described in detail by Gómez-Vazquez et al. (2016). These sequences, summarized in Table 1 include the dates of the dome emplacements and of the main destruction events, along with the dome residence times (meaning the period of time between the date of an emplacement and the next main dome destruction event), and the lava effusion lulls (time between the main dome-destruction event and the emplacement of the next lava dome, in which dome destruction activity may continue, but no evidence of magma emission exists). Clearly, the sum of these times should add up to the time between successive emplacements. In addition, we analyze the distribution of the estimated maximum volumes and thicknesses reached by the lava domes.

From these analyses we estimate the probabilities of future emplacements, their expected volumes, and draw some conclusions about the nature of the sustained lava dome emplacement and destruction processes.

Table 1. Chronological sequence of the lava dome emplacement and destruction processes of Popocatepetl volcano (Gómez-Vazquez et al. 2016). The mean value of the dome volumes is 1.07 million cubic meters, and the mean value of the dome thicknesses is 35 m. The mean of the time between emplacements is 187 days.

| Dome ID Dmmyy-n | Time between emplacements (days) | Time between main destruction events (days) | Residence time (days) | Lull time (days) | Estimated maximum volume (10 ⁶ m ³) | Estimated maximum thickness of each dome (meters) |
|--------------------|--|---|--------------------------|---------------------|---|---|
| D0396-1 | 0 | 0 | 56 | 8 | 2.41 | 124 |
| D0596-2 | 64 | 181 | 173 | 124 | 1.52 | 71 |
| D0397-3 | 297 | 245 | 121 | 1 | 2.23 | 37 |
| D0797-4 | 122 | 43 | 42 | 4 | 0.88 | 16 |
| D0897-5 | 46 | 28 | 24 | 77 | 1.30 | 21 |
| D1297-6 | 101 | 106 | 29 | 80 | 1.77 | 41 |
| D0398-7 | 109 | 87 | 7 | 50 | 0.03 | 11 |
| D0598-8 | 57 | 146 | 96 | 101 | 0.39 | 30 |
| D1198-9 | 197 | 108 | 7 | 438 | 0.72 | 32 |
| D0200-10 | 445 | 540 | 102 | 97 | 0.14 | 14 |
| D0800-11 | 199 | 133 | 36 | 73 | 0.17 | 12 |
| D1200-12 | 109 | 111 | 38 | 37 | 6.93 | 91 |
| D0201-13 | 75 | 84 | 47 | 99 | 2.97 | 43 |
| D0801-14 | 146 | 121 | 22 | 0 | 0.56 | 34 |
| D0801-15 | 22 | 6 | 6 | 18 | 1.06 | 57 |
| D0901-16 | 24 | 49 | 31 | 34 | 0.14 | 10 |
| D1101-17 | 65 | 62 | 28 | 32 | 0.50 | 34 |
| D0102-18 | 60 | 71 | 39 | 68 | 1.54 | 73 |
| D0402-19 | 107 | 82 | 14 | 3 | 1.68 | 65 |
| D0502-20 | 17 | 36 | 33 | 45 | 0.97 | 11 |
| D0802-21 | 78 | 142 | 97 | 17 | 0.18 | 14 |
| D1202-22 | 114 | 42 | 25 | 0 | 1.03 | 50 |
| D1202-23 | 25 | 5 | 5 | 9 | 0.10 | 10 |
| D0103-24 | 14 | 17 | 8 | 7 | 0.49 | 11 |
| D0103-25 | 15 | 36 | 29 | 53 | 0.79 | 20 |
| D0403-26 | 82 | 69 | 16 | 661 | 0.16 | 15 |
| D0405-27 | 677 | 913 | 252 | 103 | 1.03 | 44 |
| D1105-28 | 355 | 868 | 765 | 791 | 1.32 | 32 |
| D0510-29 | 1556 | 820 | 29 | 448 | 0.21 | 20 |
| D0811-30 | 477 | 476 | 28 | 72 | 0.50 | 19 |
| D1211-31 | 100 | 121 | 49 | 40 | 0.59 | 20 |
| D0412-32 | 89 | 84 | 44 | 298 | 0.38 | 20 |
| D0213-33 | 342 | 362 | 64 | 23 | 2.60 | 75 |
| D0513-34 | 87 | 25 | 2 | 250 | 1.80 | 60 |
| D0114-35 | 252 | 287 | 37 | 5 | 0.11 | 15 |
| D0214-36 | 42 | 11 | 6 | 230 | 0.01 | 10 |
| D1014-37 | 236 | 235 | 5 | 109 | 0.55 | 30 |
| D0215-38 | 114 | 123 | 14 | | 0.76 | 30 |

**THE SUCCESSION OF LAVA DOME EMPLACEMENT AND DESTRUCTION
EVENTS AT POPOCATÉPETL VOLCANO**

Based on the lava dome emplacement and destruction study carried out by Gómez-Vázquez et al. (2016), summarized in Table 1, we have constructed Fig. 1 to show the time evolution of the cumulative number of emplacements (triangles) and subsequent main destruction events (circles), which are defined as the strongest explosions destroying all, or at least most, of the emplaced lava dome. A succession of five different regimes, marked I to V in Fig. 1, characterized by alternating periods of high and low emplacement and lava production rates were recognized by Gómez-Vázquez et al. (2016). This suggests that the eruptive sequence of dome emplacements may be a non-stationary process. A moving average test (Klein 1982) performed on the times between the successive emplacements, illustrated in Fig. 2, confirms the non-stationary character of the emplacement sequence.

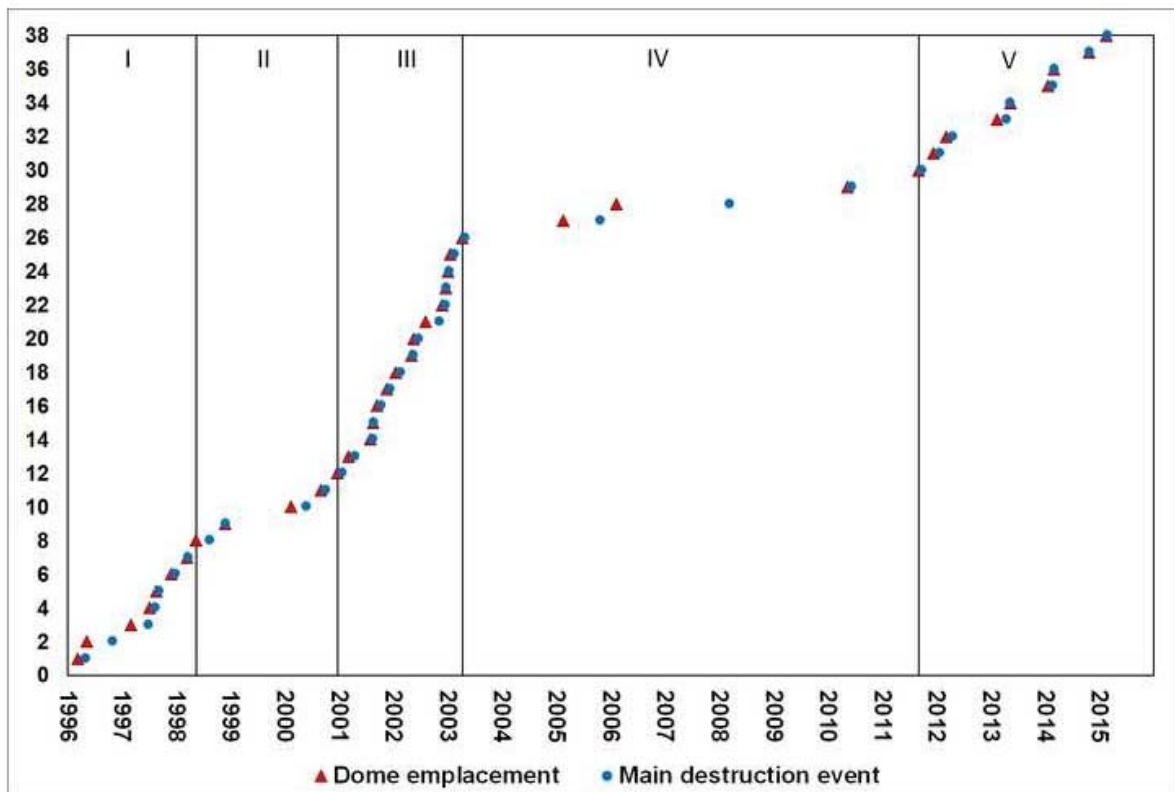


Fig 1. Cumulative plot of the number of domes emplaced at Popocatepetl volcano (triangles), and the consecutive main destruction events (circles), based on the data listed in Table 1. The vertical lines in the plot mark the five regimes described by Gómez-Vázquez et al. (2016).

