

**SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

ACTIVIDAD DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

2017

Subdirección de Riesgos Volcánicos
Dirección de Investigación

Gema Victoria Caballero Jiménez
Amiel Nieto Torres
Ramón Espinasa Pereña
Elizabeth Castañeda Bastida
Ariadna Hernández Oscoy
Adriana Ramírez Castillo
Lilia Calva Rodríguez

CONTENIDO

Resumen

Actividad sísmica

Eventos de periodo largo (exhalaciones, explosiones, trenes de exhalaciones) y tremor

Sismos volcanotectónicos

Anomalías térmicas

Monitoreo de gases

Monitoreo hidrogeoquímico

Análisis de lixiviados de cenizas

Diagnóstico

RESUMEN

A lo largo de 2017 se registraron 24,719 exhalaciones, 34,392 pulgas, 962 explosiones, 882 sismos volcanotectónicos y 295.12 horas de tremor. Esta actividad sísmica estuvo asociada al emplazamiento y destrucción de cinco domos. Los sistemas MODVOLC y MIROVA emitieron, durante 2017, 253 reportes de anomalías térmicas en el cráter del Popocatepetl; las más importantes estuvieron asociadas al emplazamiento de los distintos domos de lava que se formaron a lo largo de este año, en particular durante abril y mayo, cuando se formó el domo de lava número 73. Algunas veces las anomalías térmicas estuvieron asociadas a eventos explosivos. El valor NTI más importante del 2017 corresponde al 17 de noviembre, con un NTI de -0.34, justo al momento de una de las explosiones más importantes del año. La tasa de emisión de SO₂, medida por el sistema OMI, denotó a lo largo del año tres periodos de mayor emisión: entre enero y febrero, abril y mayo y octubre a diciembre, con periodos de reposo entre ellos. A lo largo de este año se realizaron tres campañas para la medición de gases con COSPEC, los resultados obtenidos tienen una buena relación con las mediciones hechas a partir del OMI; el mayor valor obtenido con COSPEC se presentó también durante el emplazamiento del domo 73. El 13 de mayo la tasa de emisión de SO₂ fue de 10,000 ton/día. En marzo se encontró boro en el manantial Agrícola, en una concentración de 0.33 mg/l; este incremento pudo haber estado asociado al registro de tremor observado a partir de mayo, que culminó en la formación del domo 73.

ACTIVIDAD SÍSMICA

El año 2017 se caracterizó, sísmicamente, por la ocurrencia de señales sísmicas asociadas con el movimiento de fluidos (LP y tremor), así como por el registro de eventos asociados al fracturamiento de roca (sismos volcanotectónicos, VT). Se observó un incremento en el registro de eventos sísmicos respecto del año anterior (Tabla 1, Figura 1).

Tabla 1. Resumen de la sismicidad del volcán Popocatépetl durante 2017					
Mes	Exhalaciones	<i>Pulgas</i>	Explosiones	VT	Tremor (horas)
Enero	319	417	24	39	1.88
Febrero	1,651	1,637	7	64	1.56
Marzo	1,577	2,005	7	29	5.40
Abril	1,241	892	188	40	11.72
Mayo	989	1,037	277	58	16.18
Junio	1,882	1,648	180	79	25.54
Julio	1,126	1,577	70	42	2.65
Agosto	4,564	3,925	70	27	44.72
Septiembre	1,607	2,334	30	118	36.04
Octubre	2,356	4,221	47	128	25.10
Noviembre	3,999	7,799	44	144	55.20
Diciembre	3,408	6,900	18	114	69.13
Total 2017	24,719	34,392	962	882*	295.12
Total 2016	19,182	21,884	665	726	661.7

*De los 882 VTs sólo se pudieron localizar 757 eventos

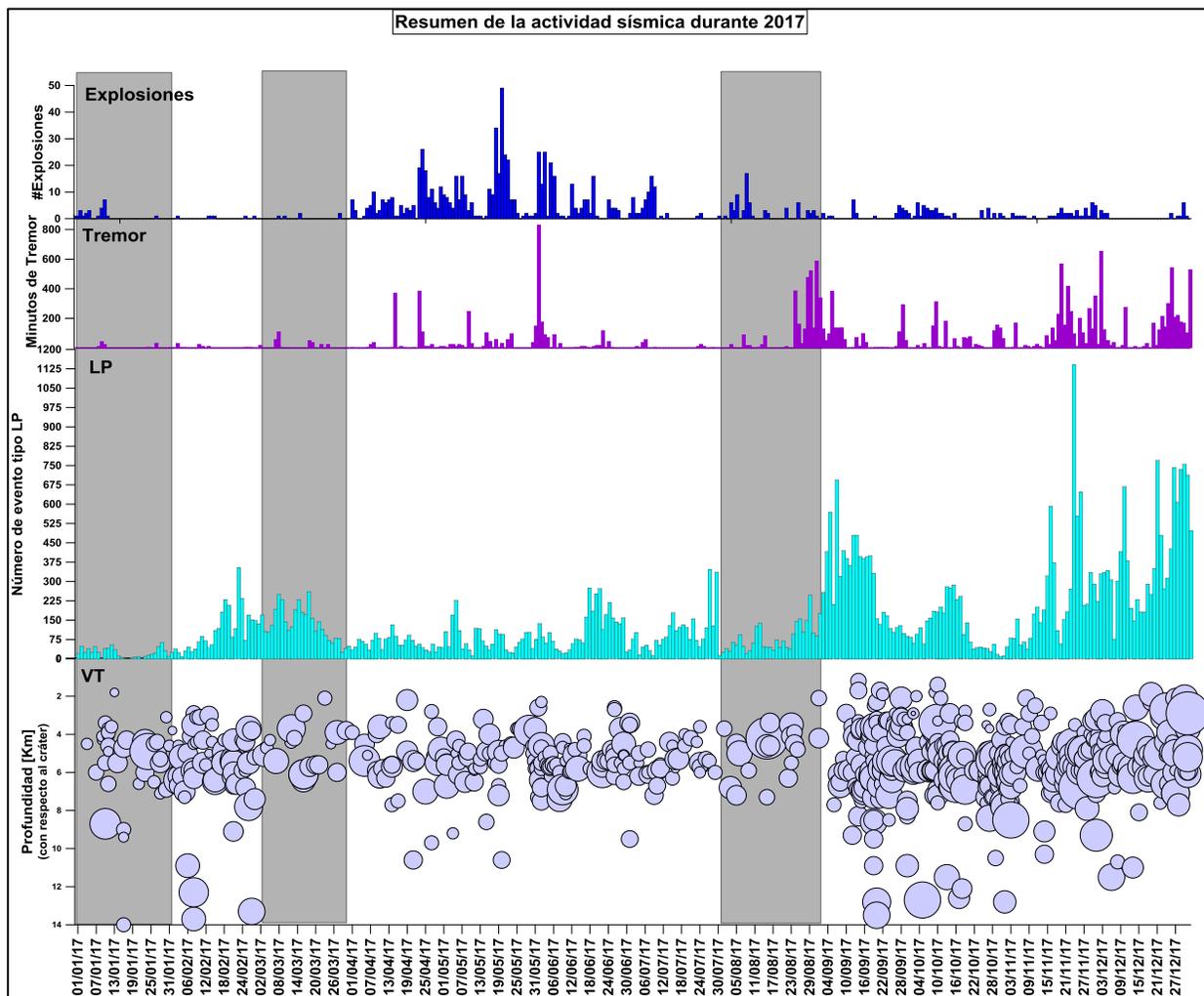


Figura 1 Resumen anual de la actividad sísmica registrada en el volcán Popocatépetl durante 2017, las áreas grises corresponden a los meses en que se registraron menos de 40 sismos volcanotectónicos al mes

Eventos de periodo largo (exhalaciones, explosiones, trenes de exhalaciones) y temblor

Durante los primeros tres meses del año se contabilizaron 7,644 eventos de periodo largo (LP), de los cuales 7,606 fueron considerados como exhalaciones, los 38 eventos restantes se clasificaron como explosiones. A partir de febrero se observó un notable incremento en el número de exhalaciones de más del 300%. El 8 de febrero se registró un tren de eventos tipo LP, con duración de 161 minutos; las señales presentaron una banda de frecuencias de 2 a 3 Hz (Figura 2). Para el 18 de marzo se registró un tren de explosiones, cuya duración fue de 634 minutos; en el monitoreo visual se observó principalmente la emisión de vapor de agua y ligeras cantidades de ceniza (Figura 3). Además, en este trimestre se registraron 8.84 horas de temblor armónico, que se presentó en segmentos con duraciones desde unos pocos segundos hasta 22 minutos.

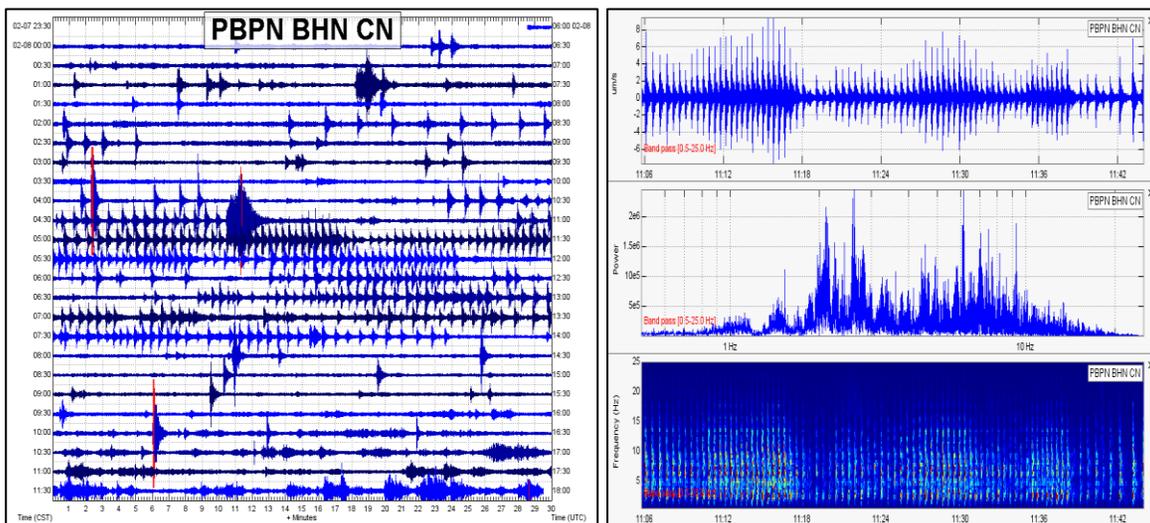


Figura 2 Sismograma (izquierda), forma de onda, espectro y espectrograma (derecha) de la actividad presentada el día 8 de febrero de 2017

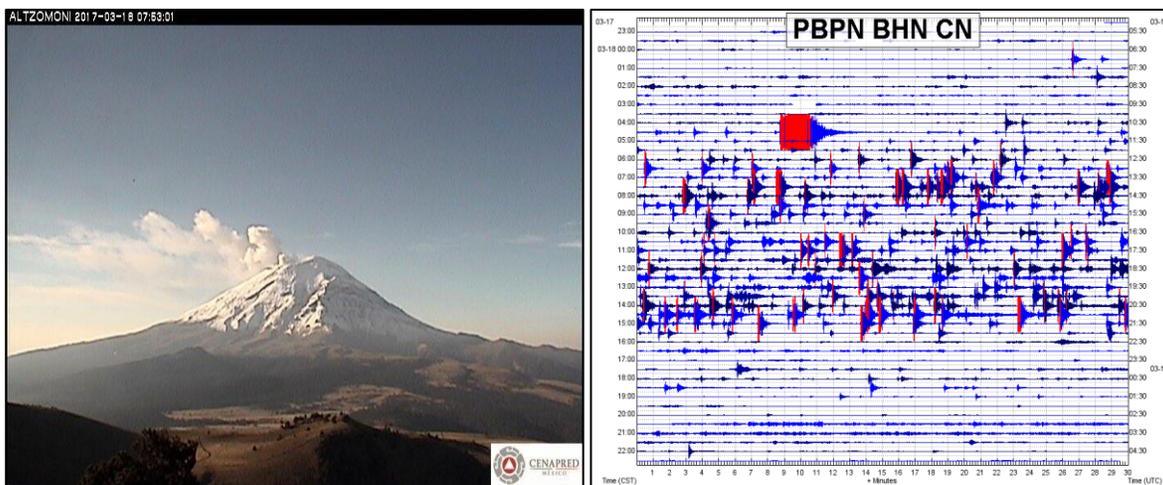


Figura 3 Cámara de Altzomoni (izquierda), sismograma (derecha) de la actividad registrada el día 18 de marzo de 2017

Durante abril, mayo y junio se mantuvo alto el registro de exhalaciones y *pulgas* (en promedio 85 eventos por día); en estos meses se observó un incremento en el número de explosiones y horas de tremor. En abril se registraron dos episodios de actividad estromboliana, el 7 de abril, con una duración de 305 minutos y el 23 de abril, con duración de 278 minutos; ambos episodios estuvieron compuestos de señales tipo LP y tremor (Figura 4); las señales sísmicas tuvieron una banda de frecuencias de 2 a 4 Hz. Debido a las condiciones de nubosidad, las emisiones del primer episodio no fueron observadas, pero en el segundo episodio se corroboró la emisión de vapor de agua y ligeras cantidades de ceniza (Figura 5). A partir del primer episodio de actividad estromboliana se comenzó a formar el domo de lava número 73, que creció de forma paulatina, dejando un registro de más de 11 horas de tremor armónico a lo largo del mes. Con el episodio del día 23 aceleró su crecimiento.

