

**SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

**INFORME DEL PROYECTO:
ACTIVIDAD DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL
AÑO 2012**

Amiel Nieto Torres

Dolors Ferrés i López

Thalía A. Reyes Pimentel

Ramón Espinasa Pereña

Xóchitl Flores Soto

Alberto Enrique González Huesca

Andrés Ramírez Soto

Dirección de Investigación
Subdirección de Riesgos Geológicos

Marzo 2013

Contenidos

El Volcán Popocatepetl y las redes de monitoreo volcánico

Resumen de la actividad volcánica durante 2012

Actividad sísmica

- Exhalaciones
- Tremor y trenes de exhalaciones
- Sismos volcanotectónicos
- Derrumbes y flujos
- Otras señales relevantes
- Energía sísmica liberada

Actividad explosiva

- Características de los eventos explosivos más relevantes
- Distribución de la caída de ceniza asociadas a los eventos explosivos

Anomalías Térmicas

Monitoreo de gases

- Mediciones con la Red DOAS
- Mediciones con el COSPEC

Monitoreo de deformación (inclinometría)

Monitoreo geoquímico de aguas

Presencia de domos

Diagnóstico y Pronóstico

Semáforo de Alerta Volcánica

Referencias

Anexos

El Volcán Popocatépetl y sus redes de instrumentación

El volcán Popocatépetl es un estratovolcán andesítico-dacítico localizado al oriente del Cinturón Volcánico Transmexicano (19.02° N, 97.27° W), limítrofe a los estados de México, Puebla y Morelos (Figura 1). Es la segunda cumbre más alta del país, con una altitud de 5452 msnm.

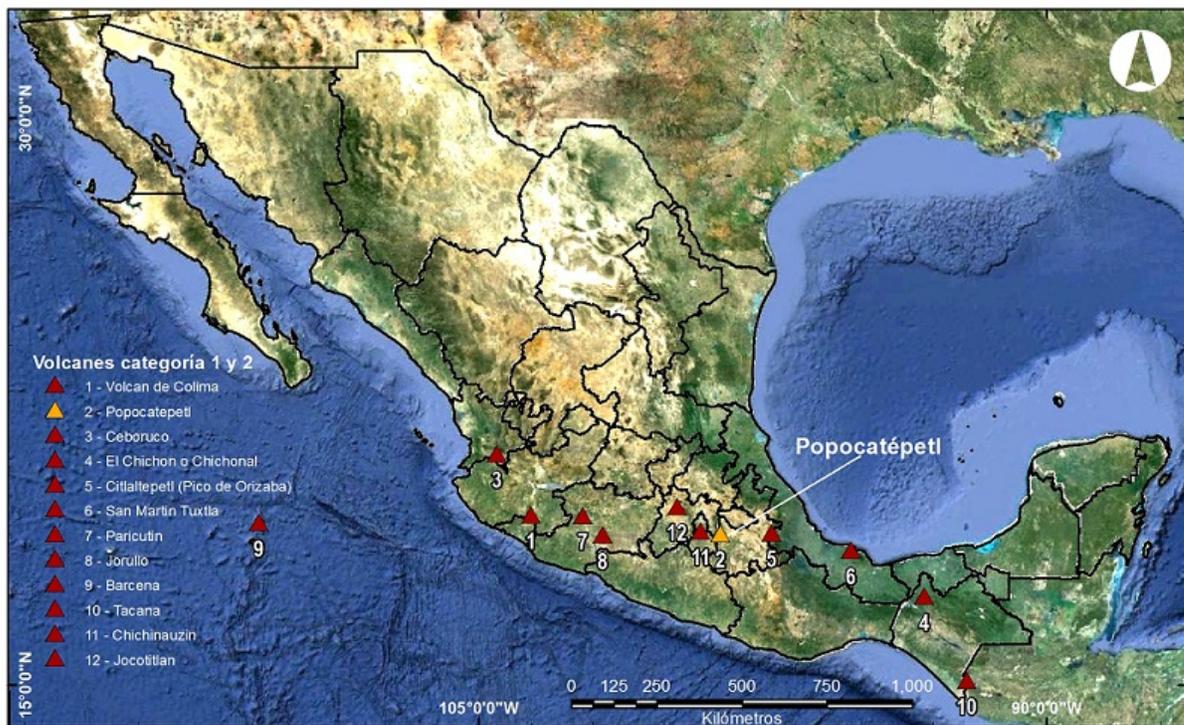


Figura 1 Localización del volcán Popocatépetl en el Cinturón Volcánico Transmexicano

El Popocatépetl es uno de los doce principales volcanes activos del país, considerados de categoría 1, ya que cuenta con un largo historial de actividad eruptiva, bien conocida en los últimos 23,000 años. Ha tenido actividad histórica reciente, iniciando su último ciclo de actividad en 1994 que continua hasta el presente.

Ha presentado diversas tipologías de actividad eruptiva, desde erupciones explosivas hasta erupciones efusivas con la emisión de derrames de lava (Macías et al, 1995). En este último ciclo de actividad, las erupciones explosivas han sido mayoritariamente de tipo vulcaniano, con componente freática y freatomagmática; sin embargo, en el registro prehistórico de erupciones se han identificado y caracterizado diversas erupciones de mayor magnitud, subplinianas y plinianas.

La actividad actual del volcán Popocatepetl representa diferentes niveles de peligro según su magnitud e intensidad y un riesgo latente para la población asentada en su proximidad. Es por ello que es necesaria la vigilancia permanente de este volcán y la evaluación de su peligrosidad.

Desde 1995, el CENAPRED opera diferentes redes de instrumentación en el volcán Popocatepetl, para el monitoreo sísmico, de infrasonido, de deformación, de gases, de flujos y visual (Figura 2). Adicionalmente, se realizan campañas de campo para el monitoreo geoquímico de aguas y mediciones discretas de gases mediante el espectrómetro de correlación COSPEC.

En 2012, la red de instrumentación del volcán Popocatepetl (Figura 2) contó con un total de 21 equipos de monitoreo: 8 estaciones sísmicas (4 sensores triaxiales de periodo corto y 4 sensores triaxiales de banda ancha), 2 equipos para el monitoreo de infrasonido, 2 inclinómetros analógicos para el monitoreo de deformación, 3 equipos DOAS para la medición en tiempo real de la emisión de dióxido de azufre (SO₂), 2 geófonos para el monitoreo de flujos y 3 web-cam para el monitoreo visual en tiempo real. Una cuarta cámara para el monitoreo visual fue instalada en Tochimilco, en la ladera sur del volcán, durante el mes de mayo de 2012, con motivo del incremento de actividad registrado desde abril. El mantenimiento y operación de la red de instrumentación está a cargo del Área de Instrumentación Volcánica de la Dirección de Instrumentación y Cómputo del CENAPRED.

Las principales incidencias con los equipos de monitoreo fueron:

- Baja en el funcionamiento de la estación sísmica de periodo corto en Canario. Los niveles de actividad en el volcán no permitieron el acceso a esta estación para darle mantenimiento.
- Fallas en la operación de los equipos sísmicos en Chipiquixtle, que fueron solventados.
- Funcionamiento parcial de la red DOAS a partir de septiembre de 2012, debido a la falta de componentes para su sustitución.
- Funcionamiento incorrecto del inclinómetro instalado en Chipiquixtle. Este equipo dejó de transmitir datos desde julio de 2012. Se instaló un nuevo equipo en esta localización en diciembre de 2012.