To test the randomness of the process, we search for a possible dependence between successive time periods using the autocorrelation function for the whole sequence (Fig 3a), and for each of the regimes I to V (Fig 3b). The autocorrelation functions for each of the emplacement regimes show a clear independence for all lags, staying below the Kolmogorov - Smirnov values (K-S) needed to reject independence at the 5% significance level (horizontal dashed lines). Contrastingly, the autocorrelation function for the whole series shows a somewhat higher correlation for small lags, and negative correlations for higher lags, this as a consequence of the succession of high and low regimes. The maximum correlation value at lag 1 is 0.307, barely below the 5% K-S value of 0.316, hinting the non-randomness of the succession of regimes.

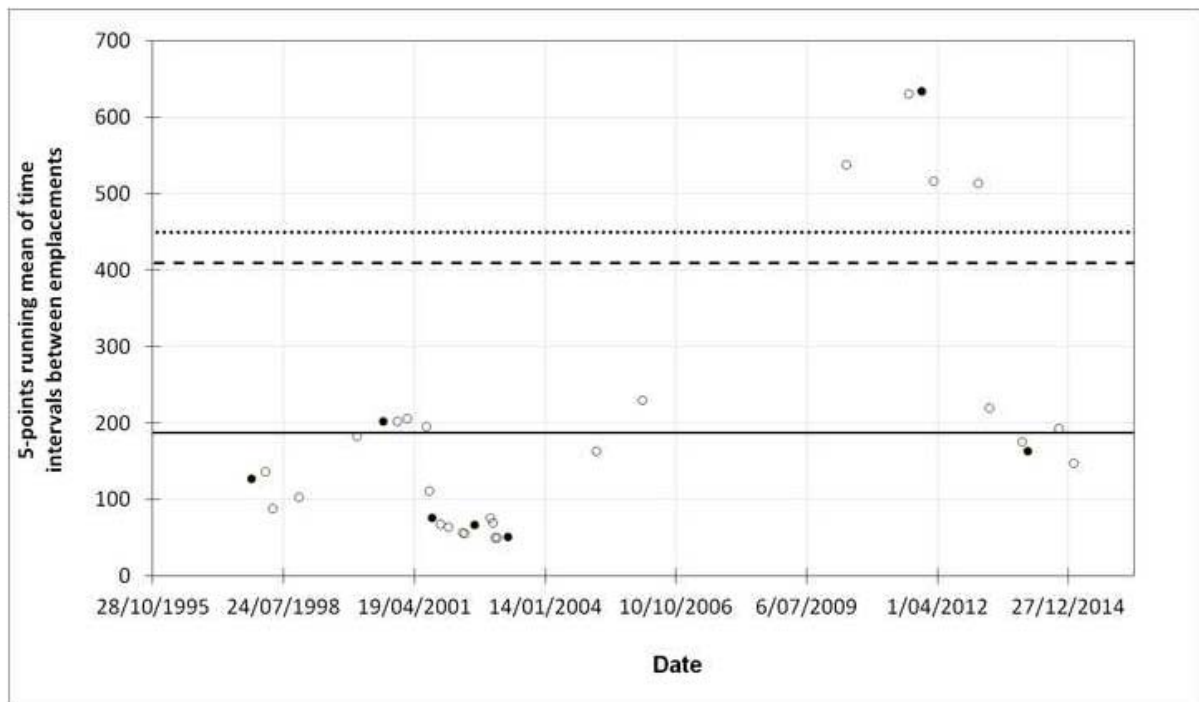


Fig 2. Moving average of consecutive time intervals between lava dome emplacement events (Klein 1982). The open circles represent averages of five consecutive time intervals plotted at the date of the last event of each interval. Thus every fifth point (filled circle) is independent of the others. The solid horizontal line is the mean of all the time periods

between events. The dotted line represents the 95% upper confidence level, and the dashed line represents the 90% upper confidence level. Several open circles and at least one filled circle falling beyond the given confidence intervals indicate a non-stationary sequence.

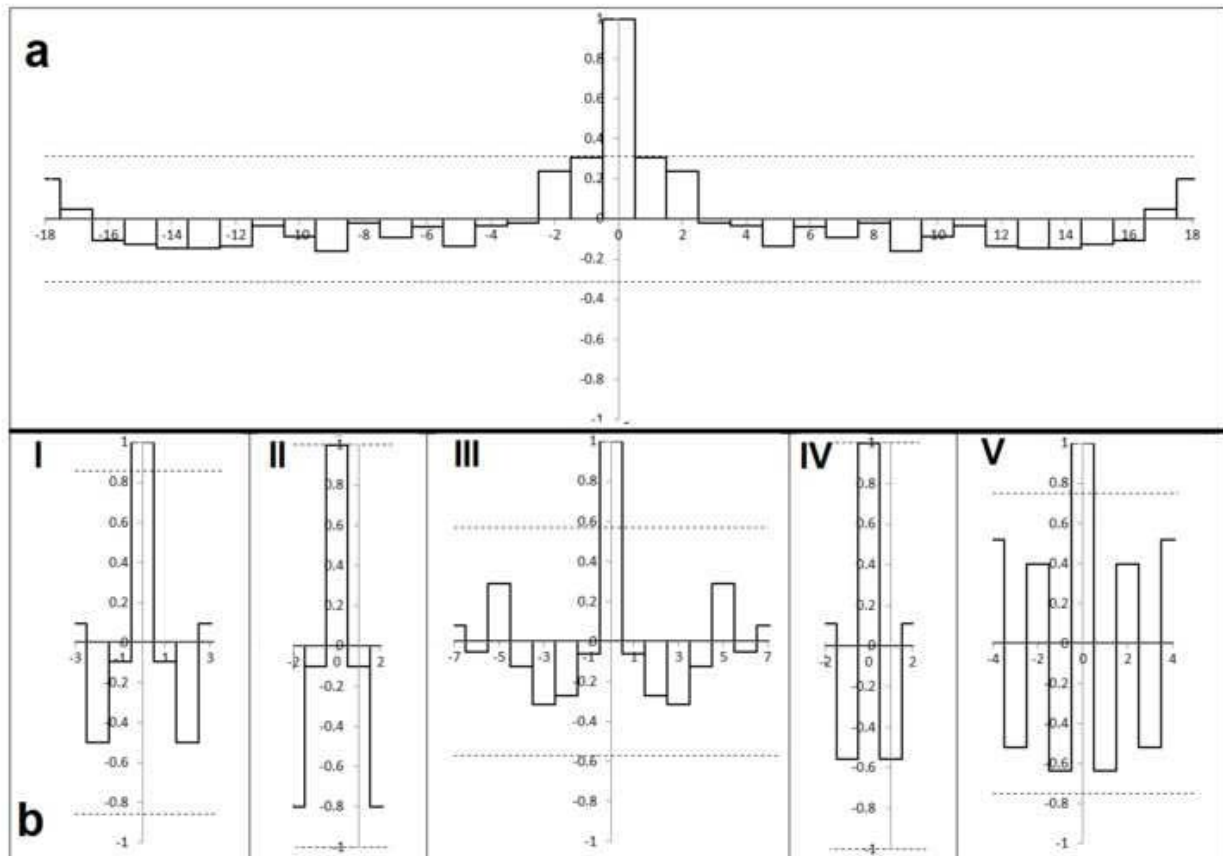


Fig 3. a) Autocorrelation function of the successive time intervals between lava dome emplacements, b) Autocorrelations functions for each of the regimes recognized by Gómez-Vázquez et al. (2016). The horizontal dashed lines represent the 5% significance level Kolmogorov - Smirnov values needed to reject independence.

THE LAVA DOME EMPLACEMENT AND DESTRUCTION SEQUENCES AS A NON-STATIONARY RENEWAL PROCESS

Based on the data from Gómez-Vázquez et al. (2016) we now aim to forecast some aspects of the lava dome eruption in the time domain, i.e., what are the probabilities of domes being emplaced in given time intervals. This issue is addressed considering the eruptive episode

as a random, non-stationary renewal process, in which the intervals between arrivals are positive, independent and identically distributed random variables (Cox 1970; Cox and Isham 1980). To do this, we first model the time intervals between emplacements using different probabilistic distributions such as the exponential, Weibull, and the mixture of exponentials (MOED) distributions (Mendoza-Rosas and De la Cruz-Reyna 2009, 2010).