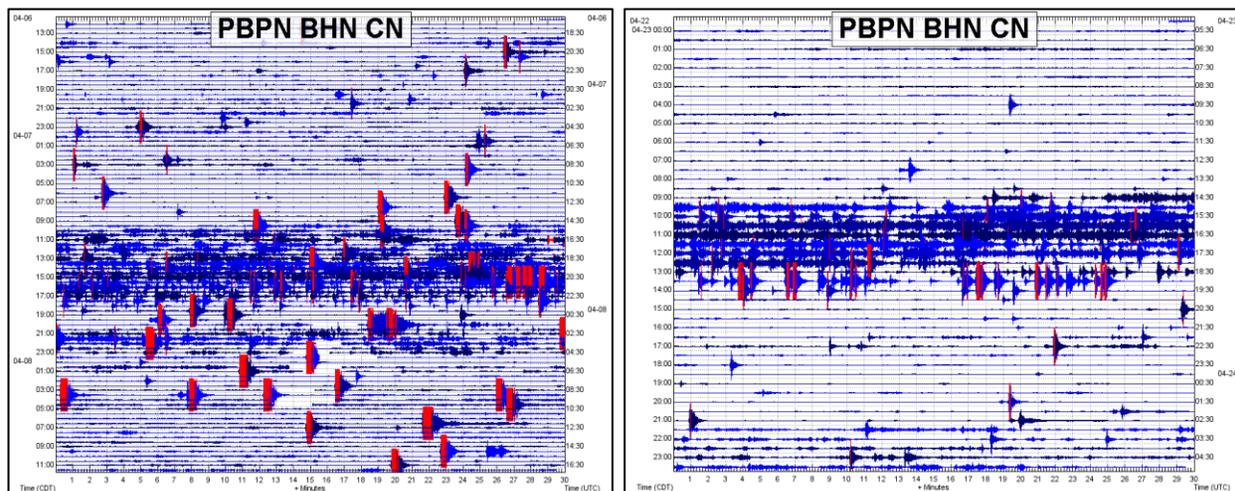


Figura 4 Sismogramas de los episodios de actividad estromboliana registrados el 7 y 23 de abril de 2017



Figura 5 Imágenes del episodio de actividad estromboliana registrado el 23 de abril de 2017

El 18 de mayo se registró un nuevo episodio de crecimiento del domo 73 con actividad estromboliana, el cual tuvo una duración de tres horas y se caracterizó por presentar explosiones, eventos tipo LP y temblor. Durante este episodio se observó una emisión de vapor de agua y ceniza, con una altura de columna de aproximadamente 2 km de altura, así como la emisión de fragmentos incandescentes en los flancos del volcán (Figura 6). Durante mayo se registró un aumento en el registro de explosiones (277) y horas de temblor (16.18). La altura promedio de las columnas generadas por las explosiones fue inferior a los 2 km y algunas de ellas emitieron fragmentos incandescentes que cayeron a 500 m de distancia (Figura 7).

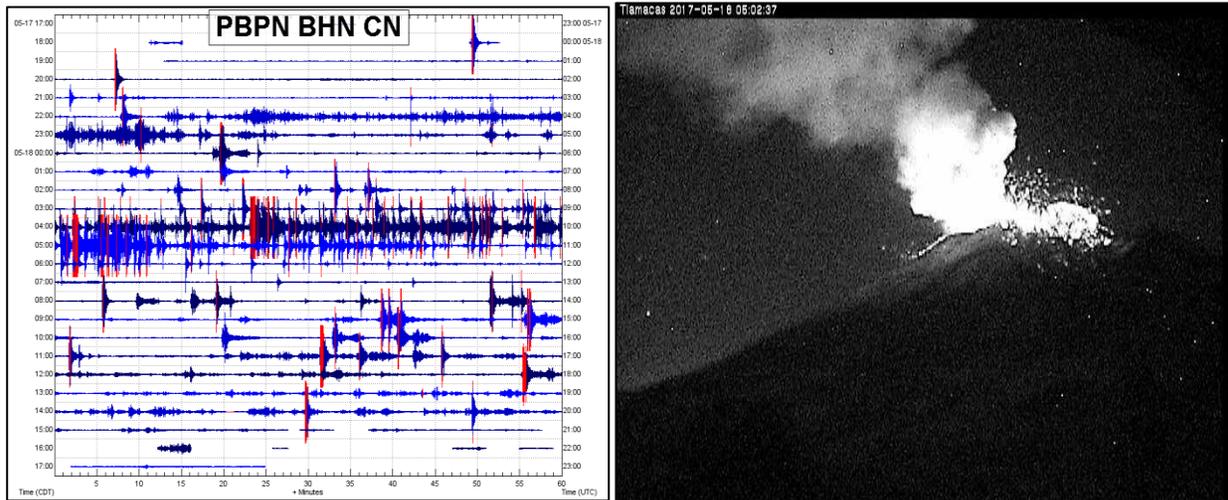


Figura 6 Sismograma e imagen del episodio de actividad estromboliana registrado el 18 de mayo de 2017

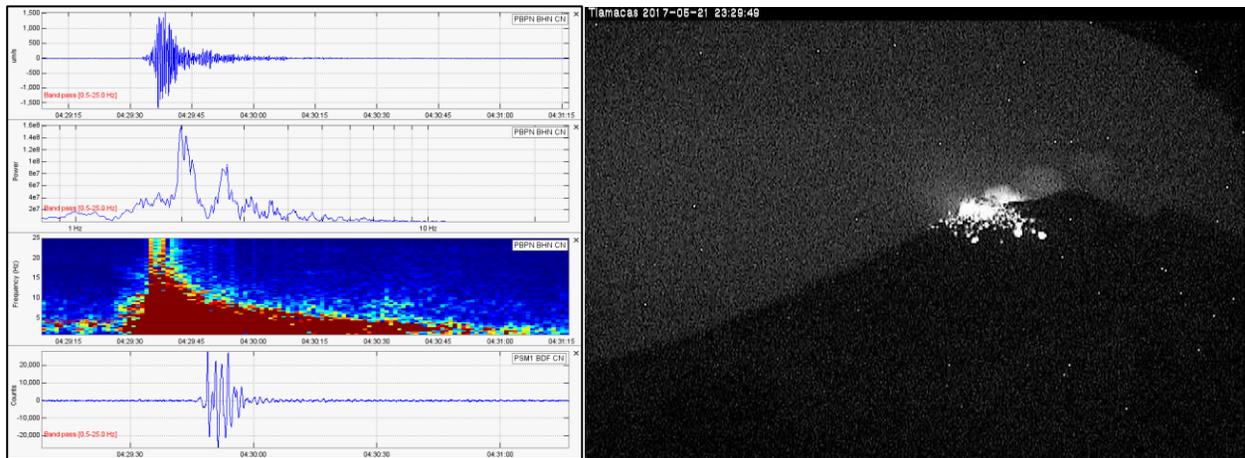


Figura 7 Izquierda, forma de onda, espectro, espectrograma e infrasónico. Derecha, imagen de la cámara Tlamanca de la explosión registrada a las 23:29 h el 20 de mayo de 2017

Durante junio se incrementó el registro de exhalaciones y *pulgas* en un 74% con respecto a mayo. El 17 de junio se registró un episodio de actividad estromboliana, el cual tuvo una duración de 6 horas y con las mismas características que episodios pasados (Figura 8). A partir de la segunda quincena de junio se comenzó a formar el domo de lava número 74 y creció principalmente con el episodio del día 17. El número de explosiones disminuyó (180) y las horas de tremor aumentaron (25.54), con respecto del mes anterior.

Los segmentos de tremor registrados durante abril, mayo y junio, se caracterizaron principalmente por ser de tipo armónico y frecuencia fundamental entre 1 y 3 Hz. El 1° de junio se observó el mayor registro de segmentos de tremor y en mayo se observó la mayor duración de los segmentos, alcanzando hasta 195 minutos; mientras que las mayores amplitudes se observaron en abril con 750 μm (pico a pico, Figura 9).

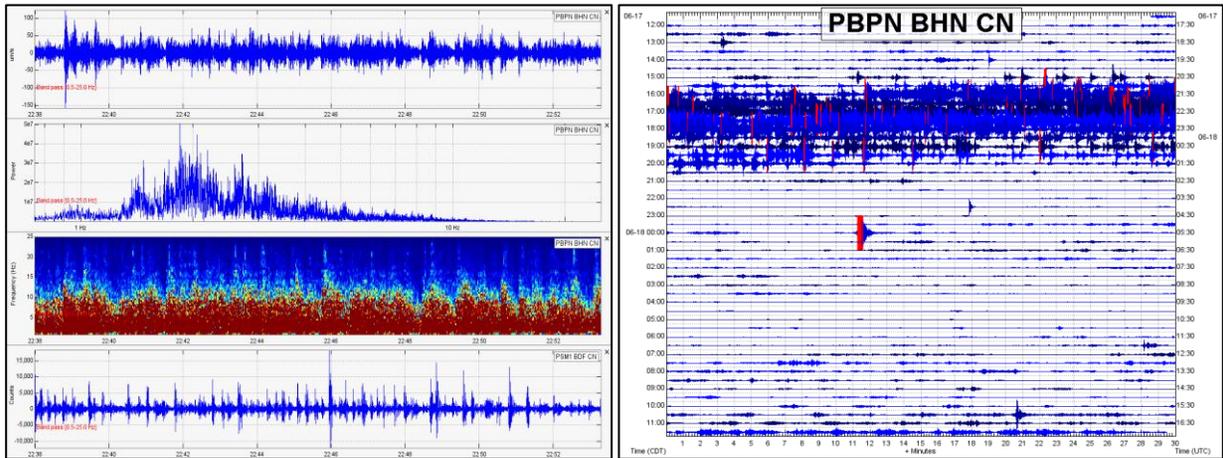


Figura 8 Arriba: Actividad registrada el 17 de junio de 2017. Izquierda: sismograma; derecha forma de onda, espectro, espectrograma e infrasónico. Abajo: Imagen de la cámara de Tlamanca de la actividad

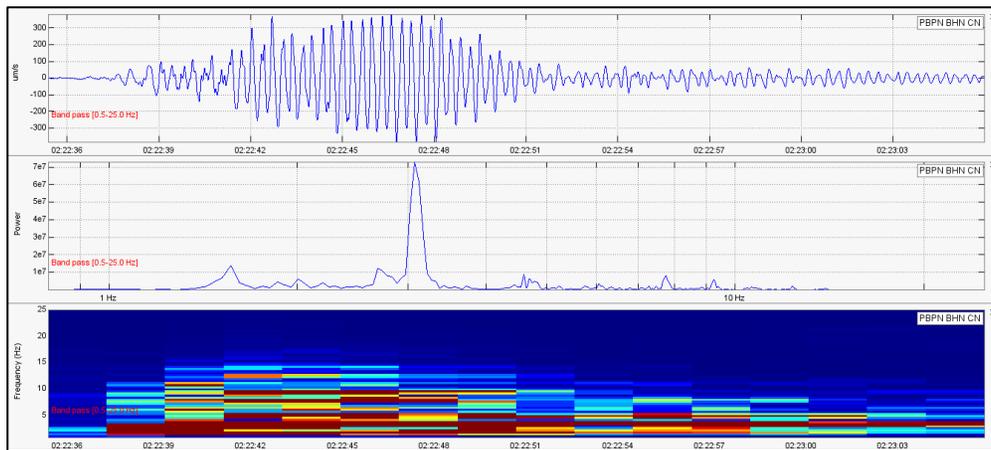


Figura 9 Forma de onda, espectro y espectrograma del día 15 de abril en la estación Canario (PBP) en su componente norte

En julio se observó un decremento en el registro de la actividad sísmica en comparación con el mes anterior; sin embargo, se registraron cinco episodios de actividad estromboliana los días 10, 11, 12, 23 y 24. El evento con mayor duración se registró el 24, con 552 minutos. En todos los casos, las señales sísmicas presentaron una banda de frecuencias de 1 a 3 Hz, con amplitudes máximas de 300 μm (pico a pico, Figura 10); así mismo, se observó la emisión de gases volcánicos y ligeras cantidades de ceniza, que alcanzaron una altura de aproximadamente 1.5 km (Figura 11). A partir del día 11 se comenzó a formar el domo número 75, principalmente con los cinco episodios de actividad estromboliana.

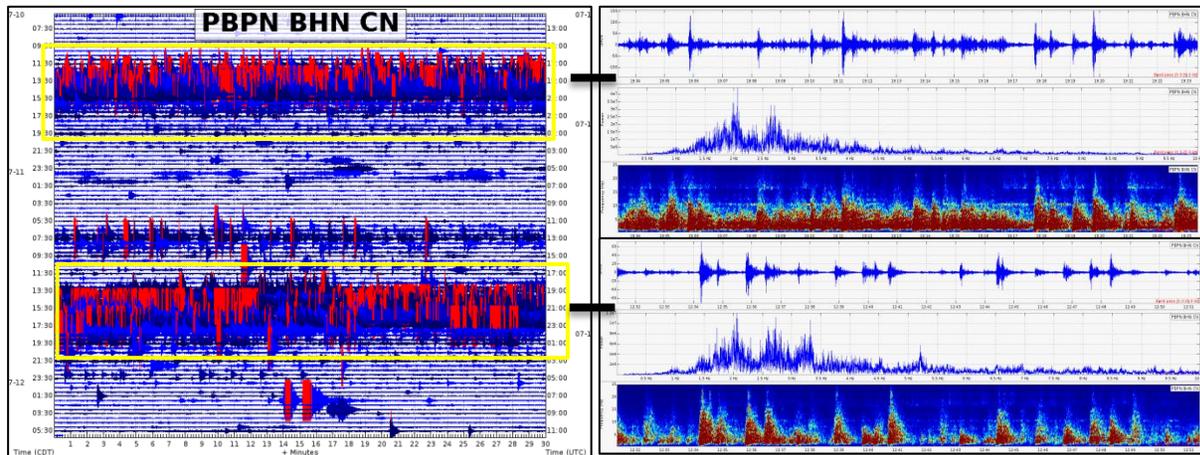


Figura 10 Actividad registrada los días 11 y 12 de julio de 2017. Izquierda: sismograma; derecha forma de onda, espectro y espectrograma

Las explosiones registradas durante julio tuvieron amplitud máxima de 929 μm pico a pico. Del total de las explosiones, 63 se registraron durante los primeros 10 días del mes; la altura de las columnas generadas fue menor a 2,500 m sobre el cráter, y en ocasiones se observó la emisión de fragmentos incandescentes sobre las laderas del volcán, a una distancia de hasta 500 m (Figura 12). Con las explosiones registradas los primeros días del mes se destruyó el domo número 74.