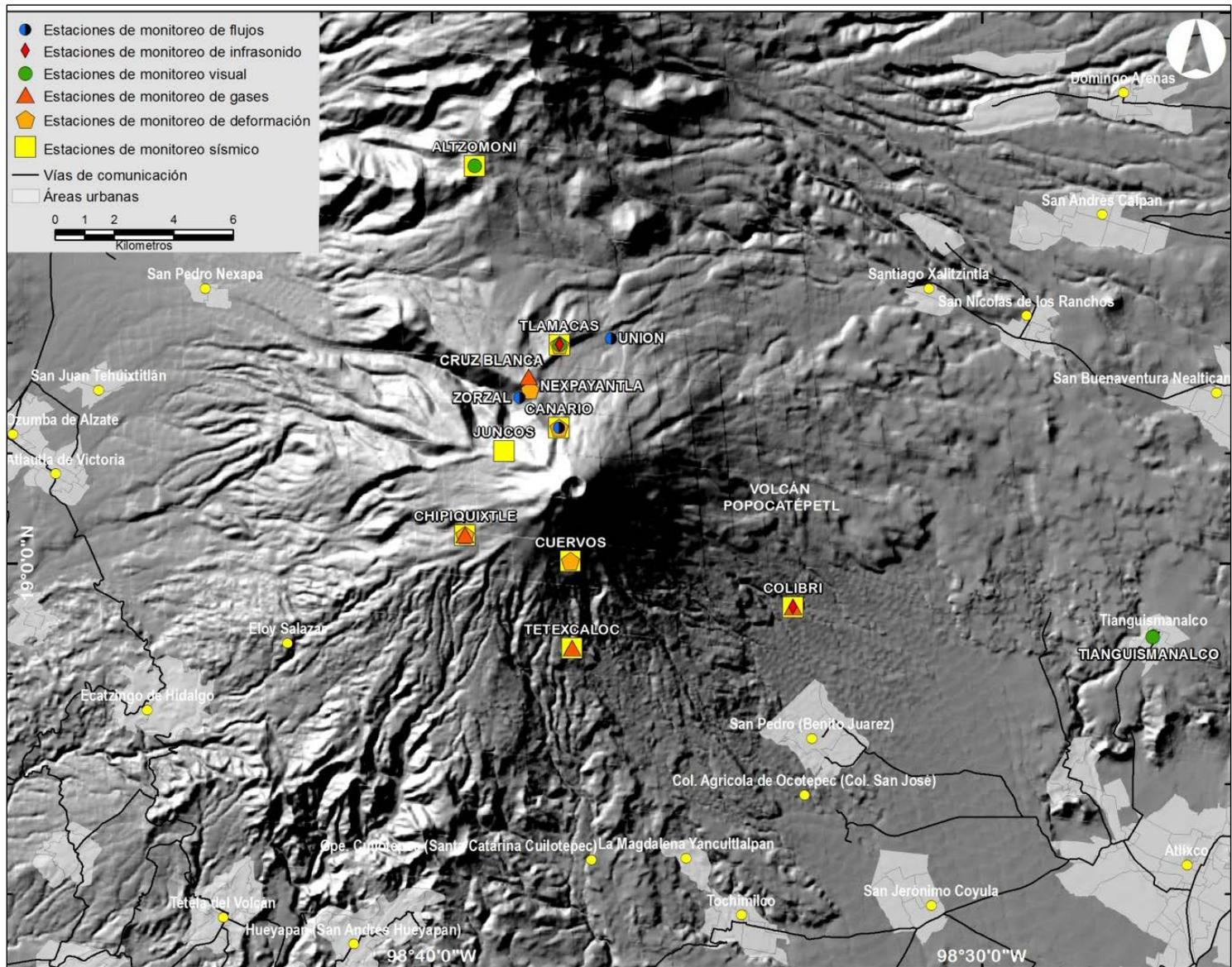


Figura 2 Localización de las redes de instrumentación del Volcán Popocatepetl para el monitoreo sísmico, de deformación, de gases, de flujos y visual

Resumen de la actividad volcánica durante 2012

El volcán Popocatepetl presentó diversos episodios de actividad eruptiva durante el año 2012. El 25 de enero, 6 de agosto y 10 de septiembre presentó explosiones discretas de tipo vulcaniano, de segundos a un minuto de duración en su fase intensa, que generaron columnas de gases y cenizas de 2 a 4 km de altura, acompañadas por la emisión de fragmentos balísticos sobre las laderas del volcán, similares a las ocurridas en los últimos meses de 2011 (26 de septiembre y 20 de noviembre de 2011). También se produjo la emisión de fragmentos incandescentes asociadas a exhalaciones con componente explosivo durante los últimos meses de 2012, los días 16, 20 y 25 de octubre, del 12 al 17 y el 23 de noviembre y el 17 de diciembre.

La actividad eruptiva más relevante se produjo durante los meses de abril y mayo, asociada a un incremento acelerado de la sismicidad y de la tasa de emisión de dióxido de azufre, con la emisión frecuente de fragmentos incandescentes a distancias cortas sobre las laderas del volcán. También se emitieron columnas de gases y cenizas persistentes por varias horas, que produjeron la caída de ceniza principalmente en poblaciones del sector este del edificio volcánico (Estado de Puebla), pero también, durante los primeros días de mayo, en San Pedro Nexapa, Amecameca, Ozumba e incluso en la porción sureste del Distrito Federal. El conjunto de esta actividad se relacionó al proceso de emplazamiento y destrucción de domos en el interior del cráter, con una tasa de crecimiento mayor que la registrada en meses anteriores. Durante los días del 8 al 10 de mayo, la caída y deposición de cenizas provocó el cierre del Aeropuerto Internacional "Hermanos Serdán" del Estado de Puebla.

Entre abril y agosto, coincidiendo con la época de lluvias, se registraron disparos en las estaciones de flujo del volcán. Mediante fotografías pudo corroborarse la ocurrencia de pequeños flujos de agua y lodo en siete ocasiones. Los eventos más importantes se registraron el 16 de abril, el 29 de julio y el 10 de agosto, todos en la quebrada Huiloac, sin que estos llegaran a alcanzar las partes bajas del volcán.

La actividad del volcán se mantuvo dentro de parámetros normales durante el primer trimestre del 2012. El evento eruptivo más relevante de este periodo fue la explosión del 25 de enero, que generó una columna de gases y cenizas de 3 km y probablemente la emisión de fragmentos balísticos sobre las laderas del volcán. La explosión estuvo precedida y seguida por el registro de segmentos de tremor armónico y espasmódico de baja amplitud, entre el 19 y el 31 de enero.

Durante febrero y marzo continuaron registrándose segmentos de corta duración de temblor armónico y espasmódico de baja amplitud. Entre los días 10 y 17 de febrero se presentó un incremento en la actividad sísmica y en los registros de la tasa de emisión de dióxido de azufre (con un máximo el 16 de febrero de 14,300 t/día), que se asociaron al emplazamiento de un nuevo domo en el interior del cráter. En la última quincena de marzo se contabilizaron 15 eventos volcanotectónicos, el último de los cuales inmediatamente anterior al registro de un tren de exhalaciones, de mediana y gran amplitud, de 10 horas de duración, el 30 de marzo. Se consideró que este evento dio lugar al crecimiento del domo emplazado durante febrero.