In a renewal process that develops at a mean rate of λ occurrences per unit time, the cumulative exponential distribution with a mean time between occurrences $1/\lambda$ and standard deviation $1/\lambda^2$, is expressed as:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

where t is time. This distribution is commonly used to describe the time between events in a Poisson memoryless processes, with a time-independent probability of occurrence.

The Weibull distribution has been applied to the statistical quality control, reliability analysis, earthquake hazard assessment, and many other applications (see, for instance, Johnson, 1966; Ferráes, 2003). It has also been used to model volcanic eruption sequences (e.g., Bebbington and Lai 1996a). The 2-parameter cumulative Weibull distribution function is

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^k} \quad (2)$$

where α is a scale parameter, and k is a shape parameter.

If $k=1$, the Weibull distribution is reduced to the exponential distribution, $k<1$ corresponds to a clustering or over-dispersed distribution and $k>1$ to a more periodic distribution (Bebbington, 2007). This shape parameter is of particular interest because it characterizes the failure rate trends (Yang and Xie 2003). The scale parameter α determines the statistical

dispersion of the probability distribution. If it is large, then the distribution will be more spread out along the abscissa axis.

The MOED is a sum of exponentials distribution that is particularly useful for complete and non-stationary time series, i.e. when the distribution of the number of events changes upon translation in a fixed interval (Cox and Lewis 1966), and develops as a succession of regimes, each having a characteristic mean rate. The MOED has been applied to assess probabilities of eruption occurrences in Mexican volcanoes (Mendoza-Rosas and De la Cruz-Reyna 2009, 2010) and in Chilean volcanoes (Dzierma and Wehrmann 2010; Wehrmann and Dzierma 2011). Here, we apply the MOED by considering the different rates associated with the regimes observed in the cumulative number of emplacements shown in Fig. 1. One of the MOED's properties is the flexibility of its density function that permits matching clustering and time dependence of time series with distribution parameters that can be readily obtained from the observed occurrence rates (Mendoza-Rosas and De la Cruz-Reyna 2009).

The cumulative MOED is:

$$F(t|\Lambda) = \sum_{j=1}^m w_j (1 - e^{-\lambda_j t}) \quad , \quad (3)$$

with survival probability distribution

$$S(t|\Lambda) = 1 - F(t|\Lambda) \quad ,$$

and probability density function:

$$f(t|\Lambda) = \sum_{j=1}^m w_j \lambda_j e^{-\lambda_j t} \quad ,$$

where $\lambda_j, w_j > 0$ for $(j = 1, \dots, m)$, and $\sum_{i=1}^m w_i = 1$.

The parameter λ_j is the rate of each single exponential distribution, namely, the number of events occurring in each characteristic period or regime j divided by its duration. The weighting factors w_j are calculated as the normalized complement of the corresponding

proportions of the duration of the characteristic periods, considering that regimes of shorter duration tend to have higher rates (Mendoza-Rosas and De la Cruz-Reyna 2009).

The Exponential (Eq. 1), Weibull (Eq. 2) and MOED (Eq. 3) distributions are used here to estimate the likelihood of at least one event occurring within a given future time interval.

To consider conditionality given the occurrence of a previous event, let us suppose that s is the time elapsed since the previous event. The probability of no event occurring in the next t days is $P(T > s + t | T > s)$. We may then obtain the complementary probability of at least one event occurring within a time interval t as

$$P(T \leq s + t | T > s) = 1 - \frac{1 - F(s + t)}{1 - F(s)} \tag{4}$$

We first estimate the probabilities of a new dome emplacement in any specific time interval using the Exponential, Weibull and MOED cumulative functions with the parameters shown in Table 2. Figure 4 and Table 3 show the probabilities of at least one dome emplacement occurring in any specified T -day's long interval. In order to obtain conditional probabilities considering the time s from the previous dome emplacement, Eq. 4 should be used to calculate the probabilities of at least one new emplacement in a time interval t .

Table 2. Parameters of the distributions describing the lava dome emplacement succession using daily rates (dome emplacements/days). The parameters of the Weibull distribution were calculated using a plot method described by Bebbington and Lai (1996b).

Table 2

| | | Parameters | | |
|--------------------------|------------------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Exponential Distribution | Weibull Distribution | MOED | | |
| | | Regime | Weighting factors (w_i) | Daily rates (λ_i) |
| 0.0053 (Daily rate) | Shape 0.964 Scale 156.702 | I | 0.2212 | 0.0088 |
| | | II | 0.2157 | 0.0042 |
| | | III | 0.2195 | 0.0166 |
| | | IV | 0.1392 | 0.0013 |
| | | V | 0.2044 | 0.0071 |

Table 3. Probabilities of the occurrence of at least one lava dome emplacement event in any T -day's long interval, obtained from the Exponential (Eq. 1), Weibull (Eq. 2) and MOED (Eq. 3) cumulative functions, with the parameters listed in Table 2. To calculate the conditional probability considering the time since the previous emplacement, Eq. 4 must be used.

Table 3

| T (days) | Exponential | Weibull | MOED |
|------------|-------------|---------|--------|
| 120 | 0.4737 | 0.5384 | 0.5570 |
| 240 | 0.7230 | 0.7787 | 0.7519 |
| 360 | 0.8542 | 0.8925 | 0.8400 |
| 480 | 0.9233 | 0.9473 | 0.8870 |
| 600 | 0.9596 | 0.9740 | 0.9152 |
| 720 | 0.9787 | 0.9871 | 0.9336 |
| 840 | 0.9888 | 0.9936 | 0.9466 |
| 960 | 0.9941 | 0.9968 | 0.9562 |
| 1080 | 0.9969 | 0.9984 | 0.9636 |
| 1200 | 0.9984 | 0.9992 | 0.9695 |

Table 4. Kolmogorov-Smirnov and small-sample Akaike Information Criterion values for different distributions

Table 4

| Distribution | K-S | AICc |
|--------------|--------|-------|
| Exponential | 0.1749 | 70.85 |
| Weibull | 0.1102 | 46.2 |
| MOED | 0.0917 | 77.54 |

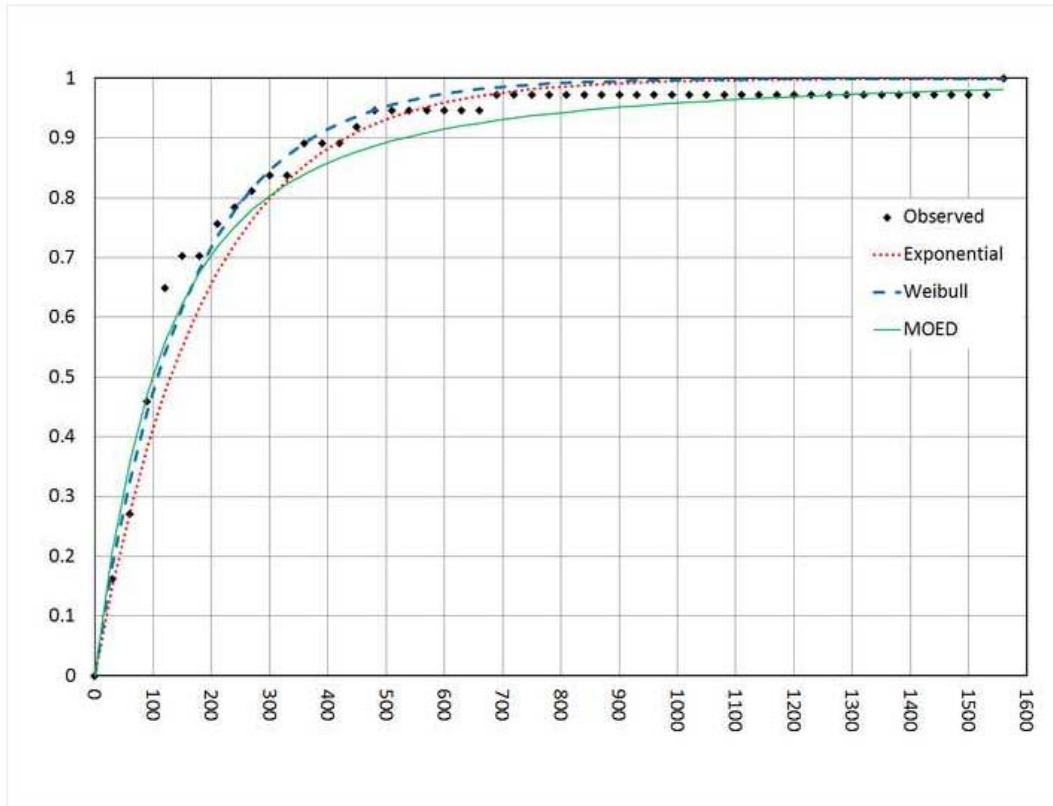


Fig 4. Probabilities of at least one lava dome emplacing in any T -day's long interval, calculated with the MOED (green solid line), Weibull (blue dashed line) and Exponential (red dotted line) distributions. Diamonds represent the observed data.