Figura 11 Imágenes de las cámaras de Tlamacas y Altzomoni de la actividad registrada el 12 y 24 de julio de 2017

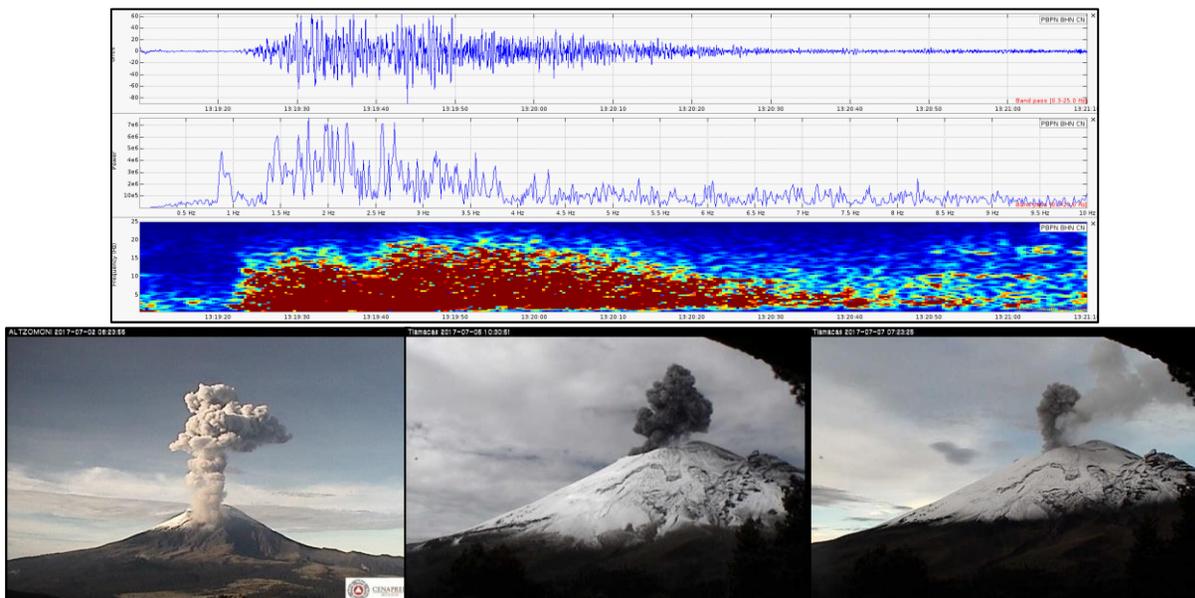


Figura 12 Arriba, forma de onda, espectro y espectrograma de una explosión registrada el 2 de julio; abajo, imágenes de las cámaras Tlamicas y Altzomoni para las explosiones registradas durante los días 2, 4 y 7 de julio de 2017

En agosto se observó un incremento en el número de eventos tipo LP y pulgas, con un promedio de 273 eventos por día. Durante los primeros 10 días del mes se registró el mayor número de explosiones. La altura de las columnas generadas fue menor a 4,000 m sobre el cráter, y en ocasiones se observó la emisión de fragmentos incandescentes sobre las laderas del volcán, a una distancia de hasta 500 m. La explosión más importante se registró el 21 de agosto a las 10:44, la cual generó una columna eruptiva de 4 km de altura con contenido moderado de ceniza (Figura 13).

Los segmentos de tremor registrados durante agosto sumaron 44.72 horas, con duraciones de hasta 180 minutos. El día 24 se tuvo el registro máximo, con un total de 386 minutos. Las amplitudes máximas registradas alcanzaron los 32 μm pico a pico y la frecuencia fundamental de la mayoría de los episodios estuvo entre 1 y 3 Hz, predominando la frecuencia alrededor de 1 Hz (Figura 14).

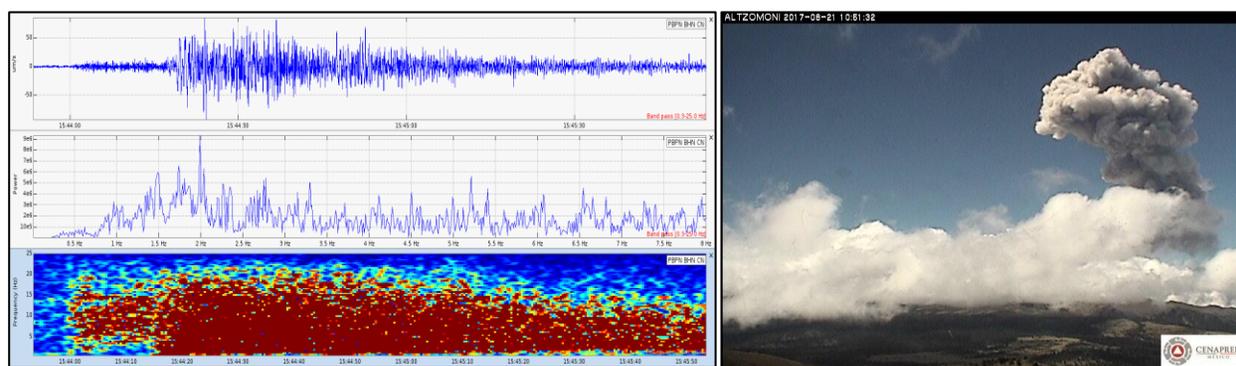


Figura 13 Izquierda, forma de onda, espectro y espectrograma de una explosión registrada el 21 de agosto de 2017; derecha, imagen de la cámara de Altzomoni

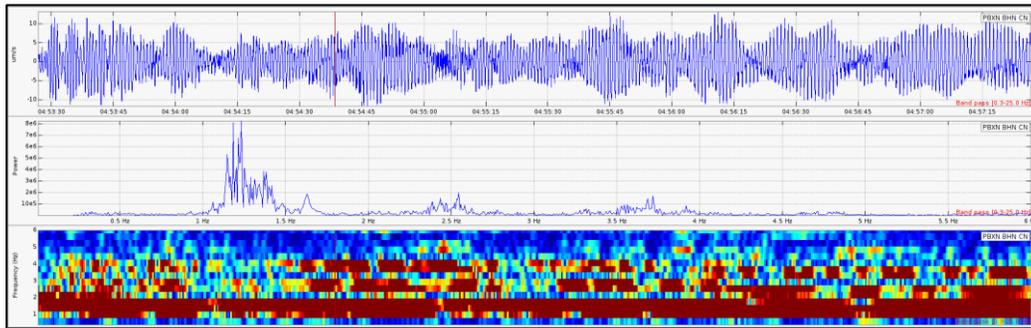


Figura 14 Forma de onda, espectro y espectrograma de un segmento de terremoto registrado el día 28 de agosto en la estación Chiquipixtle (PBX) en su componente norte

En septiembre se registraron 30 explosiones, La altura de las columnas generadas fue menor a 2,500 m sobre el cráter; en ocasiones se observaron fragmentos incandescentes sobre las laderas del volcán, a una distancia de hasta 500 m (Figura 15).



Figura 15 Imágenes de las columnas eruptivas y emisión de fragmentos incandescentes asociadas a las explosiones registradas los días 1, 12 y 13 de septiembre

El 19 de septiembre, a las 13:14:40 horas, se registró un sismo regional, con magnitud 7.1, cuyo epicentro se localizó a 12 km de Axochiapan, Morelos, cerca de la frontera con el estado de Puebla, y a solamente 70 km del cráter del Popocatepetl. A las 13:15:09 horas, es decir 29 segundos después, se comenzó a observar una serie de derrumbes sobre las laderas del flanco norte del volcán y en la barranca de Nexpayantla, y a las 13:15:56 horas, 76 segundos después del sismo, se inició una emisión de ceniza que alcanzó una altura aproximada de 800 m sobre el cráter (Figura 16).



Figura 16 Emisión de ceniza registrada segundos después del sismo, con magnitud 7.1, registrado el 19 de septiembre

Una de las explosiones más importantes se registró el día 5, a las 02:26 horas; tuvo una amplitud de 3,000 μm pico a pico y una frecuencia fundamental de 2 Hz; generó una columna eruptiva de más de 2 km de altura, y la emisión de fragmentos incandescentes hasta 2 km del cráter en todas direcciones (Figura 17). Se reportó ligera caída de ceniza en las localidades de Totolapan, Tlalnepantla y Cuernavaca en el estado de Morelos y en Ecatzingo, Atlautla y Tepetlixpa del estado de México.

El 7 de octubre a las 11:22 h se presentó otra explosión vulcaniana, cuya columna eruptiva alcanzó más de 3 km de altura y lanzó fragmentos incandescentes hasta 1.5 km desde el cráter (Figura 17). Tuvo una amplitud de 3,900 μm pico a pico.

El 11 de octubre, entre las 05:25 y hasta las 07:50 h, se registró un tren de exhalaciones y pequeñas explosiones, que generaron columnas eruptivas inferiores a 1 km de altura y que no pudieron ser claramente observadas debido a la nubosidad prevaleciente en ese momento en la zona.

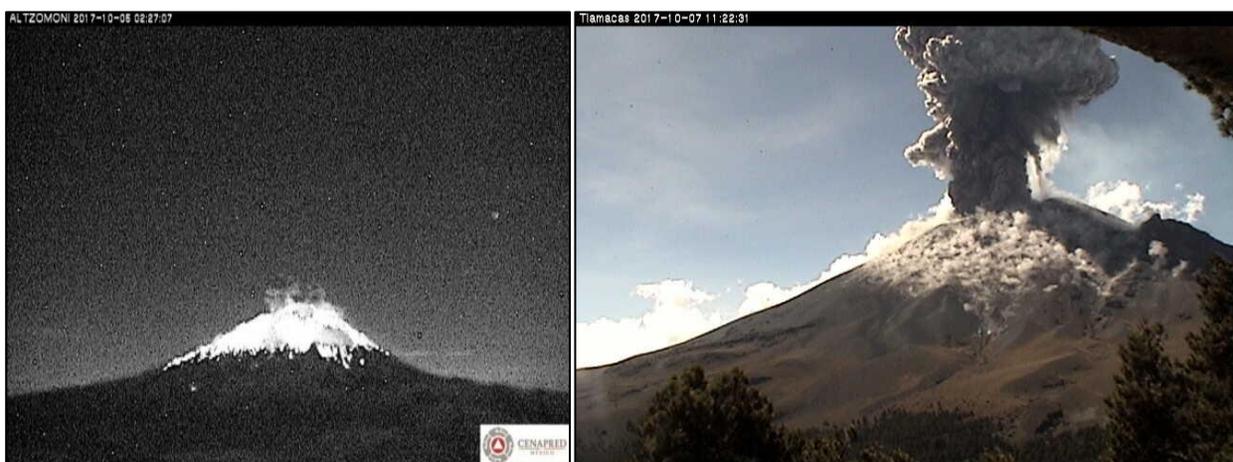


Figura 17 Imágenes de las columnas eruptivas y emisión de fragmentos incandescentes, explosiones de los días 5 y 7 octubre de 2017

Los segmentos de tremor registrados durante octubre sumaron 25.10 horas, con duraciones de hasta 240 minutos. El día 5 se tuvo el mayor registro, con un total de 312 minutos. Las amplitudes máximas registradas alcanzaron los 480 μm pico a pico. El día 5 se registraron segmentos de tremor en forma de paquetes, con duraciones de 30 segundos a 1.5 minutos (Figura 18).

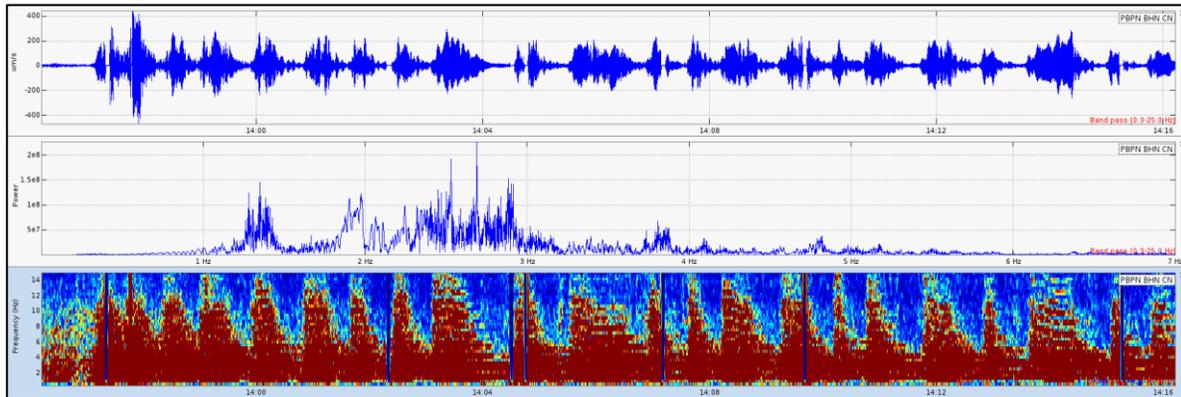


Figura 18 Forma de onda, espectro y espectrograma de segmentos de tremor registrados el día 5 de octubre en la estación Canario (PBP) en su componente norte

En noviembre el promedio de eventos tipo LP fue de 381 por día. Se registraron 44 explosiones, con amplitud máxima de 3,078 μm pico a pico. La altura de las mayores columnas generadas alcanzó los 3 km sobre el cráter; en ocasiones se emitieron fragmentos incandescentes sobre las laderas del volcán, a distancias de hasta 1,000 m (Figura 19). Estas explosiones se consideraron, por sus características sísmicas y visuales, como de tipo vulcaniano.