Este tren de exhalaciones fue precursor del incremento acelerado de actividad que se presentó a partir del 13 de abril hasta el 3 de junio, con variaciones al alza en varios de los parámetros monitoreados:

- Registro de bandas de temblor espasmódico y armónico de mediana y gran amplitud, asociadas al ascenso de material magmático y al emplazamiento-destrucción de pequeños domos en el interior del cráter.
- Incrementos en la tasa de emisión de gases volcánicos con más de 20,000 t/día el 19 de abril
- Cambios geoquímicos en muestras de manantiales y cenizas.
- Incremento en la altura de las plumas de gases, que alcanzaron frecuentemente los 2 km.
- Incremento de la incandescencia observable durante la noche.
- Emisión de fragmentos incandescentes y de columnas de gases y cenizas persistentes por varias horas.

Durante los meses de junio y julio la actividad eruptiva disminuyó y la sismicidad se caracterizó por la reaparición de señales de largo periodo (exhalaciones), algunas de ellas acompañadas por pulsos de la pluma de gases con leves a moderados contenidos de ceniza. Sin embargo, durante estos dos meses se incrementó el registro de sismos volcanotectónicos, contabilizándose un total 57 eventos.

La actividad sísmica presentó un descenso significativo durante los últimos días de julio, así como plumas de vapor de agua y gases débiles, delgadas, y discontinuas, ocasionalmente de coloración azulada. Esta disminución de la actividad precedió la explosión del 6 de agosto, la más importante de 2012, la cual generó una columna de gases y cenizas de 4.5 km de altura sobre el cráter y la emisión de fragmentos balísticos a distancias de 1 km sobre las laderas del volcán. Con posterioridad a esta explosión, la actividad sísmica en agosto y septiembre, fue regresando paulatinamente a la normalidad, aunque sin recuperar los niveles previos a la crisis de abril y mayo.

Se produjo una nueva explosión el 10 de septiembre que produjo una columna de gases y cenizas de 2 km. Esta explosión fue de menor intensidad que la de agosto, seguida por el registro de diversos segmentos de tremor el día 11. La semana entre el 14 y el 21 de septiembre, se produjo un incremento de la actividad sísmica que se tradujo en la producción de diversas plumas de gases y cenizas con alturas superiores a 1 km, lo cual no se había observado desde el la primera semana de agosto. Se registraron también tasas de emisión de dióxido de azufre puntuales superiores a 10,000 t/día. Se asoció esta actividad al emplazamiento de un nuevo domo.

Estos datos indicaron el inicio de un nuevo incremento de la actividad, que se confirmó en los meses siguientes. Aun manteniéndose dentro de los parámetros normales, entre octubre y diciembre se registró un incremento en el promedio mensual de exhalaciones, así como el registro de diversos segmentos de tremor armónico de baja amplitud. Algunas de estas exhalaciones tuvieron componente explosiva, generando la emisión de fragmentos incandescentes y columnas de gases con ceniza, de entre 1 y 2.5 km, las más importante ocurrió el 2 de diciembre. En estos tres meses se registraron también 18 sismos volcanotectónicos. La actividad sísmica del período de agosto a diciembre no supuso incrementos significativos en la energía sísmica acumulada.

A partir de la segunda quincena de diciembre y en especial a partir del 24, se observan cambios en la sismicidad del volcán Popocatépetl, registrándose exhalaciones de alta frecuencia. La emisión de gases mostró una clara tendencia al alza al final del mes, con registros de 12,800 y 20,700 t/día los días 30 y 31 de diciembre respectivamente, los segundos valores más importantes registrados durante 2012.

El conjunto de la actividad sísmica y de emisión de gases en el volcán Popocatépetl se asoció a un proceso de emplazamiento, crecimiento, sellamiento y destrucción de domos, que pudieron ser observados en diversas ocasiones. La tasa de emplazamiento de material en el interior del cráter incremento en el período de abril a julio coincidiendo con el período de mayor actividad sísmica. Desde final del año 2011, en que se observó el domo núm. 35, se han podido observar seis nuevos domos, hasta el núm. 41 en diferentes etapas de crecimiento y destrucción. Es muy probable que el último domo observado se destruyera parcialmente durante noviembre y diciembre y que a finales de este mes se emplazara nuevo material magmático en el interior del cráter.

El incremento de la actividad volcánica entre los meses de abril y agosto, dio lugar al cambio del semáforo de alerta volcánica, que se elevó a Amarillo Fase 3, entre el 16 de abril y el 31 de agosto. El resto del año el semáforo se mantuvo en Amarillo Fase 2.

Actividad sísmica

El volcán Popocatepetl presentó un incremento de su actividad a partir de la segunda mitad de 2011. Se produjeron explosiones vulcanianas el 26 de septiembre y el 20 de noviembre. Posteriormente se registraron segmentos de tremor armónico de mediana y gran amplitud el 18 de diciembre de 2011 (1h 30 min) y el viernes 30 de diciembre, de menor amplitud que los del día 18 (1/4 de la amplitud), pero con picos de frecuencia similares y con una duración de 1 h. 17 min.

Posterior a estos eventos y durante el primer trimestre de 2012 la actividad sísmica en el volcán se mantuvo dentro de parámetros normales, aunque se registró un incremento en el número global de exhalaciones por mes, con relación a noviembre y diciembre de 2011, y un cambio en la tipología de estas señales. En la última quincena de enero se registraron nuevos segmentos de tremor armónico y espasmódico a partir del día 19 de diciembre y hasta final de mes, de menor amplitud que los registrados en diciembre. El 25 de enero se produjo una nueva explosión, de menor intensidad que la del 20 de noviembre de 2011, pero de tipología similar, que generó una columna de gases y cenizas de 3 km de altura.

Durante febrero y marzo continuaron registrándose segmentos cortos de tremor armónico de baja amplitud, los cuales no supusieron variaciones significativas en los niveles de energía acumulada. Sin embargo entre el 10 y 17 de febrero se presentó un incremento en el número de exhalaciones por día, coincidente con un incremento en las tasas de emisión de dióxido de azufre. En el mes de marzo la actividad de exhalaciones se mantuvo baja, pero se registraron 15 eventos volcanotectónicos, a partir del día 12 de este mes, lo que supuso un incremento en la energía acumulada de este tipo de señales.

El último de esta serie de sismos volcanotectónicos se registró inmediatamente antes del inicio de un tren de exhalaciones el 30 de marzo. Este evento fue similar a los ocurridos en 1994, 1997, 2000, 2003 y 2008 y se prolongó por 10 horas, durante las cuales se registraron más de 500 exhalaciones de mediana y gran intensidad. El tren representó un incremento significativo en los niveles de energía sísmica liberada y fue asociado al crecimiento del domo emplazado en febrero en el interior del cráter. El conjunto de esta actividad confirmó la tendencia al alza de la sismicidad que se había venido registrando desde la segunda mitad de 2011.

Después del tren de exhalaciones del día 30, el volcán Popocatepetl presentó unos días de relativa calma sísmica, pero incrementó de nuevo su actividad a partir del 6 de abril, con el registro de escasas exhalaciones de baja intensidad, pero con algunos sismos volcanotectónicos y trenes de exhalaciones de

varios minutos de duración. A partir del 13 de abril y hasta el 3 de junio (con excepción del periodo entre el 27 de abril y el 2 de mayo), se generalizó el registro de segmentos de varias horas de tremor espasmódico y armónico de mediana y gran amplitud, en muchas ocasiones mezclado, así como de trenes de exhalaciones de mediana y gran intensidad. Los días con mayor actividad sísmica y actividad eruptiva asociada fueron el 13, 14, 16 y 20 de abril y del 2 al 5, del 10 al 11 y del 20 al 23 de mayo. Adicionalmente, en estos dos meses se registraron 16 eventos volcanotectónicos.