The probabilities calculated with the different distributions show some significant differences, requiring selection criteria to choose the best model. We use two criteria evaluating different characteristics of the distributions. One is the Akaike Information Criterion (AIC) (Akaike, 1974), which provides an objective statistical identification of the model that rewards goodness of fit but penalizes larger numbers of estimated parameters.

$$AIC = -2p + 2\log L,$$

where p is the number of parameters and $\log L$ the log likelihood. The model with the lowest information loss between truth and model would have a low AIC (Akaike, 1973,

1974; Marzocchi and Bebbington, 2012; Bebbington, 2007; Turner et al., 2008; Dzierma and Wehrmann, 2010, Mendoza-Rosas and De la Cruz-Reyna, 2010).

The AIC is calculated as

$$AIC = n * \ln \frac{\sum (y_i^* - y_i)^2}{n} + 2k$$

where n is the number of data points, k the number of free parameters, and y_i^* are the points of the model used to fit the data points y_i , if all the models in the set assume normally distributed errors with a constant variance.

If n is small, the following correction is needed (Burnham and Anderson, 1998),

$$AIC_c = AIC + \frac{2k(k+1)}{n-k-1}$$

(5)

Since the AIC is not a goodness-of-fit test, it is necessary to obtain an independent measure of the quality of fit between the observed data and the distribution expectations. For that, we use the Kolmogorov-Smirnov (K-S) criterion, which is a nonparametric test (Gibbons, 1976) appropriate for small samples that uses the maximum distance between the model and the data.

Applying the K-S and the AICc tests to the probabilities resulting from the different distributions in Table 3, we obtain the results listed in Table 4

The K-S critical value at the significance level 0.1 to reject any of the distributions is 0.1979, and all of them would be acceptable under this criterion. The lowest AICc is for the Weibull distribution, while the exponential and MOED yield similar AICc values. However, in the goodness of fit the MOED performs best.

In spite of its relatively high AICc value, we would recommend the MOED when regimes with well-defined rates can be identified in a non-stationary cumulative series of events, as in the present case, in which the distribution parameters are not adjusted to fit, but are a direct representation of the observed regimes' rates, making it more precise and easier to apply than the Weibull distribution (Mendoza-Rosas and De la Cruz-Reyna, 2009).

This analysis may be helpful to detect possible departures from the behavior that the volcano has been showing during the last two decades, and that may be considered as "normal" in the current episode. Inspection of Table 3 and figure 4 indicates that the absence of a new emplacement after about 29 months (which would correspond to a time between emplacements with a 5% probability of occurring, as calculated with the MOED) is a rather unlikely condition that may be indicative of a possible change in the state of the volcano. However, evaluating such a condition in real time during an ongoing lava dome eruption, and telling apart a change of regime from a departure of "normality" involving the possibility of major eruptions is not a simple matter in practice. Mulargia (1987) and Ho (1992) have addressed the problem of regime identification in connection with the eruptive history of Etna volcano developing a method that requires redoing the analysis from scratch, or at least from the last change point under the assumption that the eruption sequence develops under a statistical process control in which the patterns of variability remains the same (Ho, 1992). In a real-time situation, as is the case of the ongoing Popocatepetl lava dome eruption an assessment based on the above-mentioned condition of "normality" must be done at the time in which a new lava dome emplacement is detected to assist decision-making. Therefore, the abovementioned criterion for a possible change in the state of the volcano (and not necessarily a change of regime) that may be indicative of a potentially destructive type of eruption should be under the scrutiny of the scientific team monitoring the volcano. It is only after such episode ends that the analysis can be redone, which in our case involves recalculating the component of the MOED corresponding to the ongoing regime, and identifying a change in regime may require analyzing further emplacements. In the final discussion section we examine this issue in further detail.

THE RESIDENCE TIME OF LAVA DOMES AND THE LULL TIMES TO NEXT EMPLACEMENT

In addition to the times of emplacement, the analysis of two other sequences may provide additional insight into the sustained eruptive process at Popocatepetl. These are the dome residence times (time between the date of emplacement and main destruction event), and the duration of the lava effusion lulls (time in which no evidence of magma emission exists between the main dome-destruction event and the emplacement of the next lava dome). A difficulty with those interval series derives from the uncertainty in the identification of the main destruction events. Domes are destroyed by a series of explosions sometimes extending over considerable periods of time. Using the times of the strongest explosions, as described by Gómez-Vázquez et al. (2016) our estimates of the residence and lull times have been included in Table 1.

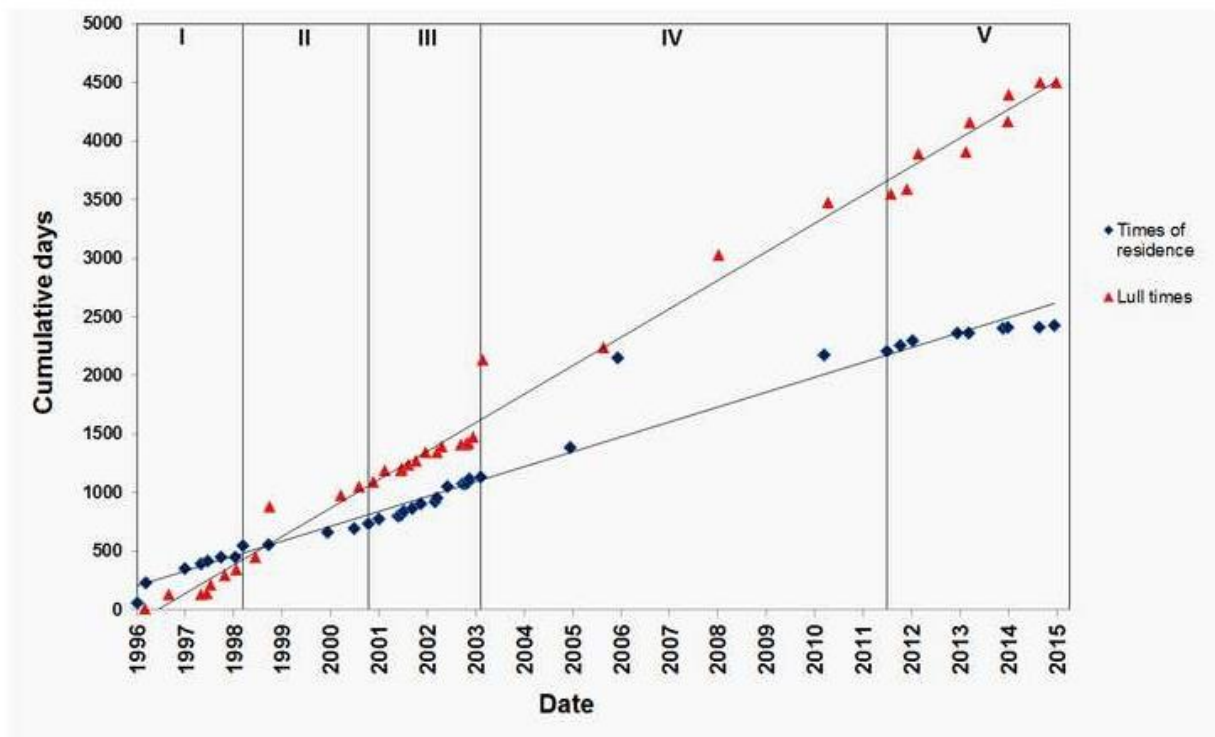


Fig. 5. Cumulative dome residence times (time period in days between a dome emplacement and the successive main destruction event) and cumulative lull times (time between main destruction event and next lava dome emplacement). The symbols are set in the

corresponding dome emplacement dates and main destruction event date respectively. The vertical lines represent the five different regimes proposed by Gómez-Vázquez et al. (2016).