Figura 19 Imágenes de las explosiones de los días 7, 17 y 24 de noviembre

Durante noviembre se registraron ocho episodios de actividad estromboliana (Tabla 2), los más importantes los días 3, 4, 24 y 27. Estos episodios estuvieron caracterizados por una señal sísmica de baja amplitud (con un máximo de 500 μm pico a pico), compuesta de sismos tipo LP y tremor. Se generaron columnas eruptivas de hasta 4 km de altura (Figura 20). Se reportó caída de ceniza en las comunidades de Tochimilco, Izúcar de Matamoros, Atlixco, Tepeojuma, San Pedro Benito Juárez y Huaquechula en el estado de Puebla; Totolapan, Yecapixtla, Zacualpan de Amilpas, Ocuituco y Tetela del Volcán, en el estado de Morelos, así como en Ecatzingo, en el Estado de México.

Tabla 2. Episodios de actividad estromboliana

No.	Fecha	Duración (min)
1	03/11/2017	230
2	04/11/2017	80
3	20/11/2017	17
4	22/11/2017	75
5	23/11/2017	90
6	24/11/2017	106
7	25/11/2017	132
8	27/11/2017	121



Figura 20 Imágenes de los episodios de actividad estromboliana registrados los días 3, 4, 20 y 27 de noviembre de 2017

Los segmentos de tremor registrados en noviembre sumaron 55.20 horas, con duraciones de hasta 240 minutos. El día 19 se tuvo el mayor registro, con un total de 564 minutos. Las amplitudes máximas registradas alcanzaron los 200 μm pico a pico (Figura 21).

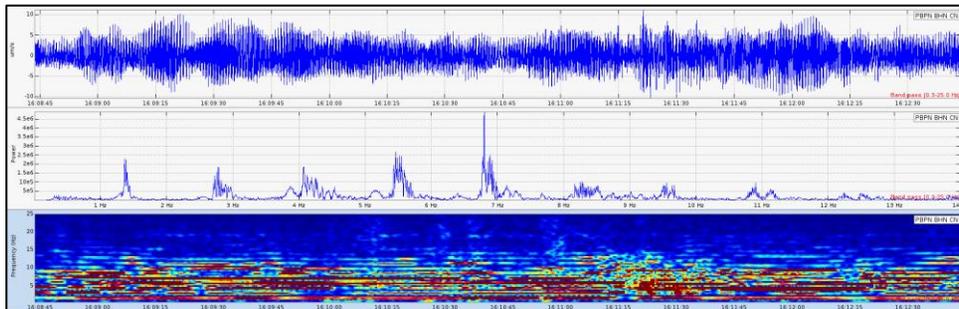


Figura 21 Forma de onda, espectro y espectrograma de segmentos de tremor registrados el día 19 de noviembre en la estación Canario (PBP) en su componente norte

El 25 de noviembre, con apoyo de la Policía Federal, se realizó un vuelo de reconocimiento para evaluar las condiciones del cráter después de los episodios de actividad estromboliana registrados los días 3, 4 y 24. Derivado de este sobrevuelo, se concluyó que el cráter interno del volcán no había modificado su diámetro, al menos desde marzo de 2017, aunque la profundidad ha disminuido y aumentado en respuesta a la formación y posterior destrucción de los domos 73 a 77 en su interior. El diámetro calculado, para finales del mes de noviembre, fue de 320 m, con una profundidad estimada en 110 m (Figura 22). Se concluyó que los episodios de actividad estromboliana registrados a lo largo de noviembre estuvieron asociados a la limpieza de los conductos del sistema.



Figura 22 Imagen del cráter del volcán tomada el 25 de noviembre

En diciembre de 2017 se observó un ligero decremento en eventos de periodo largo, con un promedio diario de 332 eventos, mientras que las horas de tremor aumentaron. Se registraron 18 explosiones; la altura de las mayores columnas generadas alcanzó los 2.5 km sobre el cráter; en ocasiones se emitieron fragmentos incandescentes sobre las laderas del volcán, a distancias de hasta 500 m (Figura 23).



Figura 23 Imágenes de las explosiones de los días 1, 4, 7 y 9 de diciembre

El 9 de diciembre se registró un episodio de actividad estromboliana, con una duración de 249 minutos, que estuvo caracterizado por una señal sísmica de baja amplitud (con un máximo de 250 μm pico a pico), compuesta de sismos tipo LP y tremor; además, se observó la expulsión de fragmentos incandescentes en las partes altas del edificio volcánico (Figura 24), así como la emisión de ceniza. Sin embargo, debido a las condiciones de nubosidad en la zona, no se pudo determinar la altura de la columna eruptiva.

Los segmentos de tremor registrados durante diciembre sumaron 69.13 horas, con duraciones de hasta 205 minutos. El día 2 se tuvo el mayor registro, con un total de 649 minutos. Las amplitudes máximas registradas alcanzaron los 160 μm pico a pico (Figura 25).

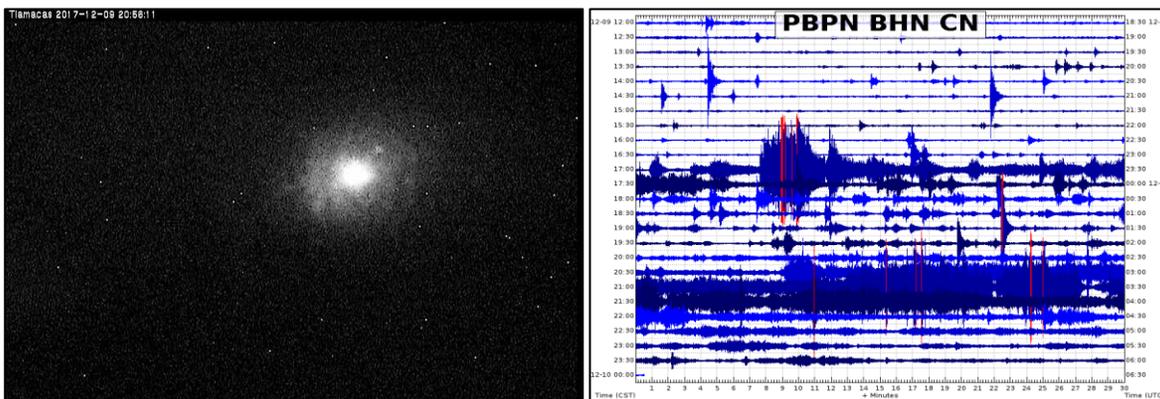


Figura 24 Imagen y sismograma del episodio de actividad estromboliana registrado el 9 de diciembre

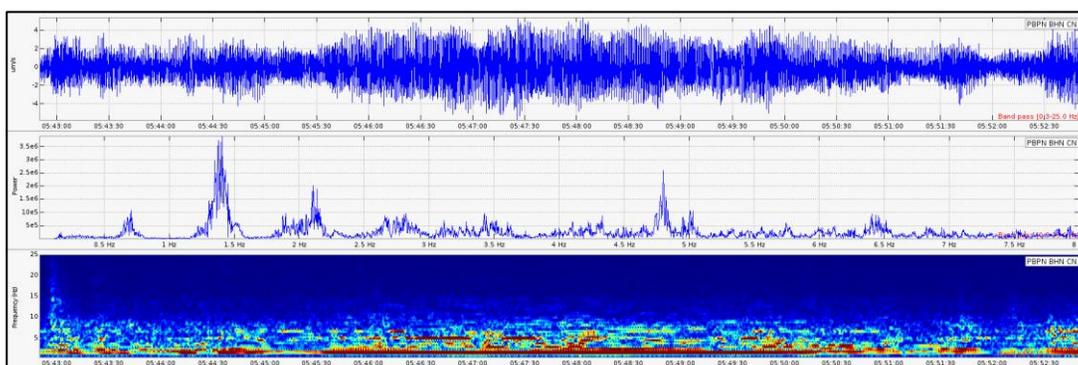


Figura 25 Forma de onda, espectro y espectrograma de segmentos de tembor registrados el día 28 de diciembre de 2017

Sismos volcanotectónicos

Durante 2017 se observó un importante incremento en la ocurrencia y registro de sismos volcanotectónicos, en particular entre septiembre y diciembre. En total se registraron 882 eventos, de los cuales se pudieron localizar 757. Entre septiembre y diciembre, se registraron más de 90 eventos al mes (Figuras 26 y 27).

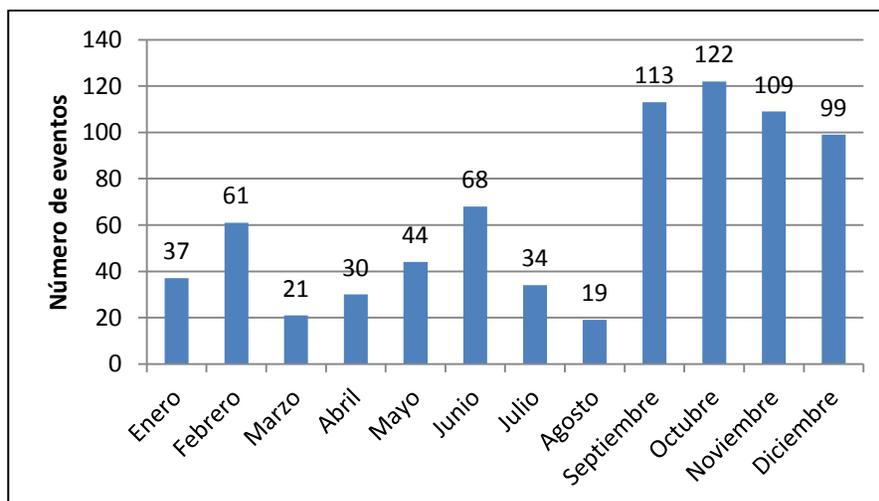


Figura 26 Grafica del número de eventos volcanotectónicos registrados mensualmente durante el 2017

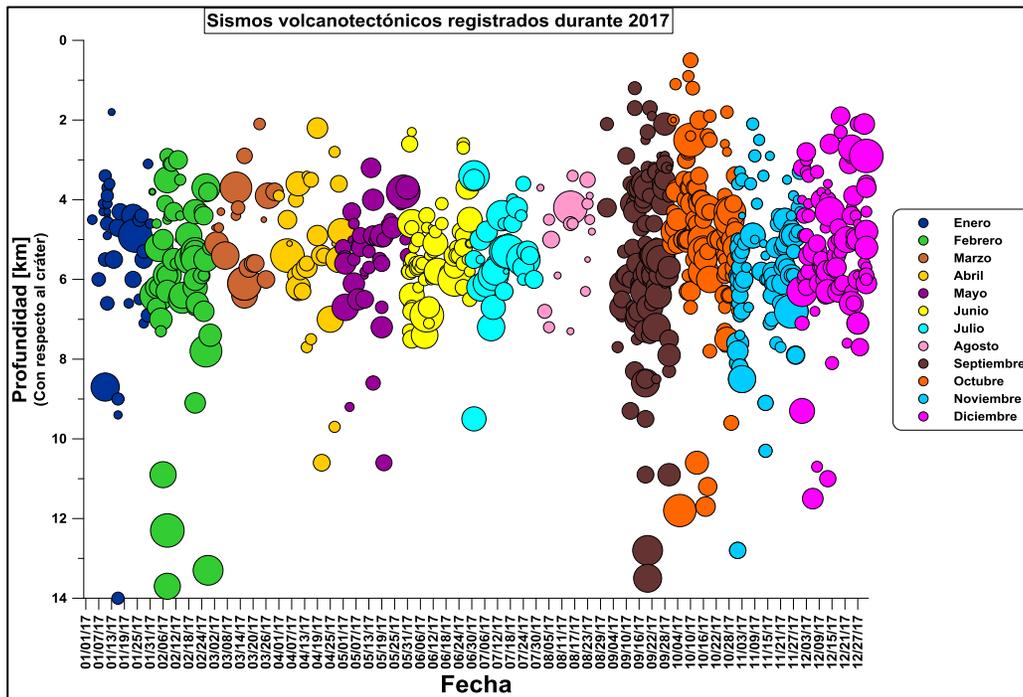


Figura 27 Variación en profundidad y magnitud de los sismos volcanotectónicos de 2017
Los colores representan los meses, el cero corresponde al nivel del cráter

Durante enero, febrero y de septiembre a diciembre se observaron las mayores profundidades hipocentrales, alcanzando hasta 14 km bajo el nivel del cráter; así mismo, en septiembre y octubre se registraron las profundidades más someras, llegando a tan solo 1.2 km con respecto al nivel del cráter (Figura 27). En cuanto a la magnitud calculada, el rango estuvo entre 0.8 y 3.7; y la magnitud con mayor frecuencia fue de 1.8 (Figura 28). De octubre a diciembre se registró el mayor número de sismos con magnitud mayor de 3.