Durante los meses de junio y julio la actividad eruptiva disminuyó y la sismicidad se caracterizó por la reaparición de señales de largo periodo, que en julio fueron mayoritariamente de mediana y gran amplitud. Sin embargo, la característica más relevante de la sismicidad de estos dos meses fue el incremento en el registro de sismos volcanotectónicos, contabilizándose un total 57 eventos y de señales híbridas de volcanotectónicos.

La explosión del 6 de agosto, la más importante de 2012, que generó una columna de gases y cenizas de 4 km, fue precedida por un descenso significativo de la actividad sísmica, tanto en el número de exhalaciones como de sismos volcanotectónicos, desde los últimos días de julio. Durante el resto del mes de agosto y septiembre los niveles de actividad sísmica estuvieron dentro de los parámetros normales, registrándose un promedio mensual de 700 exhalaciones. Los primeros días de septiembre se registró una relativa calma sísmica, que fue seguida por un nuevo evento explosivo el 10 de septiembre, seguido por segmentos de tremor armónico de mediana amplitud el día 11. Durante los meses de agosto y septiembre se registraron 24 sismos volcanotectónicos.

Entre octubre y diciembre se registró un promedio mensual de 1500 exhalaciones, lo que supuso un incremento notable con relación a los meses previos. Algunas de estas exhalaciones tuvieron componente explosiva y dieron lugar a la emisión de fragmentos incandescentes los días 16, 20 y 25 de octubre, del 12 al 17 y el 23 de noviembre y el 17 de diciembre. Aunque no se registraron trenes de exhalaciones durante el último trimestre del año, sí se observaron periodos de varios días con un mayor número de exhalaciones, que presentaron una cierta ciclicidad intercalándose con el registro de segmentos cortos de tremor armónico de baja amplitud. Durante estos tres meses se registraron 22 eventos volcanotectónicos. Cabe destacar que durante el mes de octubre se registraron numerosas señales asociadas a derrumbes en el interior del cráter.

El resumen de la actividad sísmica del año 2012 se presenta en la Figura 12 y en la Tabla 1.

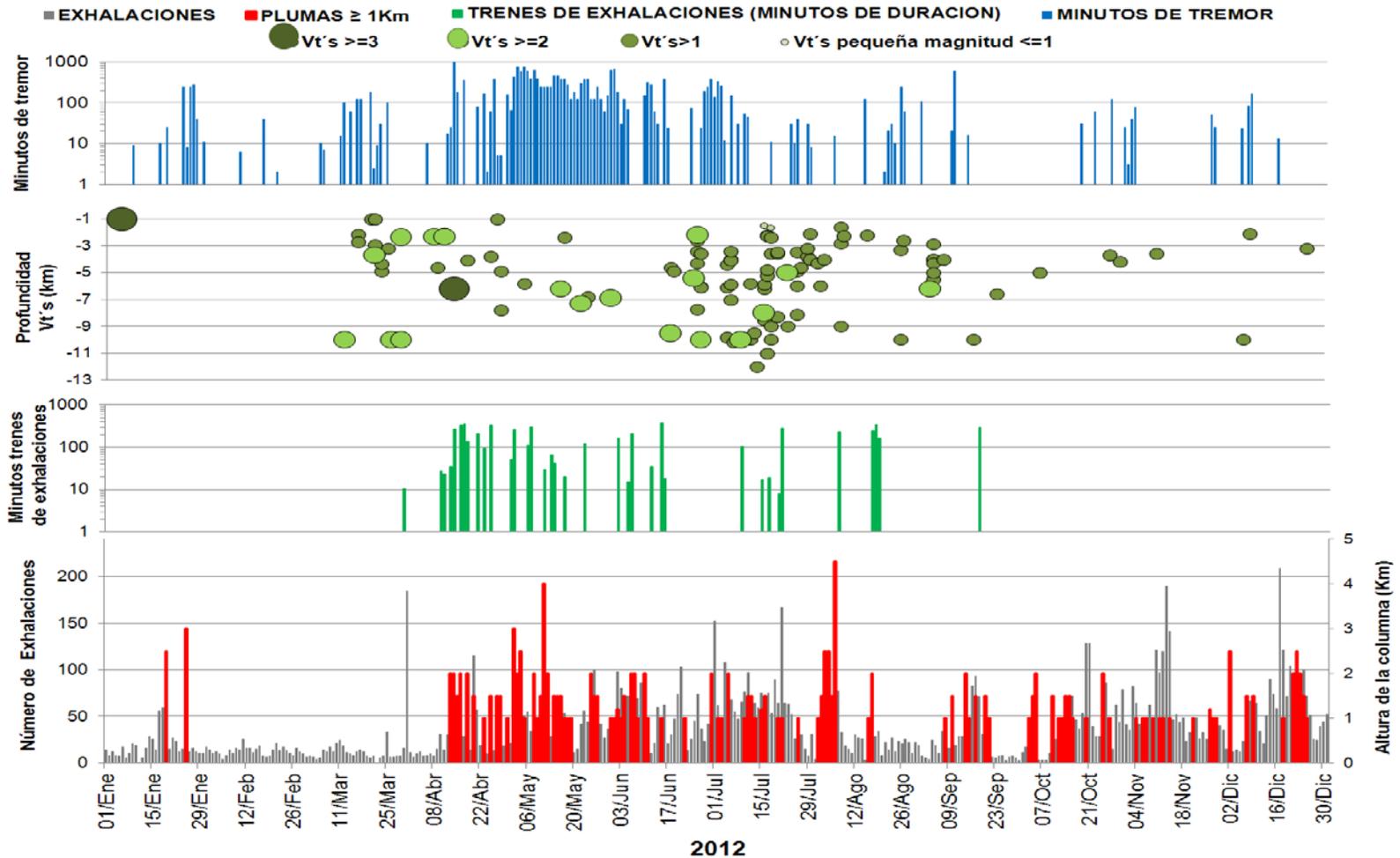


Figura 2 Resumen de la sismicidad registrada por el sistema de monitoreo del volcán Popocatépetl durante 2012

Tabla 1. Resumen de la sismicidad del volcán Popocatepetl - Abril a Agosto de 2012

MESES	EXHALACIONES	EXPLOSIONES	DERRUMBES	VT	TRENES EXH. (Horas)	TREMOR (Horas)
ENERO	527	2	7	3	0	15.75
FEBRERO	365	0	4	3	0	1.42
MARZO	357	0	1	21	13.2	15.6
ABRIL	310	2	3	10	29.57	38.17
MAYO	1135	3	1	6	16.6	185.5
JUNIO	1495	0	0	14	13.42	52.63
JULIO	1847	0	0	43	7.02	16.68
AGOSTO	738	1	5	11	4.18	16.27
SEPTIEMBRE	711	7	0	13	3.28	10.65
OCTUBRE	1244	12	88	17	0.8	10.92
NOVIEMBRE	1674	11	2	2	0.42	0.93
DICIEMBRE	1755	9	2	6	0	3.37
TOTAL	12158	47	113	149	88.49	367.89

a) Exhalaciones y Trenes de exhalaciones

En el transcurso del año 2012, se contabilizaron un total de 12,158 exhalaciones de baja y mediana intensidad (Figura 3), con un incremento en la tasa de exhalaciones por día notable a partir de marzo y significativo durante abril-julio. También fue notable el incremento en el número de exhalaciones por día entre octubre y diciembre. Durante los meses de enero a marzo se registró un ligero incremento en el número mensual de exhalaciones con relación a los meses de noviembre y diciembre de 2011: 527 en enero, 365 en febrero y 357 en marzo (Figura 3). El número de exhalaciones por día se mantuvo entre 5 y 20. La mayor parte de estas exhalaciones fueron de baja intensidad, solamente 60 de ellas estuvieron acompañadas por leves cantidades de ceniza.