The behavior of the residence and lull time sequences depart from that of the dome emplacements and time between emplacements discussed in a previous section. To illustrate this, we drew in Fig. 5 the cumulative plots of the residence and lull times over the regimes defined by the dome emplacement series proposed by Gómez-Vázquez et al. (2016). The inspection of the plot reveals two distinctive features: Firstly, both the cumulative residence and lull times show clear linear trends, with an almost constant slope uncorrelated with the regimes, with the exception of regime IV in which the data show a large dispersion. Secondly, the cumulative lines of the residence and lull times show different slopes, 0.348 and 0.664, both with high linear coefficients of determination (0.970 and 0.992 respectively). The residence times have a mean of 64 days, with standard deviation 127, while the lull times have a mean of 122 and standard deviation of 184 days. The correlation between the residence and lull times is poor (0.528), while the times between emplacements correlate well with the lulls (0.918).

The probabilities of a residence time and the lull time not exceeding a time T (days) have been estimated with the cumulative exponential distribution (Eq. 1) using the global mean residence and lull times, and are listed in Table 5

Table 5. Cumulative exponential probabilities of a residence or a lull time not exceeding a time T (days).

Table 5

| <i>T (Days)</i> | <i>Residence time exceeding T</i> | <i>Lull time exceeding T</i> |
|-----------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 30 | 0.3749 | 0.2184 |
| 60 | 0.6093 | 0.3891 |
| 90 | 0.7558 | 0.5225 |
| 120 | 0.8474 | 0.6268 |
| 150 | 0.9046 | 0.7083 |
| 180 | 0.9404 | 0.7720 |
| 210 | 0.9627 | 0.8218 |
| 240 | 0.9767 | 0.8607 |
| 270 | 0.9854 | 0.8911 |
| 300 | 0.9909 | 0.9149 |
| 330 | 0.9943 | 0.9335 |
| 360 | 0.9964 | 0.9480 |
| 390 | 0.9978 | 0.9594 |
| 420 | 0.9986 | 0.9682 |

Gómez-Vázquez et al. (2016) estimated the lava extrusion rate of the growing domes as the ratio of the maximum emplaced volume to the duration of LP, tremor or any seismic signals related to lava extrusion. We tried to find correlations of the dome volumes and lava dome extrusion rates with the parameters discussed in this section, only finding null or weak negative correlation coefficients, summarized in Table 6.

*Table 6. Correlations among different parameters of the lava dome emplacement process***Table 6**

| | Time between emplacements | Residence times | Lull times |
|--------------------------------|---------------------------|-----------------|------------|
| Dome volume | -0.086 | 0.071 | -0.133 |
| Estimated lava extrusion rates | -0.319 | -0.079 | -0.417 |

All of this suggests that the processes controlling the residence and lull times have other contributions in addition to the processes controlling the dome emplacements. We leave the discussion of this issue for the following sections

THE DISTRIBUTION OF DOME THICKNESSES AND VOLUMES

In the previous sections we have discussed the statistical aspects of the lava dome emplacement and permanence sequences in the time domain. We now address some statistical features of the lava domes in a different realm: the eruptive magnitude or size which is characterized by the thickness and volume of the domes and is used as a parameter that directly reflects the underlying physical process controlling the lava dome emplacements. Gómez-Vázquez et al. (2016) suggested that the volumes of the domes are distributed in such a way that the number of emplaced domes is inversely proportional to their volumes, according to an exponential survival function. Indeed, if V_m is the mean volume of all of the emplaced domes (1.07 million cubic meters, in the present case), then the cumulative frequency of the number of domes N_c exceeding a volume V_c , may be fit to the function:

$$N_c = N_d \exp(-V_c/V_m) \quad (6)$$

,

Here N_d is the total number of emplacements (38, in the present case). Figure 6a shows the observed lava dome volume values and the exponential distribution calculated with the mean volume V_m . The error bars reflect the errors derived from the estimation of the dome volumes, as explained in Gomez-Vázquez et al. (2016).

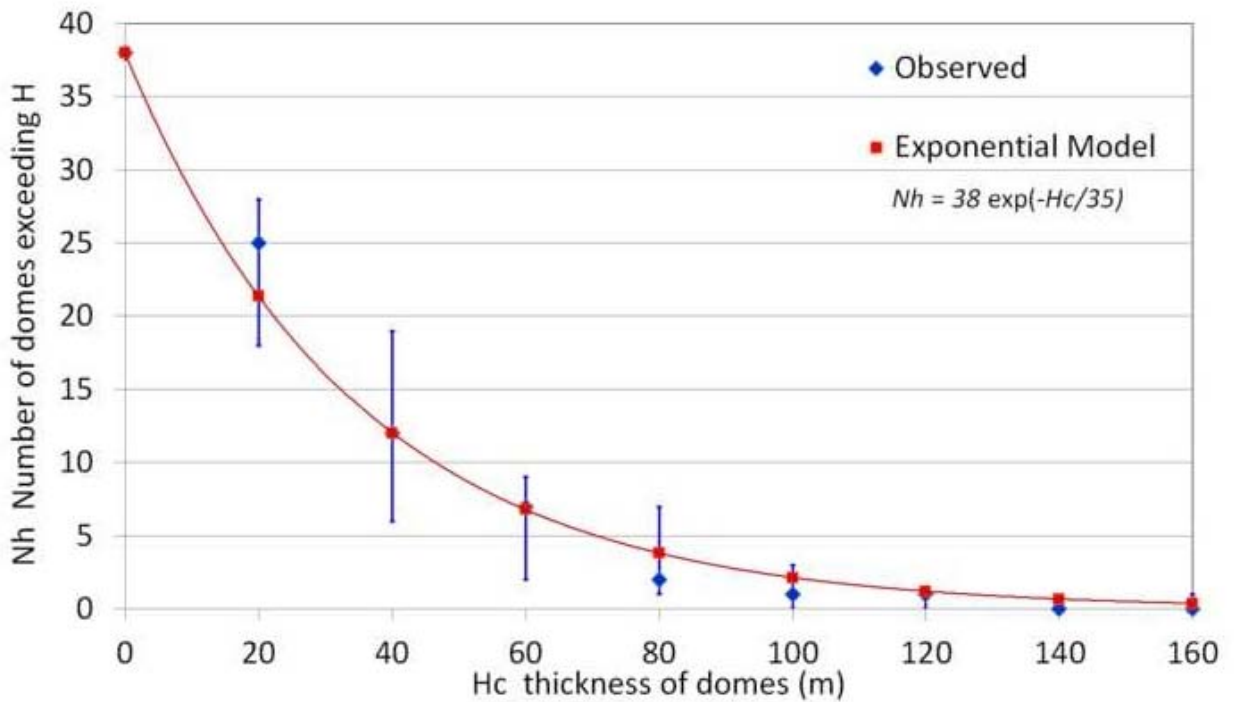
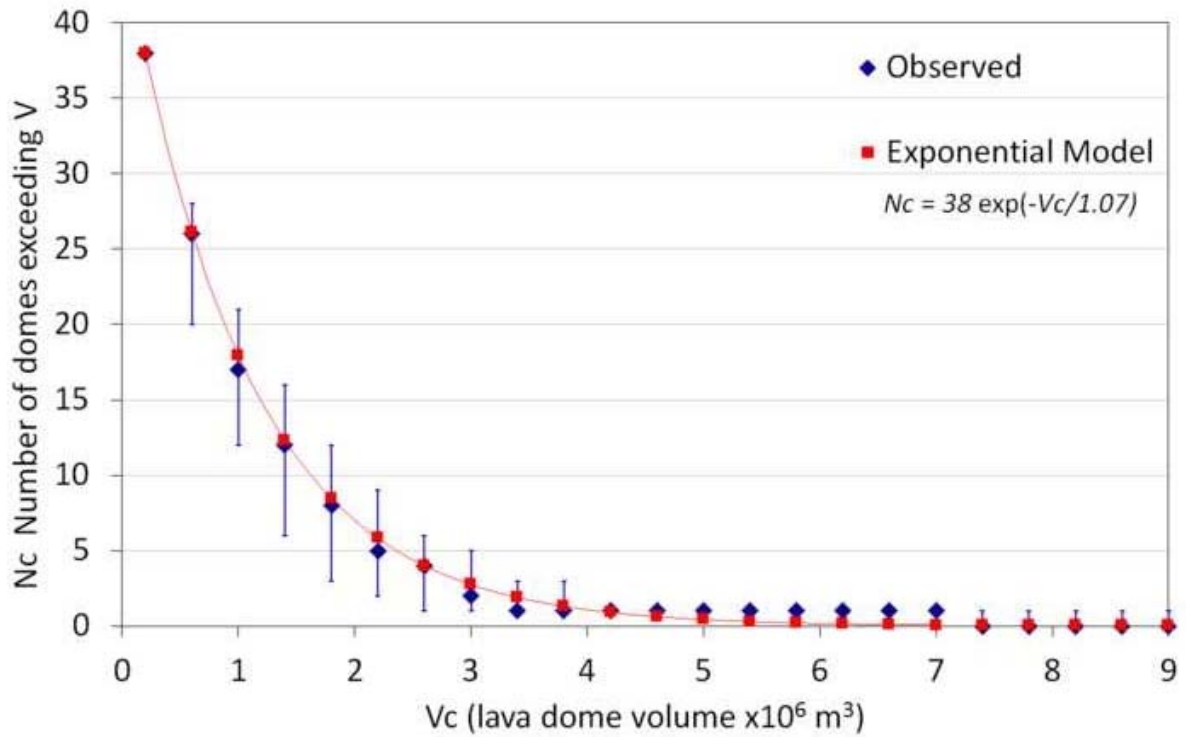


Fig. 6. (a) Top. Distribution of the number of lava domes exceeding a volume V_c ($\times 10^6 m^3$). (b) Below Distribution of the number of lava domes exceeding a thickness H_c (m).