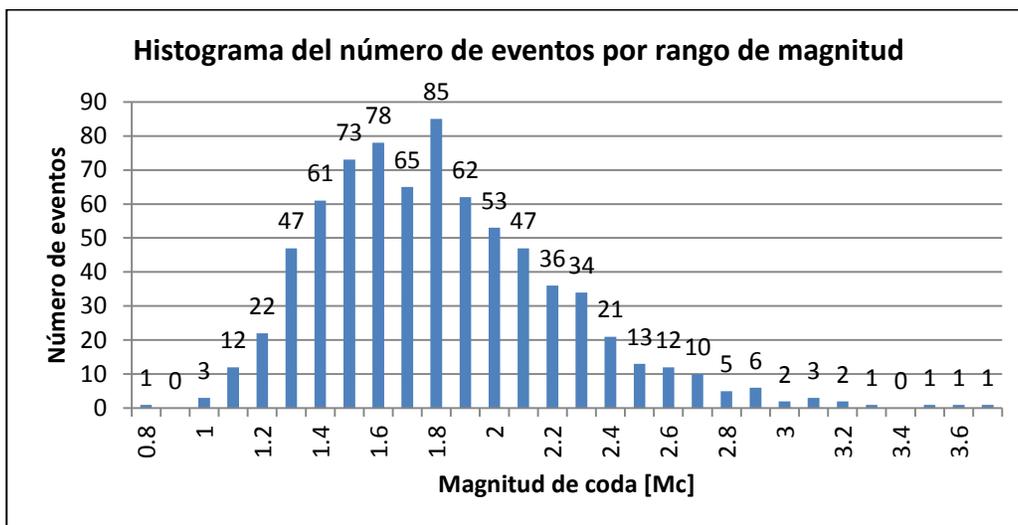


Figura 28 Histograma del número de eventos por rango de magnitud calculada

En la Figura 29 se muestra la distribución de los epicentros, vista en planta, así como los dos perfiles N-S y E-W. La distribución de los hipocentros se concentra en dos zonas, la primera debajo del cráter y la segunda al sureste del mismo. Después del sismo del 19 de septiembre los hipocentros comenzaron a

aparecer al suroeste y oeste del volcán. En el perfil N-S se observa una alineación de los hipocentros con orientación SW-NE; en el perfil W-E no se observa la misma tendencia. Sin embargo, a partir de los 4 km por debajo del cráter, las zonas en que se generan estos sismos se extienden más hacia los costados, a diferencia de los primeros 4 km que es un área más angosta.

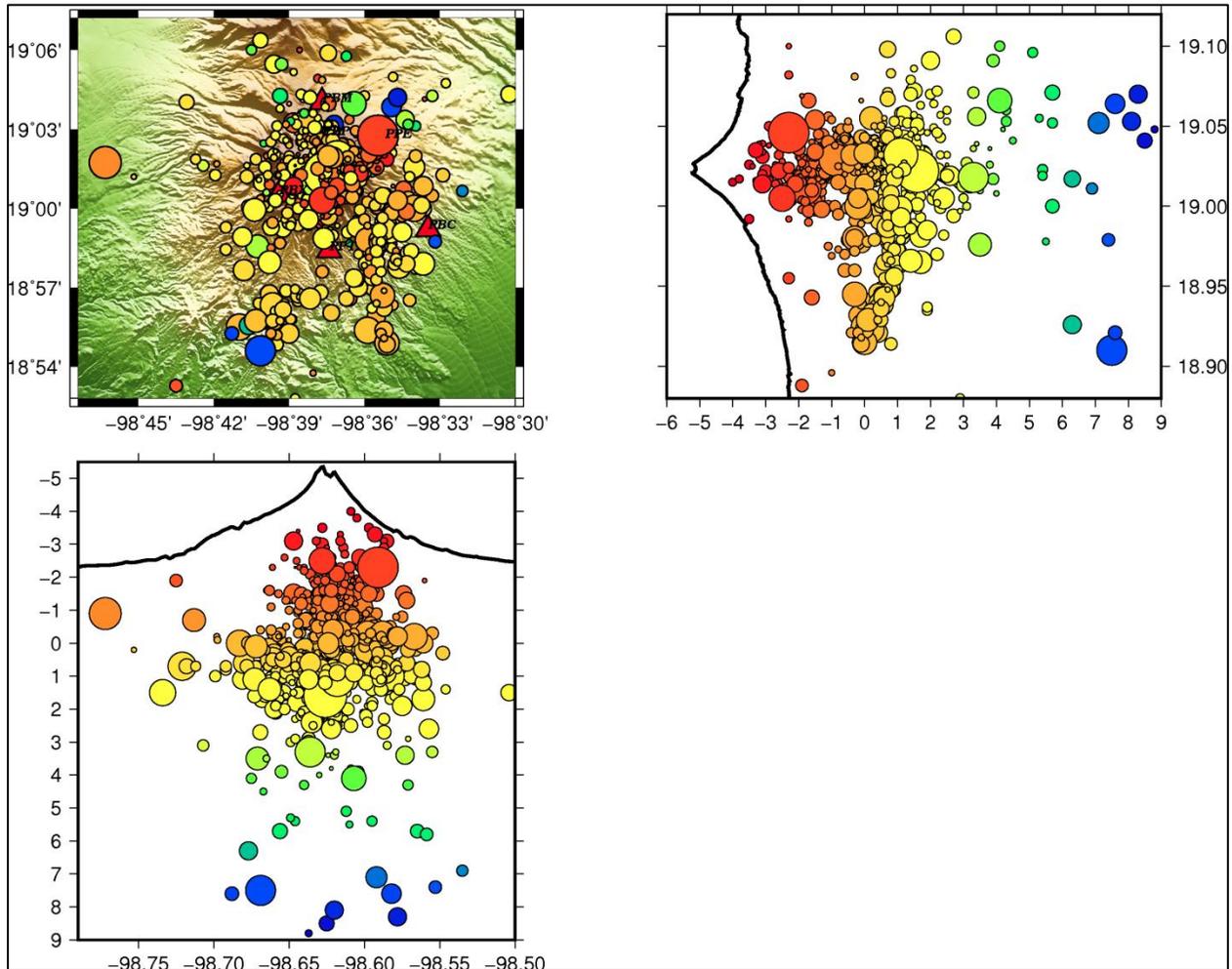


Figura 29 Distribución de las localizaciones de los sismos volcanotectónicos registrados durante el 2017. Los colores representan la profundidad y el tamaño del círculo representa la magnitud.

La energía acumulada por los sismos volcanotectónicos que se presentaron de diciembre de 2016 a diciembre de 2017 es de 4.8294×10^{11} J (Figura 30). A partir de septiembre se observó un cambio en la pendiente, debido al incremento en el número de eventos registrados a partir de ese mes. La aportación de los sismos volcanotectónicos fue de 1.3994×10^{11} J. Los tres saltos que se observan en la figura corresponden a los sismos registrados el 15 de agosto, con magnitud de coda $M_c=3.5$, el 26 de septiembre, con magnitud de coda $M_c=3.7$ y el 28 de diciembre, con magnitud de coda $M_c=3.6$, respectivamente.

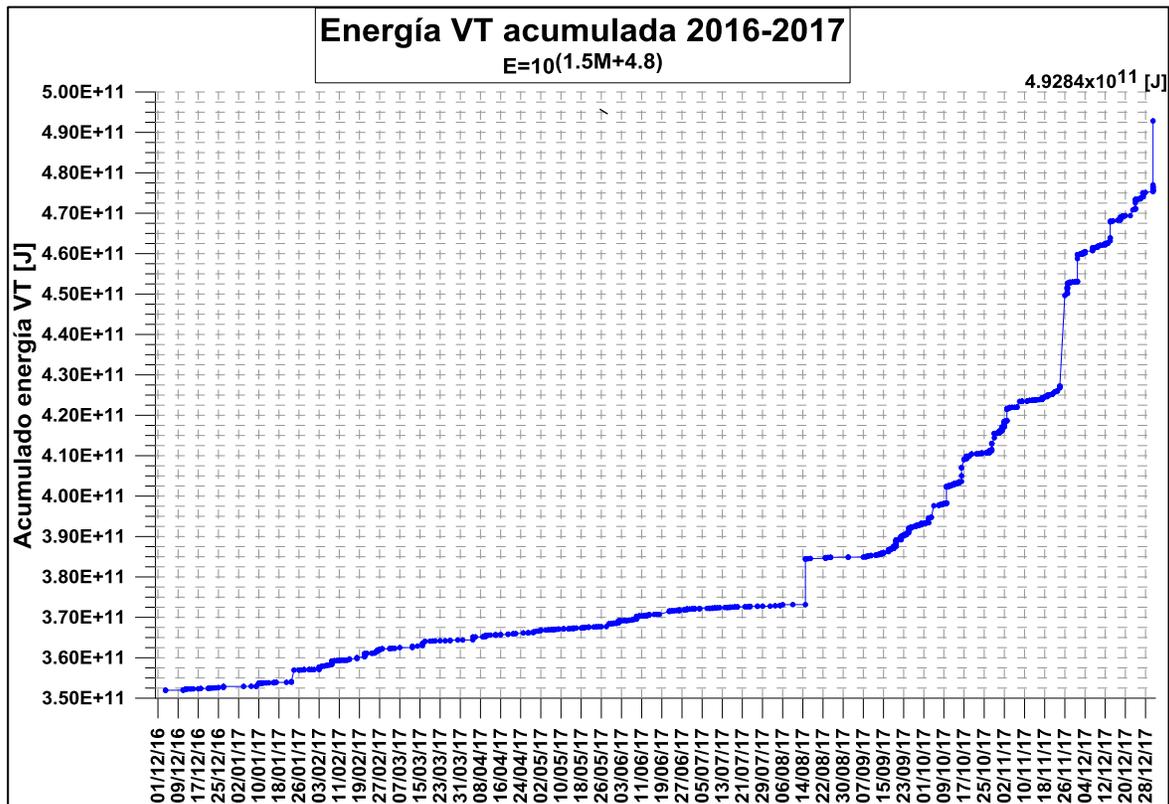


Figura 30 Energía acumulada desde diciembre de 2016 hasta diciembre de 2017

ANOMALÍAS TÉRMICAS

El sistema MODVOLC de la Universidad de Hawái, basado en el análisis de imágenes MODIS (resolución de 1 km) emitió, durante 2017, 126 reportes de anomalías térmicas en el cráter del Popocatepetl (Figura 31). Las más importantes estuvieron asociadas al emplazamiento de los distintos domos de lava que se formaron a lo largo de este año, y algunas veces la anomalía estuvo asociada a eventos explosivos. La anomalía más importante del 2017 corresponde al 17 de noviembre, con un NTI de -0.34; esta anomalía se registró al momento de una de las explosiones ocurridas durante ese mes, con altura cercana a 3 km.

Las anomalías asociadas a los eventos de actividad estromboliana y las explosiones ocurridas en noviembre, con alturas de columnas de hasta 4 km y duraciones de más de 3 horas, tuvieron un NTI de entre -0.6 y -0.8, marcando bien un episodio de actividad iniciado desde octubre.

En general, el registro de anomalías térmicas en el Popocatepetl fue alto durante enero y febrero, después hubo ausencia de anomalías durante marzo y abril, en mayo se registró un nuevo episodio que fue de ligeramente menor intensidad que el de enero-febrero. Paulatinamente las anomalías térmicas se hicieron menos y de menor intensidad hacia julio. En agosto y septiembre no se registraron anomalías y nuevamente comenzó un episodio en octubre, que se prolongó hasta diciembre. El registro de anomalías a lo largo del año tuvo una tendencia a la baja y es posible observar claramente que el registro se agrupó en tres, con valores cada vez menores, a excepción de esa anomalía registrada al momento de la explosión del 17 de noviembre.

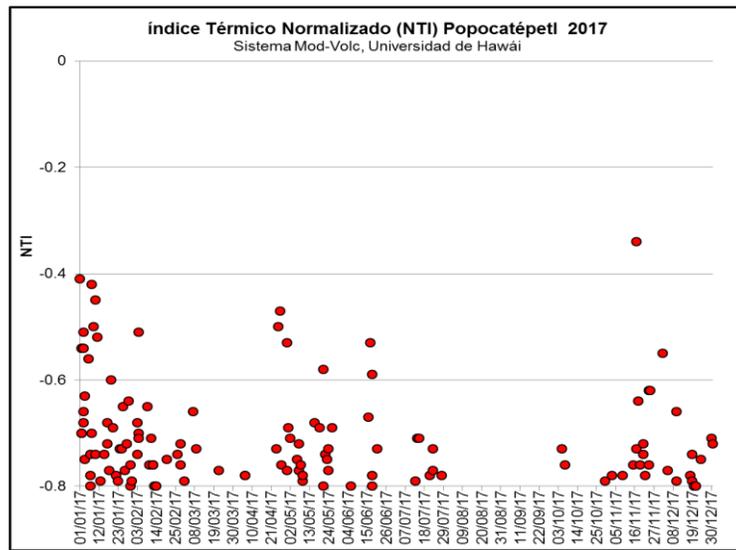


Figura 31 Anomalías térmicas detectadas por el sistema MODVOLC 2016

El Volcanic Radiative Power (VRP) de la Universidad de Turin y Florencia, Italia, a través del Middle InfraRed Method (MIR), detectó, durante el 2017, 253 anomalías térmicas (Figura 32). El registro de anomalías térmicas con el sistema MIROVA mostró el mismo comportamiento que el MODVOLC. Es posible observar tres grupos de anomalías: en enero y febrero, de mayo a agosto y de octubre a diciembre, con valores progresivamente menores, exceptuando aquellas anomalías térmicas registradas al momento de los eventos explosivos. El registro de anomalías permitió identificar periodos de reposo en el volcán entre marzo y abril y de agosto a octubre, y los periodos de mayor actividad que ya se mencionaron. La tendencia general del registro de anomalías a lo largo del año fue a la baja, con un repunte en octubre que se prolongó hasta diciembre.