Las exhalaciones registradas durante el primer trimestre de 2012 fueron principalmente de tipo 1 (De la Rosa et al., 1995) y de tipo híbrido (Figura 4), mientras que en los últimos meses de 2011 fueron principalmente de tipo 2 y 3. Estas exhalaciones se combinaron en el mes de marzo con exhalaciones de tipo 4 (Figura 5), las cuales tuvieron predominancia

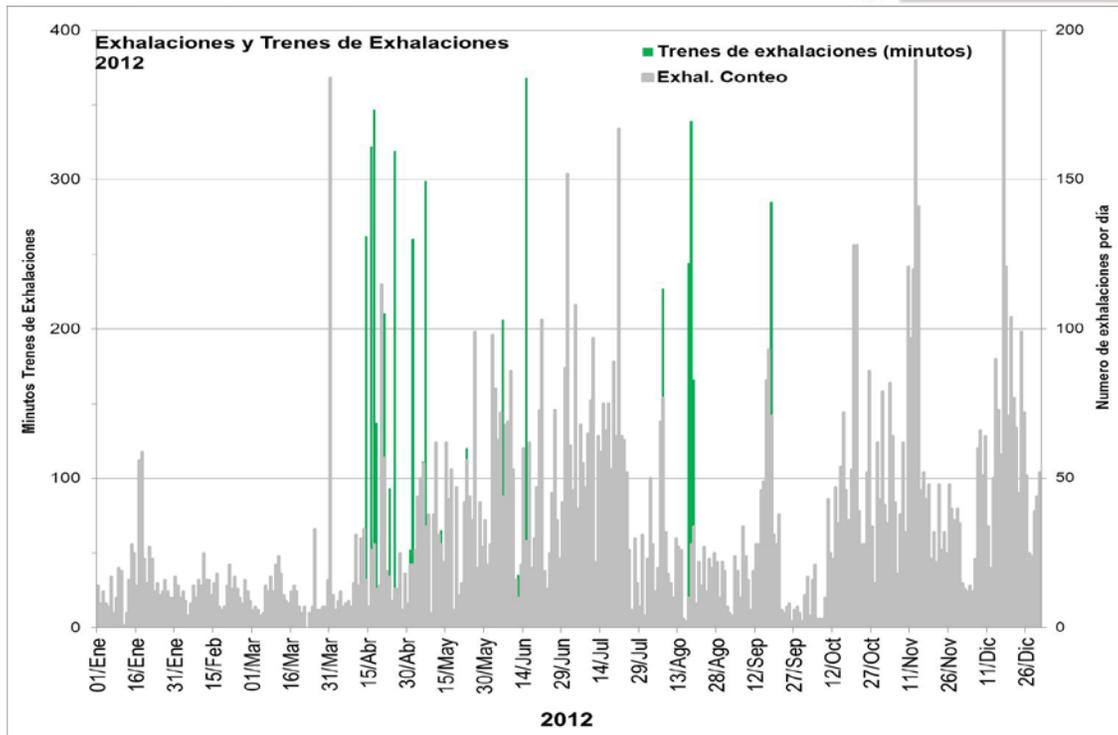


Figura 3 Exhalaciones por día de baja y moderada intensidad registradas en el sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl durante 2012. Las barras en verde indican el registro de trenes de exhalaciones (en minutos)

Durante la primera quincena de abril, se registró un número de exhalaciones similar a los meses anteriores. A partir del 13 de abril, se generalizó el registro de trenes de exhalaciones de mediana y gran intensidad alternándose con bandas de tremor armónico y espasmódico de gran amplitud (ver apartado siguiente) y con exhalaciones aisladas. En abril se contabilizaron 310 exhalaciones aisladas, número similar a los meses anteriores, pero en mayo se contabilizaron 1135.

En la segunda parte de abril y en los meses siguientes la tipología de las exhalaciones refleja cambios importantes con relación al primer trimestre del año, incrementando también en número y en amplitud. Durante los meses de junio y julio se registraron un promedio de 1,500 exhalaciones mensuales (1495 en junio y 1847 en julio). Aunque muchas exhalaciones aisladas y también en el interior de los trenes de exhalaciones fueron de tipo 2 (De la Rosa et al., 1995), se registraron numerosas señales clasificadas como de Tipo 5 (o N, Figura 7) y de Tipo 7 (De la Rosa et al., 1995; Figura 8), las cuales incrementan en número entre junio y agosto.

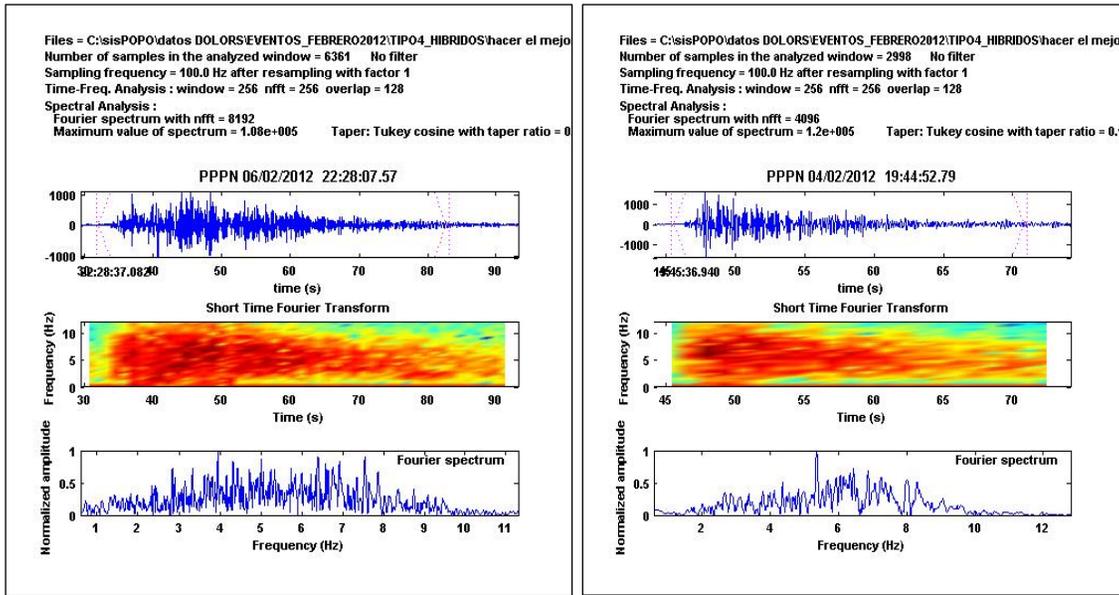


Figura 4 Señales sísmicas de tipo híbrido registradas en la estación Canario los días 4 y 6 de febrero de 2012