Similarly, we have tested the distribution of dome thicknesses (vertical dimension of each of the emplaced domes) and arrive at the same conclusion: the cumulative frequency of the number of domes Nh exceeding a thickness Hc , fits well the exponential function (Fig. 6b)

$$Nh = Nd \exp(-Hc/Hm) \quad (7)$$

where Nd is the total number of emplacements (38 to 2015), Hc is the estimated dome thickness (Table 1), and Hm is the mean value (35 m) of the thicknesses.

HAZARD CONSIDERATIONS DERIVED FROM THE EXPONENTIAL DISTRIBUTION OF DOME VOLUMES AND THICKNESSES

In Gómez-Vázquez et al. (2016), we briefly discussed our interpretation of the underlying physical process causing Popocatépetl's sustained eruptive episode, and how it is related to the distribution of lava dome volumes and thicknesses. This type of cyclic lava dome eruptions seems to be very sensitive to small changes in the parameters that govern the magma flow (Barmin et al. 2002). In the present case, we believe that one of the key parameters controlling the maximum values of the domes' dimensions is the variable buoyancy force caused by the density differences between the volatile-rich magma and the country rock. This force drives the column of magma up when the volatile content exceeds a certain concentration and ceases, or even reverses, when it is below it. The episodic character of the magma ascent causing the lava dome emplacements, and the distribution of their sizes may thus be a consequence of a self-regulating process controlled by the intense degassing of the magma (González-Mellado and De la Cruz-Reyna 2008; Taisne and Jaupart 2008). Indeed, since the commencement of the current eruption, Popocatépetl has been passively degassing very large quantities of volcanic gases, which is paradoxically associated with a relatively low magma output (Witter et al. 2005). Average SO_2 fluxes

have typically been about 5000 t/d, and total SO₂ emissions have been considerably higher during effusive periods (e.g., in January 1997 and between September and December 1998, the flux reached as much as 40,000–50,000 t/d; Delgado-Granados et al. 2001; Wright et al. 2002). Whichever the mechanism explaining the voluminous degassing (conduit convection, Witter et al. 2005; conduit permeability, Cross et al. 2012), when volatile-rich magma is sufficiently buoyant, the magma column ascends, thereby causing an episode of dome growth to a new level of isostatic equilibrium between the weight and the buoyancy of the magma column (González-Mellado and De la Cruz-Reyna 2008; Taisne and Jaupart 2008).

The cyclic dome emplacement and destruction process and the dome volume and thickness distributions at Popocatépetl may thus be envisioned in terms of a simplified model, in which the dimensions of the emplaced domes are mostly controlled by two variable parameters: namely the magma's volatiles content and its capacity to release it. The thicknesses and volumes are both scaled according to an exponential law that reflects the way in which energy is released by each dome emplacement. When the volatile content produces a buoyancy force that works against gravity and frictional forces, it releases an amount of gravitational energy proportional to the height and volume of each of the domes (González-Mellado and De la Cruz-Reyna 2008; Taisne and Jaupart 2008), since, in a laterally-confining crater as is the case of Popocatépetl, the volume depends on the dome thickness. That energy is limited, since buoyancy is restrained by the volatile content in the magmatic column, making the growth of large domes less likely. We would thus expect the exponential scaling law to hold as long as the amount of available energy is only sufficient to maintain a self-regulating cyclic process of dome emplacement and destruction. In such a case the height of the domes would not generate an excessive buoyancy overpressure in the magmatic system, and the effusive activity may continue indefinitely without exceeding a relatively low level of dome-destruction explosivity provided that the volume or the thickness of the domes do not exceed the capacity of the crater to contain the accumulated material left behind by the successive episodes of emplacement.

To help assess the hazards related to the dome emplacement process, we constructed Table 7 in which we list the probabilities calculated using the exponential distributions (Eq. 6 and 7) of a dome exceeding a volume V_c (in millions of cubic meters) or a thickness H_c (in meters).

Table 7. Exponentially distributed probabilities of a lava dome exceeding a volume V_c (in millions of cubic meters, and a thickness H_c (in meters).

Table 7

| V_c (millions of cubic meters) | Probabilities of a lava dome exceeding V_c , (from the exponential survival function) | H_c (thickness of domes, meters) | Probabilities of a lava dome exceeding H_c , (from the exponential survival function) |
|----------------------------------|---|------------------------------------|---|
| 0 | 1.0000 | 0 | 1.0000 |
| 0.8 | 0.4721 | 20 | 0.5628 |
| 1.6 | 0.2229 | 40 | 0.3167 |
| 2.4 | 0.1053 | 60 | 0.1782 |
| 3.2 | 0.0497 | 80 | 0.1003 |
| 4 | 0.0235 | 100 | 0.0565 |
| 4.8 | 0.0111 | 120 | 0.0318 |
| 5.6 | 0.0052 | 140 | 0.0179 |
| 6.4 | 0.0025 | 160 | 0.0101 |
| 7.2 | 0.0012 | 180 | 0.0057 |

Therefore, a significant departure from the exponential distribution may indicate a different driving mechanism, and thus a different hazard condition. Table 7 indicates that there is a 95% probability that a dome does not exceeds a volume of about 3.2 million cubic meters or exceeds a thickness of about 100 m. If future domes exceeds these expectations it is likely that the nature of the eruption is changing. In such cases, apart from the possibility of fresh lava overflowing the brim, the overpressure beneath the dome may cause a stronger explosion, thereby clearing a larger volume of the conduit content, which may possibly lead to a sudden depressurization and destabilization of the whole magmatic system.

DOMES VOLUME EXCEEDANCES IN SPECIFIC TIME INTERVALS

Next, we estimate the likelihood of a dome exceeding a specified volume in a given time interval using the non-homogeneous generalized Pareto–Poisson process (NHPPP) (Pickands 1971; Smith 1989; Davison and Smith 1990; Coles 2001; Reiss and Thomas 2001; Mendoza-Rosas and De la Cruz-Reyna 2008, 2010; De la Cruz-Reyna and Mendoza-Rosas 2015). The NHPPP has two components: (i) the observed number of exceedances of

the volume above a threshold u (i.e., the occurrence of $V_i > u$), which may be described as a Poisson process and (ii), the volume excesses over the threshold u (i.e., the extent to which a volume exceeds u , $V_i - u$) which may be described by a generalized Pareto distribution (GPD) with shape parameter β , scale parameter θ , and location parameter u :

$$\begin{aligned} G_{\beta,\theta}(y) &= 1 - \left(1 - \frac{\beta y}{\theta}\right)^{1/\beta} && \text{for } \beta \neq 0 \\ G_{\beta,\theta}(y) &= 1 - e^{-y/\theta} && \text{for } \beta = 0, \end{aligned} \quad (8),$$

where $y = V - u$ is a realization of the process.

In the case of lava domes, the lava volume and the number of times a given volume is exceeded within a time interval are viewed as points in a two-dimensional space (volume - time). The intensity measure of this two-dimensional Poisson process on $B = [t_1, t_2] \times [u, \infty)$ is (Bradson and Palutikov 2000; Lin 2003):

$$\Lambda(B) = \frac{N_u}{T} \left[1 - \frac{\beta(V - u)}{\theta}\right]^{1/\beta} \quad (9),$$

where N_u is the number of exceedances over a threshold u in a period T .

The probabilities that at least one dome exceeding a given volume is emplaced in a certain time interval, calculated using the NHPPP, are listed in Table 8. The shape (β) and scale (θ) parameters used here are, -0.182 and 0.788, respectively, and calculated using a graphic method (McNeil and Saladin 1997; Martínez 2003; Lin 2003; Mendoza-Rosas and De la Cruz-Reyna 2008). Here, we choose to use u , the mean of the dome volumes ($\sim 10^6 \text{ m}^3$), as the threshold.