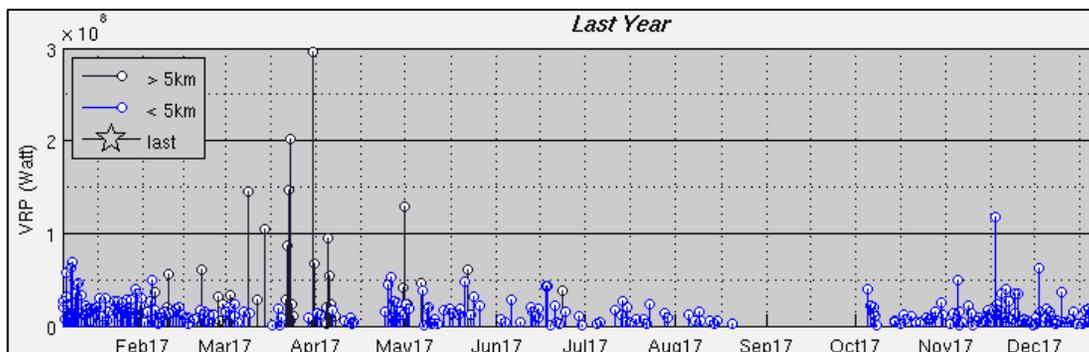


Figura 32 Anomalías térmicas detectadas por el sistema VRP 2015-2016

MONITOREO DE GASES

A lo largo de 2017 el registro de la emisión de gases, a través del sistema OMI de la NASA, mostró un comportamiento variable. Durante enero y principios de febrero la emisión de SO_2 fue alta, con valores máximos de hasta 3,200 toneladas el 18 de enero. Durante marzo y abril la emisión de SO_2 se mantuvo baja y tuvo un ligero repunte en mayo, alcanzando valores cercanos a 1,000 toneladas de SO_2 , y cercanos a 1,500 en junio y julio. En agosto y septiembre la emisión de SO_2 fue muy baja, con algunos periodos con valores de cero. Nuevamente la emisión de SO_2 tuvo un repunte a principios de octubre, aunque con valores menores a 3,000 toneladas. Este nuevo repunte se mantuvo hasta diciembre, aunque con una tendencia a la baja. La tasa de emisión de SO_2 denotó, a lo largo del año tres periodos de mayor emisión:

enero y febrero, abril y mayo y de octubre a diciembre, con periodos de menor emisión entre ellos. (Figura 33). Además, a lo largo de 2017, se realizaron tres campañas para la medición de gases con COSPEC; los valores obtenidos son comparables con los datos registrados por el OMI. El valor máximo del COSPEC fue de 10,000 ton/día de SO₂, el 13 de mayo.

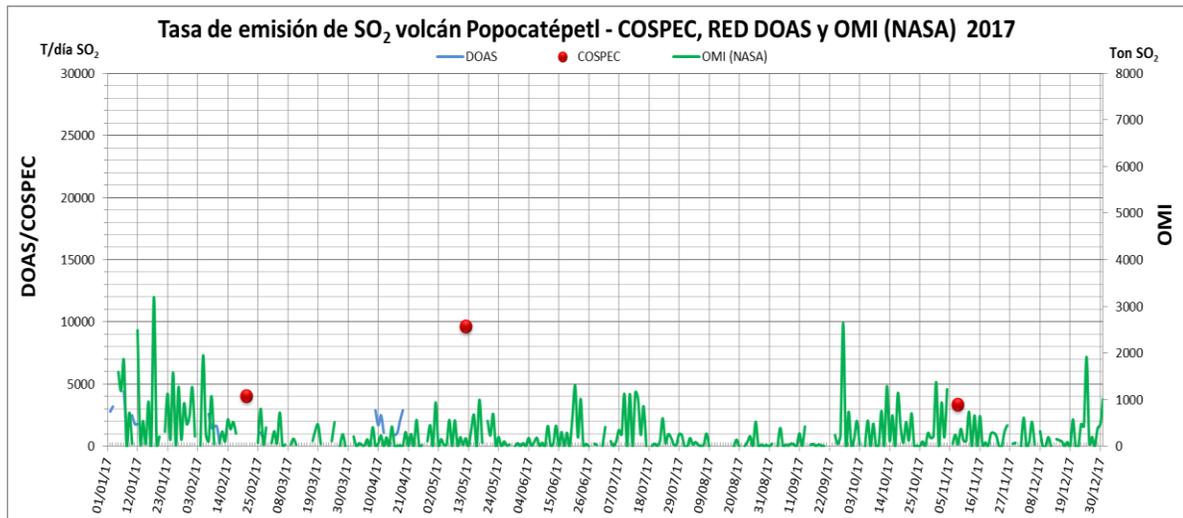


Figura 33 Tasa de emisión de SO₂ durante 2017

MONITOREO HIDROGEOQUÍMICO

En 2017 se realizaron tres campañas para el monitoreo hidrogeoquímico en cinco manantiales alrededor del Popocatepetl (Figura 34), se midieron *in situ* temperatura, pH y conductividad y se tomaron muestras de agua para su análisis en el laboratorio.

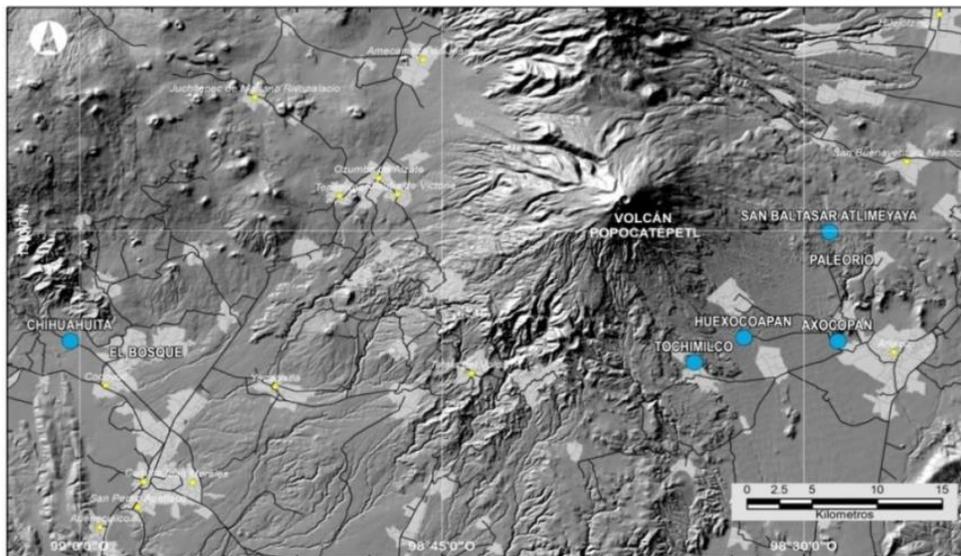


Figura 34 Ubicación de los cinco manantiales donde se toman muestras de agua en los sectores SE, S y SW del volcán Popocatepetl

Las muestras de aguas fueron entregadas al Laboratorio de Química Analítica (LQA) del Instituto de Geofísica de la UNAM y al Laboratorio de Muestras Ambientales (LMA) del CENAPRED, para su análisis. En este informe se analizan los resultados del LMA (Figura 35).

Los elementos analizados en el laboratorio no mostraron variaciones significativas a lo largo del año. En el primer muestreo, realizado en marzo, se observó una disminución de 41% en la concentración de calcio en San Baltazar, y un aumento de este mismo parámetro en Chihuahuita (16%). En Tochimilco hubo un aumento en la concentración de flúor (35%) y calcio (24%). Los sulfatos aumentaron 16% en Chihuahuita y disminuyó 25% en San Baltazar. Se presentó una disminución de sodio en Chihuahuita (31%) y en Tochimilco (25%), así como de potasio en San Baltazar (14%) y Tochimilco (12%). La concentración de cloruros disminuyó 14% en Axocopan y 27% en San Baltazar. Los parámetros bicarbonatos, magnesio y sílice se mantuvieron sin cambios. Solamente se detectó boro en la muestra Agrícola (0.33 mg.L-1) por encima del límite de detección del método del ácido carmínico (0.25 mg.L-1).

Por otro lado, en la campaña que se realizó en mayo, se observó una disminución de cloruros en Tochimilco (28%) y San Baltazar (67%), aumentando en Agrícola 84%. Así como una disminución de calcio en Axocopan (23%) y Tochimilco (17%), aumentando en San Baltazar 15%. Aumentó la concentración de flúor en Agrícola (13%), San Baltazar (22%) y Chihuahuita (37%). Los parámetros bicarbonatos, sílice y potasio permanecieron sin cambios en todas las muestras, mientras que los parámetros; sulfatos, magnesio y sodio se mantuvieron sin cambios en tres de las cinco muestras analizadas. En esta campaña no se detectó boro en ninguno de los manantiales.

Finalmente, al comprar los resultados de los muestreos anteriores con los resultados del muestreo realizado en septiembre, se observó que para las muestras de Axocopan, San Baltazar y Tochimilco hubo una disminución de fluoruros entre el 25 y 34%, así como de sulfatos en San Baltazar (13%), Axocopan (50%) y Tochimilco (64%). La concentración de cloruros aumento en Tochimilco (38%) y San Baltazar (59%). Los bicarbonatos, sodio, potasio, calcio, magnesio y sílice se mantuvieron sin cambios y no se detectó boro en ninguno de los manantiales.

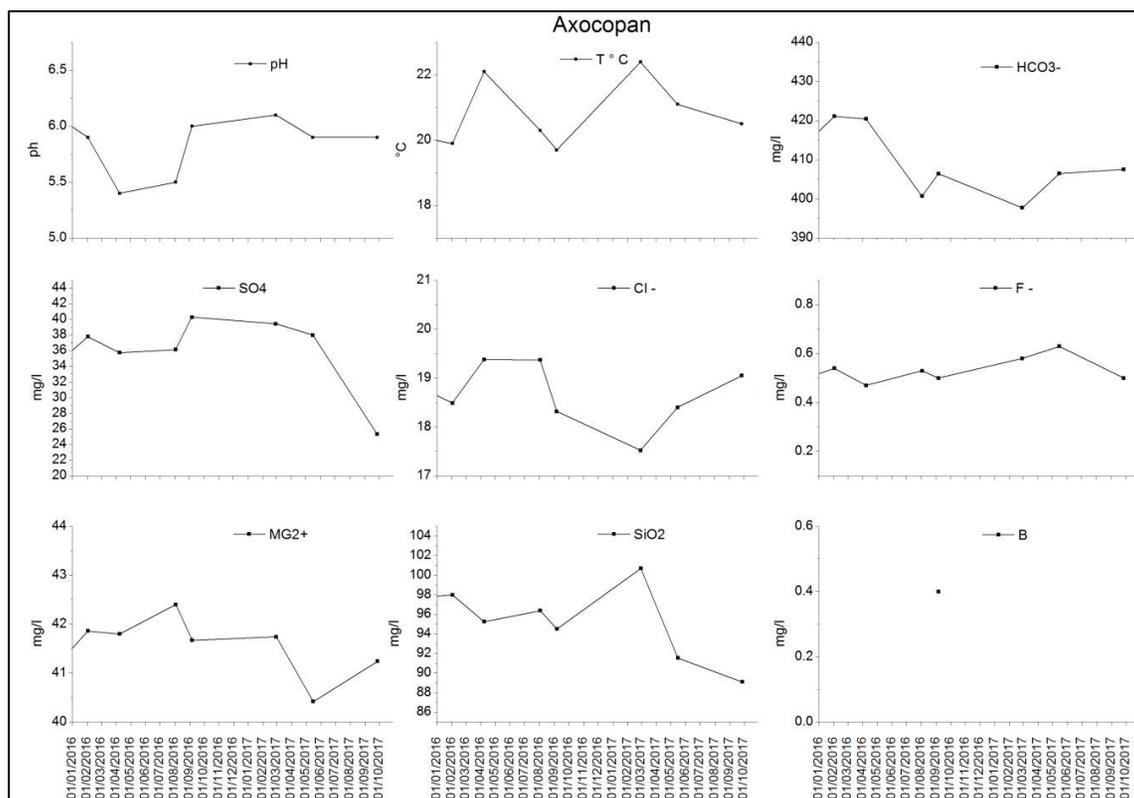


Figura 35a Resultados de los análisis químicos realizados a las aguas de los manantiales muestreados en el Popocatepetl. Se muestran las variaciones de estos manantiales desde enero de 2016