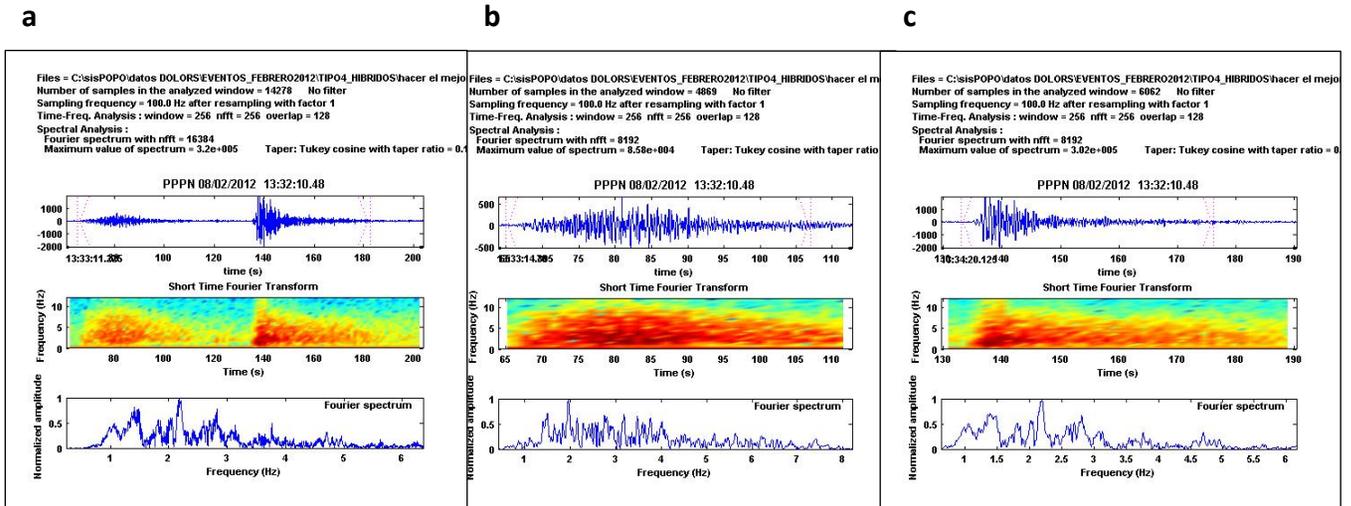


Figura 5 Traza, espectrograma y espectro de la exhalación tipo 4 registrada en la estación Canario el 8 de febrero a las 13:33 GMT: a) señal completa; b) primera sección de la señal con mayores amplitudes en un rango de frecuencia más alto; c) segunda parte de la señal con amplitudes en valores de frecuencia más bajas. Estas señales fueron predominantes durante el mes de marzo

En abril se contabilizaron 25 señales de de Tipo N (Figura 7), Estas señales se caracterizan por presentar un corto rango de frecuencias, con un pico principal entre los 2 y 2.8 Hz, por lo que se han

denominado también monocromáticas. Suelen tener duraciones cercanas al minuto, alcanzando su máxima amplitud en pocos segundos, la cual decae bruscamente. Este tipo de exhalaciones continúan registrándose en los meses de mayo a julio, especialmente en junio cuando se contabilizan hasta 70 señales de este tipo. En agosto prácticamente no se presentan este tipo de exhalaciones.

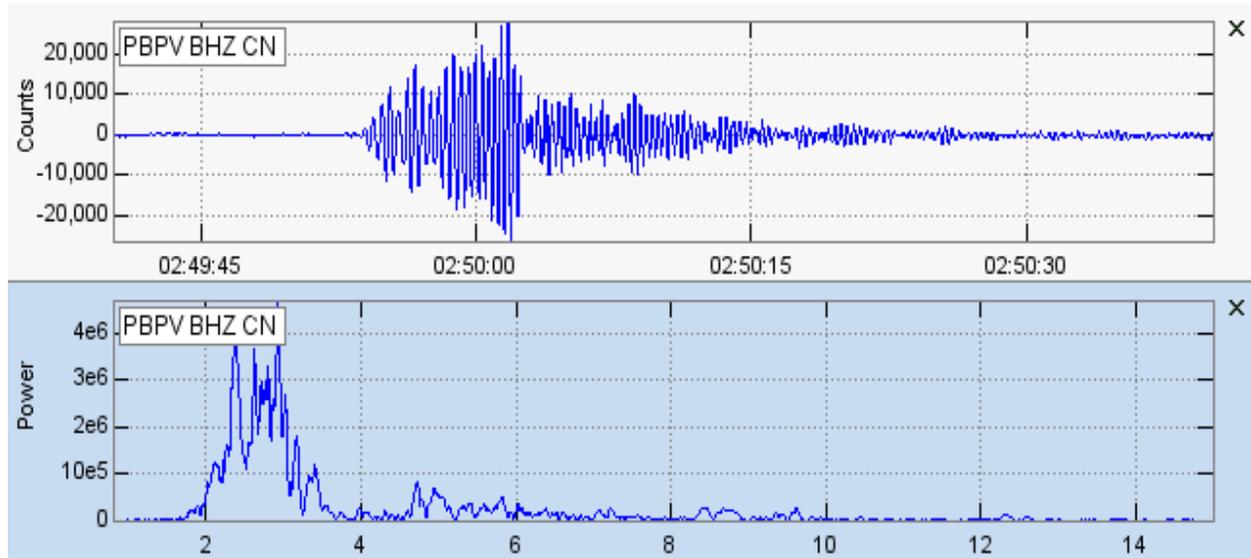


Figura 7 Traza y espectro de la exhalación tipo N del 7 mayo de 2012 a las 02:49 GMT

Las exhalaciones de tipo 7 son exhalaciones de larga duración cuya principal característica es la de presentar una coda de segundos a varios minutos de tremor de baja amplitud, ya sea este armónico o espasmódico. Estas exhalaciones presentan una pre-fase de duración variable de varios segundos y en la fase intensa son similares a las exhalaciones tipo 2, con frecuencias dominantes entre los 2.5 y 3 Hz. Algunas de las señales de este tipo presentaron segmentos asociados de tremor de hasta 15 minutos (día 20/05/12; Figura 8a; día 26/05/12, Figura 9), pero en promedio las codas van de 1 a 5 minutos. En varias ocasiones, durante los meses de abril y mayo, pudo determinarse el registro de este tipo de exhalaciones horas antes de iniciar un episodio de tremor de gran amplitud (Figuras 8a y 8b). Por otra parte, varias de estas señales mostraron una componente explosiva, asociándose a señales en el registro sísmico, tanto de la estación Tlamacas, como de la estación Colibrí (Figura 10).

La diferencia en los tiempos de arribo de la pre-fase en el registro sísmico y del registro sísmico y del registro sísmico fue de varios segundos, hasta un máximo de 30 segundos.