Table 8. Probabilities of at least one dome exceeding a volume V over different time periods. The probabilities were calculated using the NHPPP.

Table 8

| Days | V > 2 x10 ⁶ m ³ | V > 3 x10 ⁶ m ³ | V > 4 x10 ⁶ m ³ | V > 5 x10 ⁶ m ³ | V > 6 x10 ⁶ m ³ |
|------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 180 | 0.1013 | 0.0402 | 0.0180 | 0.0089 | 0.0048 |
| 360 | 0.1923 | 0.0788 | 0.0357 | 0.0177 | 0.0095 |
| 730 | 0.3515 | 0.1533 | 0.0711 | 0.0356 | 0.0192 |
| 1825 | 0.6613 | 0.3404 | 0.1683 | 0.0867 | 0.0473 |
| 7300 | 0.9868 | 0.8107 | 0.5216 | 0.3043 | 0.1761 |

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Popocatépetl's activity in the historical time scale has been characterized by preponderantly effusive episodes that are similar to that which began in 1994 and is ongoing. Available accounts (De la Cruz-Reyna et al. 1995; De la Cruz-Reyna and Tilling 2008) suggest that several of these eruptions were decades-long successions of dome emplacement and destruction episodes, placing the current one within the range of the durations of previous historical episodes and increasing the probability that the current activity may persist for an undetermined amount of time. However, the Popocatépetl eruptive record on a longer time scale shows that major explosive eruptions, including Plinian phases have occurred in the Holocene with a mean return period of about 1500 years (Siebe et al. 1996; Mendoza-Rosas and De la Cruz-Reyna 2008; Siebe et al., 2017).

Therefore, the future activity of Popocatépetl volcano may cover a wide range of scenarios, ranging from a continuance of the cyclic lava dome emplacement to the possibility that the following eruptions could acquire a more explosive character that might include Plinian phases. The global statistical analysis on the association of lava dome eruptions with major explosive activity of Ogburn et al. (2015) shows that large explosions most commonly occurred before the dome growth episodes. However, major explosive activity during or after lava dome eruptions also occurred in about 20% of the cases, and considering that the last Plinian phase of Popocatépetl took place about 1100 y BP, the current lava dome eruption may not be regarded as a post-explosive episode. Although no attempt is made here to assign probabilities to such scenarios, the statistical analysis of the ongoing episode may at least allow for the setting of some criteria in order to recognize an alteration or a

trend in the succession of lava dome emplacements that may be indicative of a change in the nature of the process. Such criteria derive from the features of the statistical distributions describing the domes' dimensions, the dome residence times and the likelihood of the domes exceeding a specified volume in a given time interval. Inspection of Fig. 1 and Table 3 suggests that during the 20-year long dome emplacement and destruction activity the times between emplacements vary, particularly between regimes. However, the statistic reveals that a time between emplacements exceeding about 29 months should attract the attention of scientists observing the volcano, as it may be caused by either a normal fluctuation in the process or by a change in its nature.

Similar conclusions may be drawn from an inspection of Table 5. The probability of a dome remaining for more than about six months, or a lull time exceeding about one year is less than 5%, and such condition may reflect a change in the rate of magma ascent, as apparently occurred in the cases of domes 27, 28 and 29. At that time (2005-2010), such a condition was interpreted as a possible signal of the end of the eruptive episode, but also of an increased likelihood of subsequently stronger explosions caused by “clogging” of the conduit. This and the large dispersion of the residence and lull times during the fourth regime may be attributed to a loss in the balance between the magma ascent rate and the syn-eruptive crystallization, which are driven by decompression and volatile exsolution during that low dome eruption rate period. A water-bearing melt that is decompressed isothermally during its ascent must crystallize in response to the diminishing capacity of the melt to retain volatiles. Therefore, only a relatively rapid ascent allows magma to reach the Earth's surface without completely crystallizing (Cashman and Blundy 2000, Calder et al. 2015). A low magma ascent rate may be an indicator of a lower volatile content and a high crystallization rate that may cause “anomalously” long residence and lull times. Domes 26 to 29 belong to a regime with the lowest long-term average magma extrusion rate (Table 2 in Gómez-Vázquez et al. 2016). Another feature of the process that becomes evident in Fig. 5 is the difference in slopes of the residence and lull times cumulative plots. This indicates that in the early stage of the lava dome eruption the residence times tend to be longer than the lull times, a condition that gradually has reversed along the eruptive episode.

An even more interesting criterion can be derived from the inspection of Fig. 6 and Tables 7 and 8, since the exceedances of the volumes and thicknesses of the domes are indicators of an increased hazard in two regards. One is the evidently hazardous situation derived from Popocatépetl volcano's main crater's reduced volumetric capacity, which is currently estimated to be about 21 million cubic meters (Fig. 12 in Gomez-Vazquez et al. 2016), with a hydraulic depth of about 140 m. The emplacement of domes significantly larger than those previously observed may lead to a rapid filling of the crater, and a possible overflow of the dome causing lava flows and dome-collapse pyroclastic flows. The other is related to the scaling nature of Equations 6 and 7 that reveal an underlying physical process controlling the size distribution of the domes. The persistent appearance of domes that significantly exceed the abovementioned restraints of about 3.2 million cubic meters or a thickness of about 100 m, would be an indicator of a departure from the self-regulating condition that has apparently been governing the eruptive activity for the duration of the episode, and possibly for the last 1100 years.

Developing the real-time capability to discern between changes of regime in an eruptive process occurring at variable rates but with stable patterns of variability, and alterations in the internal state of the volcano that may lead to hazardous eruptions is a challenging path for future work.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank both anonymous reviewers, and the Associated Editor Dr. J. Fierstein for their constructive comments and suggestions. We thank DGAPA-PAPIIT-UNAM (project IN-106312) for research support. A.T.M-R gratefully acknowledges support from the European Commission (Project VUELCO, grant 282759), and A. G-V. thanks CONACYT for the scholarship 230925.

REFERENCES

Akaike H (1973) Information Theory as an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In: Petrov BN and Csaki F (eds) Second International Symposium on Information Theory, Budapest, Akademiai Kiado, 267-281

Akaike H (1974) A New Look at the Statistical Model Identification. IEEE Transactions on Automatic Control AC-19:716-723.

Barmin A, Melnik O, Sparks RSJ (2002) Periodic behavior in lava dome eruptions. Earth Planet Sci Lett 6184:1-12. Doi: 10.1016/S0012-821X(02)00557-5

Boudal C, Robin C (1989) Volcán Popocatépetl: recent eruptive history, and potential hazards and risks in future eruptions. In: Latter JH (ed) Volcanic hazards, IAVCEI Proc Volcanol, Springer, Berlin, pp 110–128

Bebbington MS (2007) Identifying volcanic regimes using Hidden Markov Models. Geophys J Int, 171:921–942. Doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03559.x

Bebbington MS, Lai CD (1996a) On nonhomogeneous models for volcanic eruptions. Math Geol, 28:585-600

Bebbington MS, Lai CD (1996b) Statistical analysis of New Zealand volcanic occurrence data. J Volcanol Geotherm Res 74: 101-110

Bradson BB, Palutikov JP (2000) Test of the Generalized Pareto Distribution for Predicting Extreme Wind Speeds. J Appl Meteor 39:1627-1640

Burnham KP, Anderson DR, (1998) Model selection and inference: a practical information-theoretic approach. Springer-Verlag, New York, New York, USA, pp 353

Calder ES, Lavallée Y, Kendrick JE, Bernstein M (2015) Lava dome eruptions. In: Sigurdsson H, Houghton B, Rymer H, Stix J, McNutt S (eds) Encyclopedia of volcanoes, 2nd Ed. Academic Press, San Diego

Capra L, Macías JL, Scott KM, Abrams M, Garduño-Monroy VH (2002) Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, México – Behavior, and implication for hazard assessment. *J Volcanol Geotherm Res* 113 (1-2): 81-110

Cashman K, Blundy J (2000) Degassing and crystallization of ascending andesite and dacite. *Phil Trans R Soc Lond A* 358: 1487-1513. Doi: 10.1098/rsta.2000.0600

Coles S (2001) An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlang, London

Cox DR, Lewis PAW (1966) The Statistical Analysis of Series of Events, Methuen and Co., London

Cox DR (1970) Renewal Theory. Methuen & Co., London

Cox, DR, Isham V (1980). Point processes. Chapman and Hall, London

Cross JK, Roberge J, Jerram DA (2012) Constraining the degassing processes of Popocatepetl Volcano, Mexico: A vesicle size distribution and glass geochemistry study. *J Volcanol Geotherm Res* 225-226: 81-95.