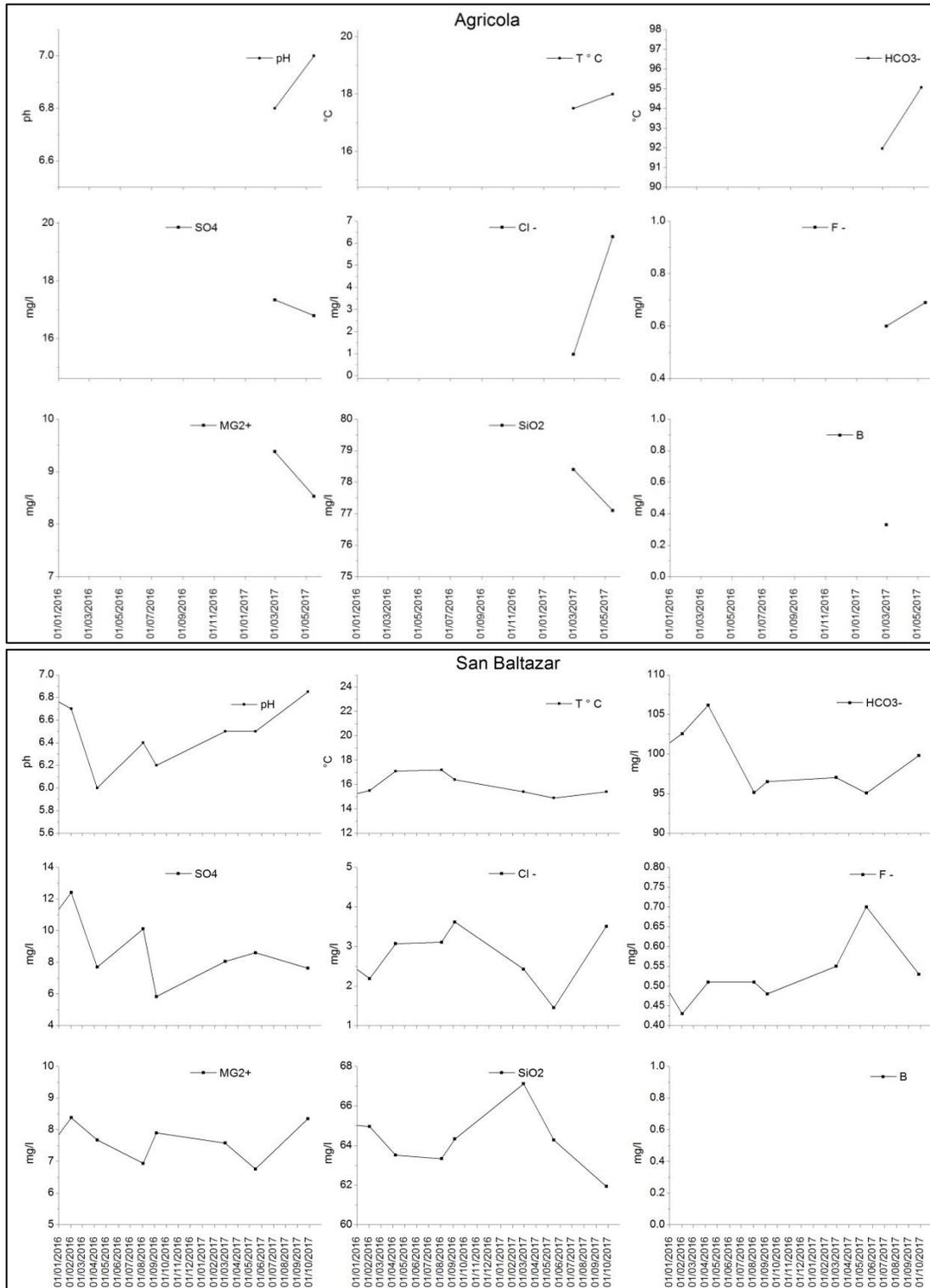


Figura 35b Resultados de los análisis químicos realizados a las aguas de los manantiales muestreados en el Popocatepetl. Se muestran las variaciones de estos manantiales desde enero de 2016

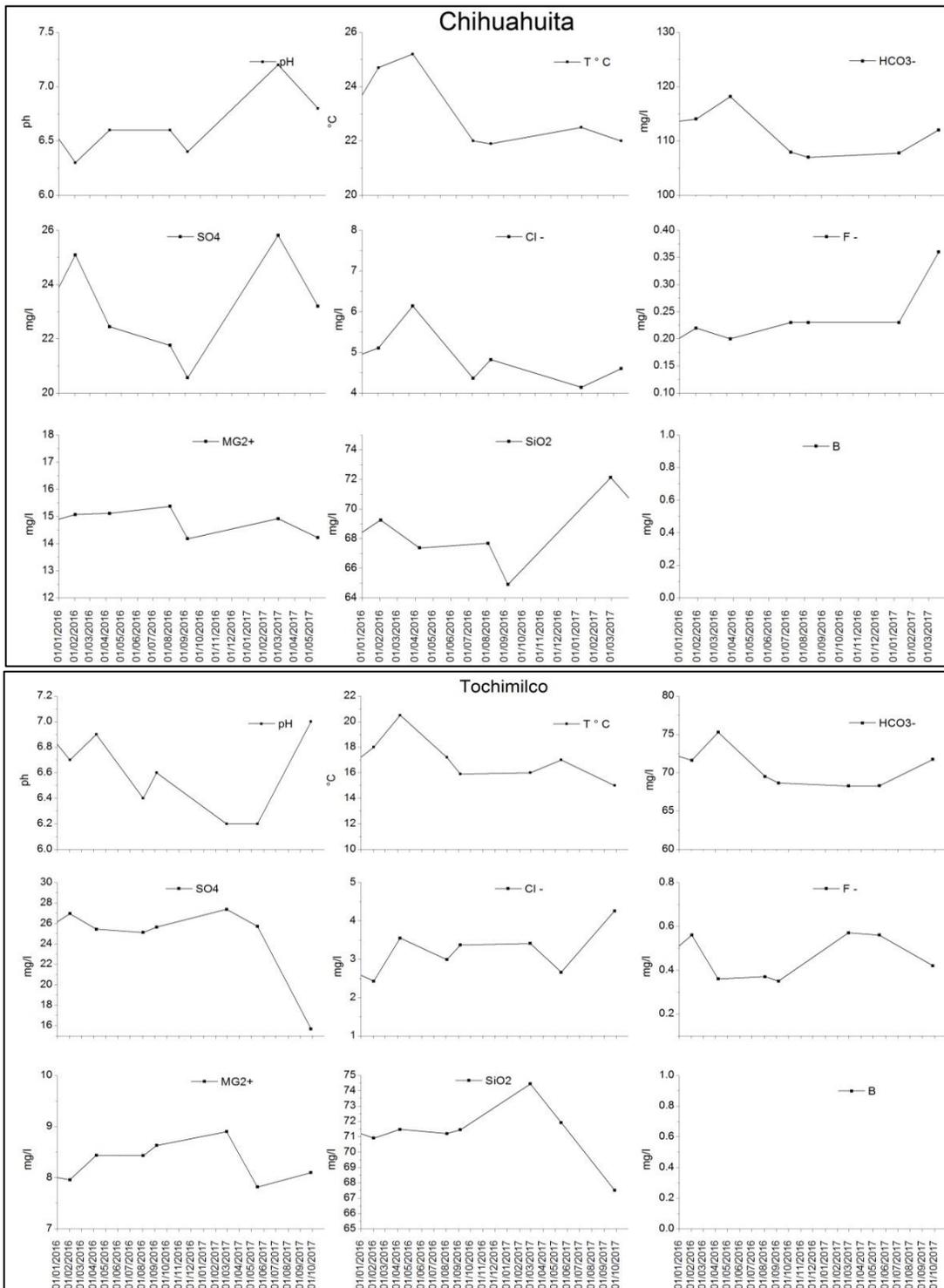


Figura 35c Resultados de los análisis químicos realizados a las aguas de los manantiales muestreados en el Popocatépetl. Se muestran las variaciones de estos manantiales desde enero de 2016

Los resultados observados en las aguas de los manantiales del Popocatépetl, sugieren que a lo largo del 2017, se mantuvo constante el aporte de gases volcánicos al acuífero.

Otros impactos del sismo del 19 de septiembre en el Popocatepetl

Después del sismo del 19 de septiembre, el Equipo de Análisis Rápido Avanzado (ARIA) en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA en Pasadena, California, y Caltech, también en Pasadena, crearon un Mapa de Procesamiento de Daños (DPM) para el centro de México. Representa zonas probablemente dañadas, mostradas por píxeles rojos y amarillos (Figura 36). El mapa se obtuvo a partir de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) de los satélites Copernicus Sentinel-1A y Sentinel-1B, operados por la Agencia Espacial Europea (ESA). Las imágenes utilizadas fueron tomadas antes del sismo (el 8 de septiembre de 2017) y después (el 20 de septiembre de 2017). Cada píxel mide unos 30 metros de diámetro. La variación de color del amarillo al rojo indica un cambio cada vez más significativo de la superficie del suelo.

Mediante trabajo de campo, se analizaron algunas de las zonas señaladas en el mapa y se corroboró que presentaban cambios significativos en el nivel del suelo, principalmente por deslizamientos de laderas inestables y agrietamientos (Figura 37).

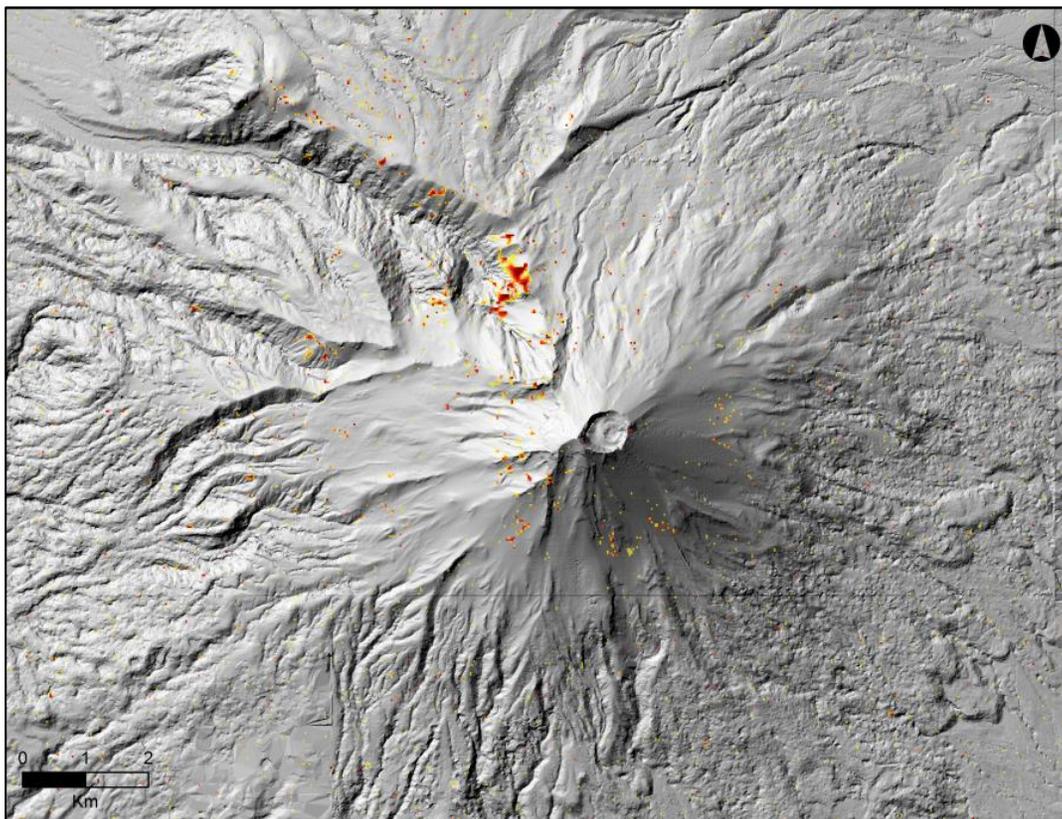


Figura 36 Zonas que sufrieron un cambio en el nivel del suelo en el Popocatepetl y áreas aledañas, después del sismo del 19 de septiembre de 2019



Figura 37 Deslizamientos y agrietamientos ocurridos en las laderas de las barrancas que drenan al volcán, como consecuencia del sismo del 19 de septiembre y las lluvias que ocurrieron en días posteriores

El 4 de octubre de 2017, hacia las 5 de la tarde, se reportó la ocurrencia de un flujo de lodo (también denominado lahar) en una de las barrancas que bajan del volcán Popocatepetl y cruzan la población de San Juan Tehuixtitlán, Estado de México. El 6 de octubre de 2017, personal de la Subdirección de Riesgos Volcánicos del CENAPRED realizó una evaluación de los depósitos de este lahar, con el objeto de determinar su causa, efectos y la posibilidad de que se generen eventos similares o mayores.

Como consecuencia del sismo del 19 de septiembre, personal de la Dirección de Investigación del CENAPRED ha documentado numerosos agrietamientos y deslizamientos de laderas en la región occidental del volcán Popocatepetl. El mismo 4 de octubre se recibieron fotografías de una serie de deslizamientos ocurridos en los parajes de Plan de Cazuelas, Plan de Majada y Joya de Huizintla, sobre las laderas de los cerros Techalotepec y Tlalpizotépetl, en la cabecera de la Cañada Hueyatenco (Figura 38).

El reconocimiento de campo efectuado el 6 de octubre permitió analizar el depósito dejado por el flujo de lodo. Se midieron espesores de entre 10 y 20 cm para el depósito, aunque las marcas dejadas por el flujo permitieron inferir que éste alcanzó espesores superiores a 0.5 m durante la ocurrencia del fenómeno (Figuras 39 a 42). Los muestreos efectuados permitieron realizar un análisis sedimentológico en el Laboratorio de Dinámica de Suelos del CENAPRED, a partir del cual se determinó que el flujo consistió primordialmente en partículas tamaño grava y arena, en una matriz con \gg 5% de arcilla, lo que le dio un carácter cohesivo al flujo de lodo.