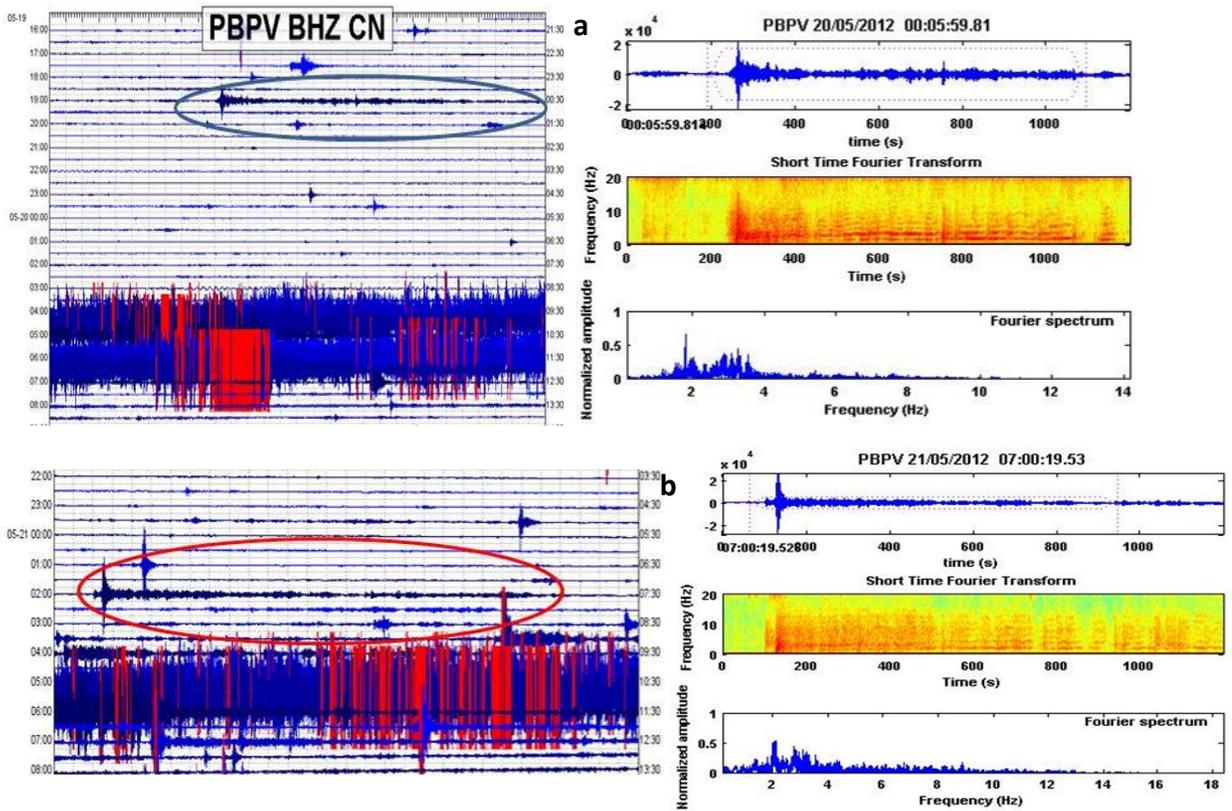


Figura 8 Registro SWARM y traza, espectro y espectrograma de dos exhalaciones Tipo 7 registradas a) el 20 de mayo a las 00:05 GMT y b) el 21 de mayo de 2012 a las 07:00 GMT en la componente vertical de la estación Canario de banda ancha (PBPV)

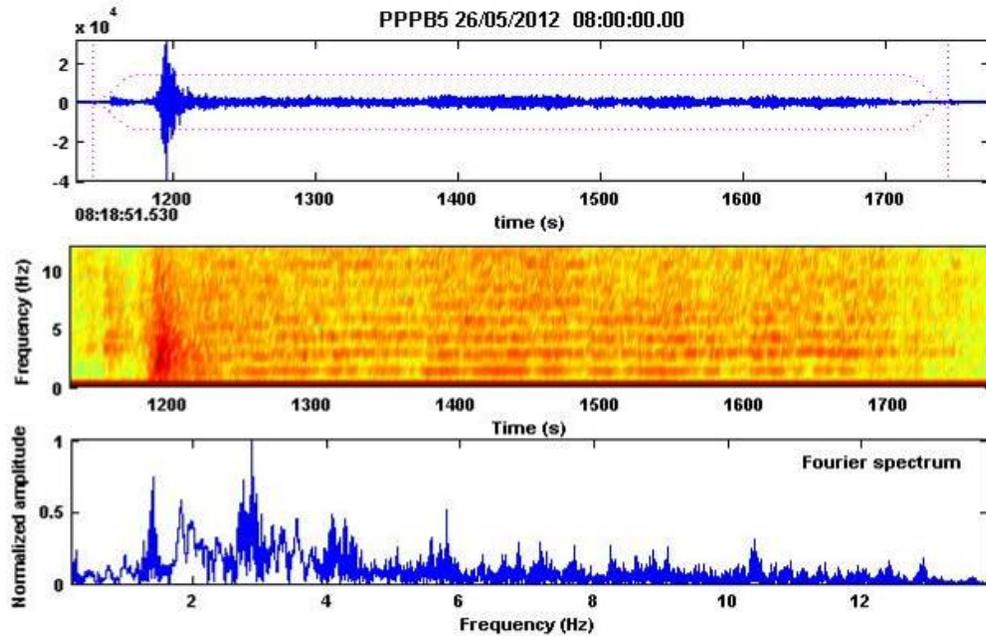


Figura 9 Traza, espectro y espectrograma de la exhalación tipo 7 registrada el 26 de mayo a las 08:18:51 GM.

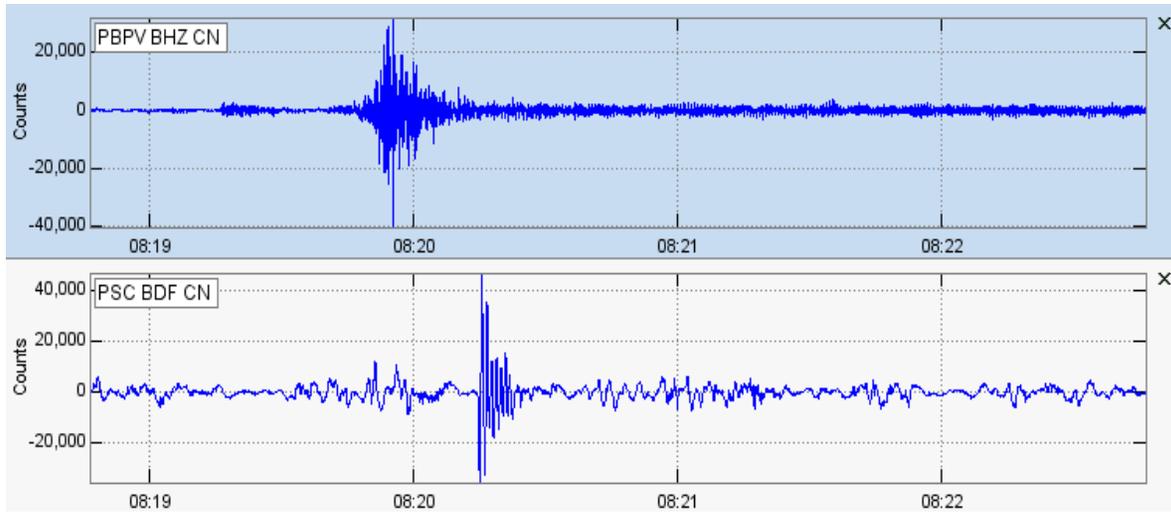


Figura 10 Traza de la exhalación tipo 7 registrada en la estación de banda ancha de Canario el 26 de mayo de 2012 a las 08:19 GMT y traza del registro sísmico asociado registrado en la estación sísmica de Colibrí. La diferencia de arribos fue de 25 segundos en este caso

A finales de mayo y a partir del 3 de junio se reduce el registro de trenes de exhalaciones y bandas de tremor de gran amplitud. La actividad sísmica se caracteriza nuevamente por el registro de exhalaciones aisladas. Durante junio y julio, el número de exhalaciones individuales por día superó durante varias jornadas los 50 eventos, lo que supone un incremento en relación a lo que venía registrándose durante el

primer trimestre de 2012. Muchas de las exhalaciones del mes de julio fueron de gran intensidad, acompañadas por pulsos de la pluma de gases cargados de cenizas. En estos meses se registraron también trenes de exhalaciones, en segmentos más cortos que durante abril y mayo (ver apartado siguiente).

Desde la última semana de julio y durante el mes de agosto el registro de exhalaciones decreció considerablemente, con un total en agosto de 738 señales de este tipo. El 6 de agosto se produjo una explosión que generó una columna de gases y cenizas de 4 km, cuya señal sísmica es una traza de exhalación de moderada amplitud.