Davison AC, Smith RL (1990). Models for exceedances over high thresholds. *J R Stat Soc* , 52 (B): 393–442.

De la Cruz-Reyna S, Quezada JL, Peña C, Zepeda O, Sánchez T (1995) Historia de la actividad del Popocatépetl (1354-1995). In: Volcán Popocatépetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995. CENAPRED-UNAM, México, D.F, pp 3-22.

De la Cruz-Reyna S, Siebe C (1997) The giant Popocatepetl stirs. *Nature* 388 (6639): 227

De la Cruz-Reyna S, Tilling R (2008) Scientific and Public Responses to the Ongoing Volcanic Crisis at Popocatépetl Volcano, México: Importance of an Effective Hazards Warning System. *J Volcanol Geotherm Res* 170: 121-134.

De la Cruz-Reyna S, Mendoza-Rosas A T (2015) An Extreme Event Approach to Volcanic Hazard Assessment. In: Chavez M, Ghil M, Urrutia-Fucugauchi J (eds) *Extreme Events: Observations, Modeling, and Economics*, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ. Doi: 10.1002/9781119157052.ch15

De la Cruz-Reyna S, Tilling R, Valdés-González C (2016) Challenges in responding to a sustained, continuing volcanic crisis: the case of Popocatepétl volcano, Mexico, 1994-present. In: Bird D, Jolly G, Haynes K, McGuire B, Fearnley C (Eds) *Volcanic Crisis Communication - Observing the Volcano World*. *Advances in Volcanology series*, Springer-Verlag (in press).

Delgado-Granados H, Cárdenas-González L, Piedad-Sánchez N (2001) Sulfur dioxide emissions from Popocatépetl volcano (Mexico): case study of a high emission rate, passively degassing eruptive volcano. *J Volcanol Geotherm Res* 108: 107–120

Dzierma Y, Wehrmann H (2010) Eruption time series statistically examined: Probabilities of future eruptions at Villarrica and Llaima Volcanoes, Southern Volcanic Zone, Chile. *J Volcanol Geotherm Res* 193:82–92

Ferrás GS (2003) Probabilistic prediction of the next large earthquake in the Michoacán fault – segment of the Mexican Subduction Zone. *Geofis Int* 42:69-81

Gómez-Vázquez A, De la Cruz-Reyna S, Mendoza-Rosas AT (2016) The ongoing dome emplacement and destruction cyclic process at Popocatepetl volcano, central Mexico. *Bull Volcanol* 78:58. Doi: 10.1007/s00445-016-1054-z

Gibbons JP (1976) *Nonparametric Methods for quantitative Analysis*, Holt, Rinehart and Winston, New York, USA

González-Mellado A, De la Cruz-Reyna S (2008) A simplified equation of state for the density of silicate hydrous magmas: An application to the Popocatepetl buoyancy-driven dome growth process. *J Volcanol Geotherm Res* 171: 287-300

Ho C-H. (1992) Statistical control chart for regime identification in volcanic time series. *Mathematical Geology* 24(7): 775-787

Johnson NL (1966) Cumulative sum control charts and the Weibull distribution. *Technometrics* 8:481–491

Klein F W (1982) Patterns of Historical eruptions at Hawaiian Volcanoes. *J Volcanol Geotherm Res* 12:1–35

Lin XG (2003) Statistical modelling of severe wind gust. In: *International Congress on Modelling and Simulation*, Townsville, 14-17 July. 2, 620-5.

Macías JL (2007) Geology and eruptive history of some active volcanoes of México. In Alaniz-Álvarez SA, and Nieto-Samaniego AF eds, *Geology of México*. *Geol Soc Am Sp Paper* 422: 183–232 doi: 10.1130/2007.2422(06).

Martínez PA (2003) Un Modelo Estadístico para Valores Extremos en Series de datos Actuariales. Universidad Nacional Autónoma de México

Marzocchi W, Bebbington MS (2012) Probabilistic eruption forecasting at short and long time scales. *Bull Volcanol* 74: 1777-1805.

McNeil AJ, Saladin T (1997) The peaks over thresholds method for estimating high quantiles of loss distributions. *Colloquium 28th International ASTIN Bulletin*. Web. <http://www.ma.hw.ac.uk/~mcneil/ftp/cairns.pdf> . Accessed 13 June 2016

Mendoza-Rosas AT, 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. *J Volcanol Geotherm Res* 176:277–290

Mendoza-Rosas AT, De la Cruz-Reyna S (2009) A mixture of exponentials distribution for simple and precise assessment of the volcanic hazard. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9:425–431.

Mendoza-Rosas AT, De la Cruz-Reyna S (2010). Hazard estimates for El Chichón volcano, Chiapas, Mexico: a statistical approach for complex eruptive histories. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:1159–1170

Mulargia F, Gasperini P, Tinti S. (1987) Identifying different regimes in eruptive activity: An application to Etna volcano. *J Volcanol Geotherm Res* 34:89–106

Ogburn SE, Loughlin SC, Calder ES (2015) The association of lava dome growth with major explosive activity ($VEI \geq 4$): DomeHaz, a global dataset. *Bull Volcanol* 77:40. Doi: 10.1007/s00445-015-0919-x

Pickands J (1971) The two dimensional Poisson process and extremal processes. *J Appl Probab* 8:745–756

Reiss RD, Thomas M (2001) *Statistical Analysis of Extreme Values*. 2nd ed. Birkhauser, Basel.

Robin C, Boudal C (1987) A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern volcano Popocatépetl. *J Volcanol Geotherm Res* 31:115–130

Siebe C, Abrams M, Macías JL (1995) Derrumbes Gigantes, Depósitos de Avalancha de Escombros y Edad del Actual Cono del Volcán Popocatépetl. In: *Volcán Popocatépetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*, CENAPRED-UNAM, México, D.F, pp 195-220.

Siebe C, Abrams M, Macías JL, Obenholzner J (1996) Repeated volcanic disasters in pre-Hispanic time at Popocatépetl, Central Mexico. Past key to the future?. *Geology* 24:399–402.

Siebe C, Macías JL (2006). Volcanic hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatépetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoess and monogenetic scoria cones in the Sierra de Chichinautzin volcanic field. *Geol S Am S* 402: 253-329. Doi: 10.1130/2004.VHITMC.PFG

Siebe C, Salinas S, Arana-Salinas L, Macías JL, Gardner J, Bonasia R (2017). The ~23,500y 14C BP White Pumice Plinian eruption and associated debris avalanche and Tochimilco lava flow of Popocatépetl volcano, México. *J Volcanol Geotherm Res*. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2017.01.011

Smith RL (1989) Extreme value analysis of environmental time series: an application to trend detection in ground-level ozone (with discussion). *Stat Sci* 4:367–393

Taisne B, Jaupart C (2008) Magma degassing and intermittent lava dome growth. *Geophys Res Lett* 35: L20310. Doi:10.1029/2008GL035432

Turner, M.B., Cronin, S.J., Bebbington, M.S, Platz, T., 2008. Developing probabilistic eruption forecasts for dormant volcanoes: a case study from Mt Taranaki, New Zealand. *Bull. Volcanol.* 70: 507–515. Doi: 10.1007/s00445-007-0151-4.

Yang ZL, Xie M (2003) Efficient estimation of the Weibull shape parameter based on a modified profile likelihood. *J Stat Comput Simul* 73:115-123

Wehrmann H, Dzierma Y (2011) Applicability of statistical eruption analysis to the geological record of Villarrica and Lanín volcanoes, Southern Volcanic Zone, Chile. *J Volcanol Geoth Res* 200:99–115

Witter JB, Kress VC, Newhall CG (2005) Volcán Popocatépetl, Mexico. Petrology, Magma Mixing, and Immediate Sources of Volatiles for the 1994–Present Eruption. *J petrology* 46(11): 2337–2366. Doi:10.1093/petrology/egi058

Wolpert RL, Ogburn SE, Calder ES (2016). The longevity of lava dome eruptions. *J Geophys Res Solid Earth*, 121, 676–686. Doi:10.1002/2015JB012435

Wright R, De La Cruz-Reyna S, Harris A, Flynn L, Gomez-Palacios JJ (2002) Infrared satellite monitoring at Popocatepétl: explosions, exhalations, and cycles of dome growth. *J Geophys Res* 107:2–16