Figura 38 Deslizamientos en la cabecera de la cañada Hueyatlaco



Figura 39 Medición de espesores del flujo en Tehuixtitlán

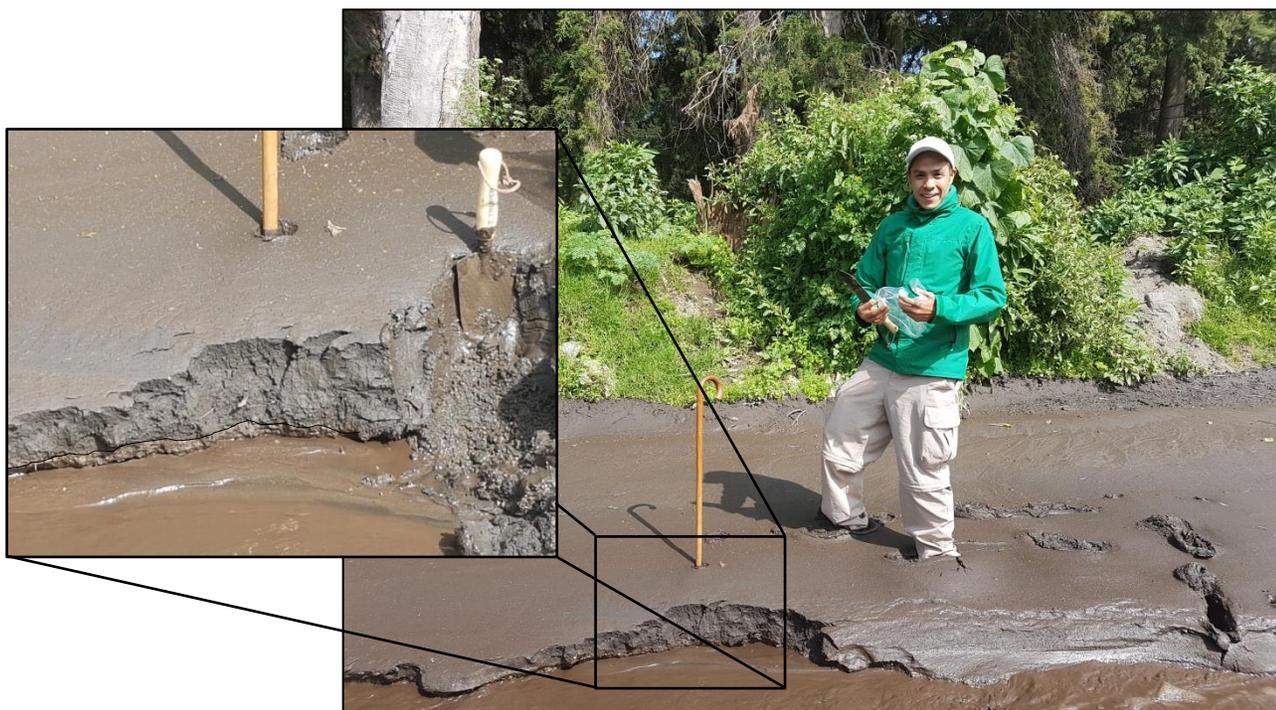


Figura 40 Muestreo del depósito del lahar; en el detalle puede verse que el lahar es muy arcilloso y está cubriendo arenas fluviales



Figura 41 Depósitos del flujo de lodo, relleno el fondo de la cañada Hueyatlaco en su parte media

Mediante el análisis de una imagen del Jet Propulsion Laboratory (JPL), de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de los Estados Unidos, obtenida mediante procesamiento interferométrico de dos imágenes del satélite Sentinel, antes y después del sismo, se pudo determinar con exactitud la zona de origen del lahar en la cabecera de la cañada Hueyatlaco, en el flanco oeste del Popocatepetl a una altitud de 3,600 a 3,800 msnm. Por otro lado, el reconocimiento de campo permitió determinar el curso que siguió el lahar y su alcance (Figura 42). Con estos datos, se determinó que el lahar tuvo un alcance de 23 km de longitud, llegando al menos hasta las cercanías de Nepantla. Se estimó un volumen de 810,000 m³ para el depósito, considerando un área de 1 km² cubierta por el depósito, con espesores de 0.2 m en la parte distal, 0.5 m en la parte media y de al menos 2 m en la porción proximal del depósito.

El análisis granulométrico de los sedimentos del lahar muestra que la mayor parte de los sólidos incluidos tienen su origen en los depósitos de tefra conocidos como Ceniza Negra (Espinasa-Pereña y Martin Del Pozzo, 2006), que tienen una edad aproximada de 450 a 800 años a.P. y cubren toda la parte alta del volcán. Estos depósitos han sido alterados a suelos arcillosos en las laderas por debajo del límite de la vegetación.

Como consecuencia del sismo del 19 de septiembre, numerosas laderas en los flancos de las abruptas cañadas que conforman todo el sector occidental del Popocatepetl presentaron evidencias de inestabilidad, como son agrietamientos y deslizamientos. Como lo mostró la imagen del JPL de la NASA (Figura 36), estas afectaciones se concentraron en las cabeceras de las barrancas Nexpayantla y Hueyatenco, que están erosionadas en los remanentes de uno de los edificios volcánicos anteriores al actual volcán Popocatepetl (Espinasa-Pereña y Martin Del Pozzo, 2006).

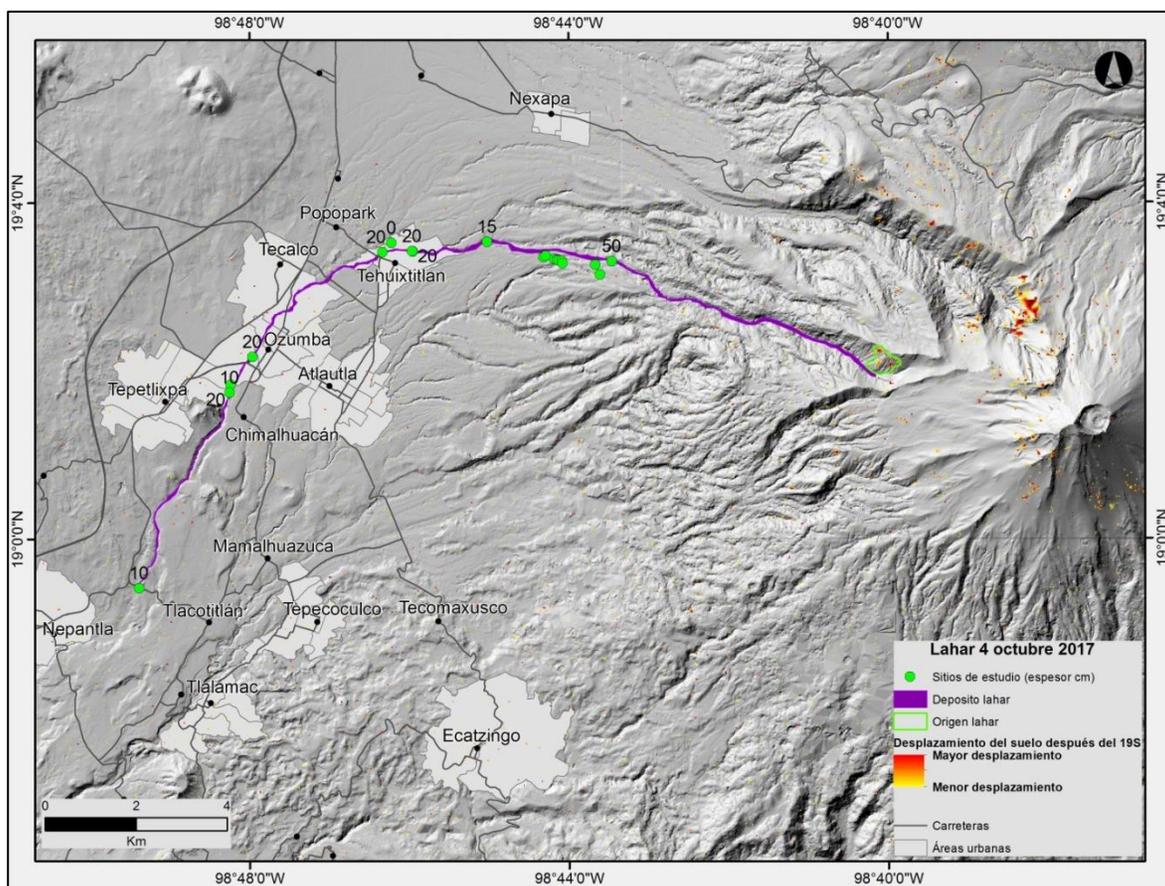


Figura 42 Mapa que muestra las áreas en que se originó el lahar, el alcance del mismo y los puntos de análisis y muestreo

Debido a las fuertes lluvias que afectaron la región entre el 19 de septiembre y el 4 de octubre, los materiales deslizados en la zona que comprende los parajes de Plan de Cazuelas, Plan de Majada y Joya de Huizintla, sobre las laderas de los cerros Techalotepec y Tlalpizatépetl, en la cabecera de la Cañada Hueyatenco, fueron removilizados, para producir una serie de flujos hiperconcentrados, que bajaron en varios pulsos, con gastos moderados, manteniéndose siempre en el cauce original del arroyo y sin desbordar el talweg, lo que explica el gran alcance que tuvieron a pesar del volumen moderado. El alcance de este lahar fue muy considerable, equivalente a un escenario intermedio en el mapa de peligros del volcán Popocatepetl; sin embargo, en dicho escenario se contemplan espesores de hasta 17 m en las barrancas más estrechas, mientras que los observados solamente tuvieron hasta 0.5 m.

En el volcán Popocatepetl se producen lahares asociados a lluvias intensas, sin actividad eruptiva relacionada, con relativa frecuencia (2007 en la barranca Acuitlapanoya, en el flanco sur, y en 2010 en la barranca Nexpayantla, en el flanco noroeste). Por ello, es posible que con nuevas lluvias se produzcan otros deslizamientos en la zona, que puedan dar origen a otros lahares de pequeñas dimensiones.

DIAGNÓSTICO

A lo largo del 2017 se construyeron y destruyeron 5 domos de lava; la construcción de estos domos estuvo asociada principalmente a episodios de actividad estromboliana, conocidos también como trenes de exhalaciones por su registro sísmico, con duraciones variables de hasta 6 horas, algunos también acompañados por episodios de tremor armónico. Durante el emplazamiento de los domos fue común la emisión de cenizas, los episodios más notables fueron los registrados durante el mes de noviembre, ya que de estos se reportó caída de ceniza en las comunidades de Tochimilco, Izúcar de Matamoros, Atlixco, Tepeojuma, San Pedro Benito Juárez y Huaquechula en el estado de Puebla; Totolapan, Yecapixtla, Zacualpan de Amilpas, Ocuituco y Tetela del Volcán, en el estado de Morelos, así como en Ecatzingo, en el Estado de México.

El registro de eventos de largo periodo se incrementó considerablemente, en comparación con el 2016. Las explosiones más importantes se registraron de septiembre a noviembre, mismas que generaron altura de columna de hasta 4 km y emisión de fragmentos incandescentes hasta 2 km del cráter. De septiembre a diciembre aumentó el número de sismos volcanotectónicos y de octubre a diciembre se registró el mayor número de sismos con magnitud mayor de 3, sobre todo después del sismo regional registrado el 19 de septiembre.

El análisis de las aguas de los manantiales mostró un comportamiento constante a lo largo del año, con variaciones al alza y a la baja en casi todos los iones analizados. Sin embargo, destaca la presencia de boro en una concentración de 0.33 mg/l, en el muestreo de marzo en el manantial Agrícola. Es posible que este incremento de boro esté relacionado con el incremento en el registro de tremor y explosiones que se presentó en mayo. En los muestreos realizados posteriormente no se encontró boro y las concentraciones de los iones analizados no presentaron cambios significativos.

El registro de anomalías térmicas por los dos sistemas de monitoreo mostró a lo largo del año, una tendencia a la baja y claramente es posible observar que el registro se agrupó en tres, con valores cada vez menores a excepción de la anomalía registrada al momento de la explosión del 17 de noviembre.

La tasa de emisión de SO₂ mostró a lo largo del año tres grupos de mayor emisión: entre enero y febrero, abril y mayo y octubre a diciembre con periodos de reposo entre cada grupo. Además, a lo largo de 2017, se realizaron tres campañas para la medición de gases con COSPEC; los valores arrojados por COSPEC son comparables con los datos registrados por el OMI. Hacia finales de año la emisión de SO₂ mostró una ligera tendencia a la baja.

Tras analizar los registros sísmicos, de anomalías térmicas, de emisión de gases y de monitoreo de manantiales, es posible inferir que durante 2018 la actividad en el Popocatepetl permanezca en niveles bajos. Es posible que se registren episodios de actividad estromboliana que acompañen a la formación de domos. Sin embargo, los domos formados en los últimos años han sido menores a 2 millones de metros cúbicos por lo que se espera que el volumen de los domos que se formen en 2018 sea de estas dimensiones, con periodos de vida de pocos días. No se descarta que se presenten también eventos explosivos que destruyan parcial o totalmente estos domos y que se generen caídas de ceniza en las localidades cercanas al volcán. Por lo anterior es necesario reforzar el sistema de monitoreo, especialmente en cuanto a la emisión de gases se refiere. Mantener al día y en condiciones óptimas las redes de monitoreo, permitirá detectar oportunamente cambios en el comportamiento del volcán.

Referencias

Espinasa-Pereña, R., and Martin-Del Pozzo, A.L., 2006, "Morphostratigraphic evolution of Popocatepetl volcano, México", in Siebe, C., Macías, J.L., and Aguirre-Díaz, G.J., eds., Neogene-Quaternary continental margin volcanism: A perspective from México: Geological Society of America Special Paper 402, Penrose Conference Series, p. 115-137.

Notas

El contenido de este informe se elaboró con datos proporcionados por los sistemas de monitoreo del CENAPRED, la red DOAS del Instituto de Geofísica de la UNAM, así como el Sistema MODVOLC de la Universidad de Hawái, el Atmospheric Chemistry and Dynamics Laboratory del Goddard Space Flight Center de la NASA, el Middle Infrared Observation of Volcanic Activity de las Universidades de Torino y Florencia e información proporcionada por el United States Geological Survey. Este informe ha sido elaborado como herramienta para la discusión interna del estado de actividad del volcán Popocatepetl, entre los miembros del Comité Científico Asesor y el equipo del CENAPRED. La información y datos contenidos en el mismo no pueden ser reproducidos sin previa autorización de los especialistas que elaboraron este informe.

Elaboraron: Gema Victoria Caballero Jiménez, Amiel Nieto Torres, Ramón Espinasa Pereña, Elizabeth Castañeda Bastida, Ariadna Hernández Oscoy, Adriana Ramírez Castillo, Lilia Calva Rodríguez,.

Responsables del mantenimiento de los equipos que generan los datos:

Paulino Alonso, Margarita Vidal, Diana Vázquez, Felipe Paniagua, Lucio Cárdenas, Ricardo Calderón y Oscar Rodríguez

Guardia de fin de semana y días festivos: Cristina García.

Guardia nocturna: Juan Rosales, Arturo Gascón, Martín Peña y Germán Espitia.