En los primeros días de septiembre también se presentó un período con relativa calma sísmica con el registro de alrededor de cinco exhalaciones diarias. Después de la explosión del 10 de septiembre y del registro de tremor armónico del 11, el volcán presentó un notable incremento de la actividad sísmica, especialmente entre los días 14 al 21 del mes, con más de 70 exhalaciones entre el 16 y el 18, algunas con emisión de ceniza, además de un tren de exhalaciones el día 18. En los últimos días del mes, del 22 al 30 de septiembre, se presentó un nuevo decremento en la actividad con menos de 10 exhalaciones por día. El total de exhalaciones durante septiembre fue de 711 señales, similar al mes de agosto.

Durante octubre- diciembre se contabilizaron 4,673 exhalaciones de baja y moderada intensidad, distribuidas regularmente entre los tres meses: 1,244 en octubre, 1,674 en noviembre y 1,755 en diciembre. El promedio mensual de 1500 exhalaciones supuso un incremento con relación a los meses previos de agosto y septiembre (Figura 3) y el inicio de una tendencia al alza en la actividad. El registro de exhalaciones presentó una cierta ciclicidad y se intercaló con el registro de segmentos cortos de tremor armónico de baja amplitud. A partir del 9 de octubre se observó una repetición durante los tres meses, en los que se intercalan períodos de varios días con 20 a 50 exhalaciones por día con un período de dos a cinco días, en los que se contabilizaron entre 90 y 200 exhalaciones por día.

Algunas de estas exhalaciones tuvieron componente explosiva y dieron lugar a la emisión de fragmentos incandescentes los días 16, 20 y 25 de octubre, del 12 al 17 y el 23 de noviembre y el 17 de diciembre. Los fragmentos balísticos, alcanzaron entre 500 m y 1 km sobre las laderas del volcán. La mayor parte de estos eventos tuvieron también registro en los sensores de infrasonido, tanto en Tlamacas como en Colibrí.

b) Tremor y Trenes de exhalaciones

En el volcán Popocatepetl se registraron 367 horas de tembor de diferentes tipos: armónico, espasmódico y combinado y 88 horas de trenes de exhalaciones. Los más importantes por su amplitud y duración fueron los registrados durante los meses de abril y mayo. Los trenes de exhalaciones se concentraron en el período del 30 de marzo al 16 de septiembre, sin embargo en lo referente al tembor en prácticamente todos los meses se registraron algunos segmentos de este tipo de señales, aunque de amplitudes variables (Figura 11).

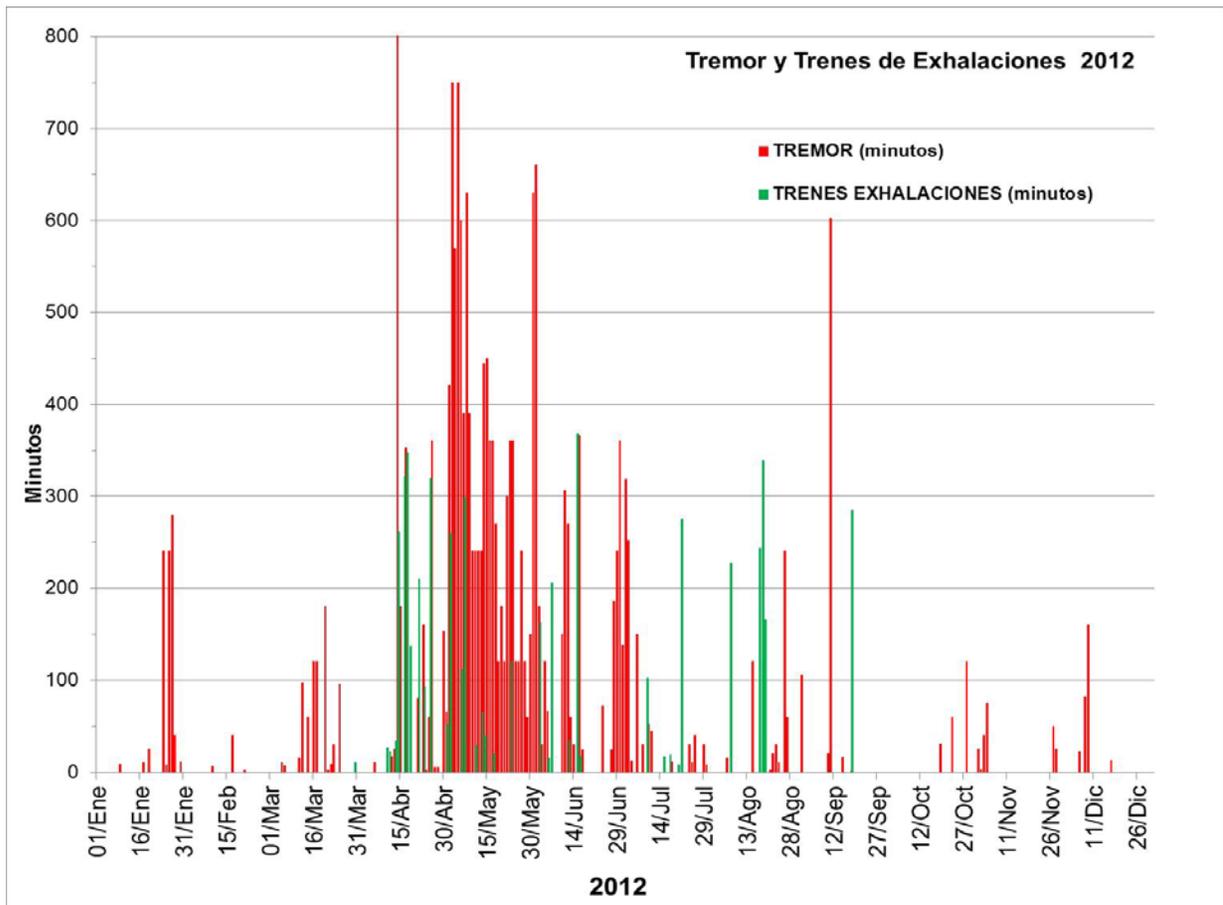


Figura 11 Registro de minutos de trenes de exhalaciones y tembor por día registradas en el Volcán Popocatepetl durante 2012

Desde el 19 de enero y después de la explosión ocurrida el día 25 hasta final del mes se registraron diversos segmentos de tembor armónico (385 minutos) y de tembor espasmódico (280 minutos) de mediana amplitud. El segmento más importante de tembor armónico fue el del 29 de enero (90

minutos). Durante febrero y principalmente en marzo continuaron presentándose segmentos de temblor de diferentes tipos, pero de menor amplitud. Se contabilizaron un total de 48 minutos en febrero y alrededor de 750 minutos (12 horas) en marzo. Los segmentos más importantes se registraron los días 17 y 20 de marzo, con 2 horas y 2.5 horas respectivamente.

Durante diversos días del mes de marzo se registraron segmentos de trenes de exhalaciones de baja y mediana intensidad, de duraciones entre 10 y 30 minutos. Estos segmentos cortos sumaron un total de 2 horas 50 minutos. El tren de exhalaciones más importante, por su duración y amplitud, se registró el 30 de marzo, entre las 14:09 GMT del 30 de marzo y las 00:34 GMT del 31 de marzo. Tuvo una duración de 10 horas, en las que se contabilizaron 592 señales, principalmente de tipo 2, que se presentaron cada pocos segundos con amplitud similar (Figura 12).

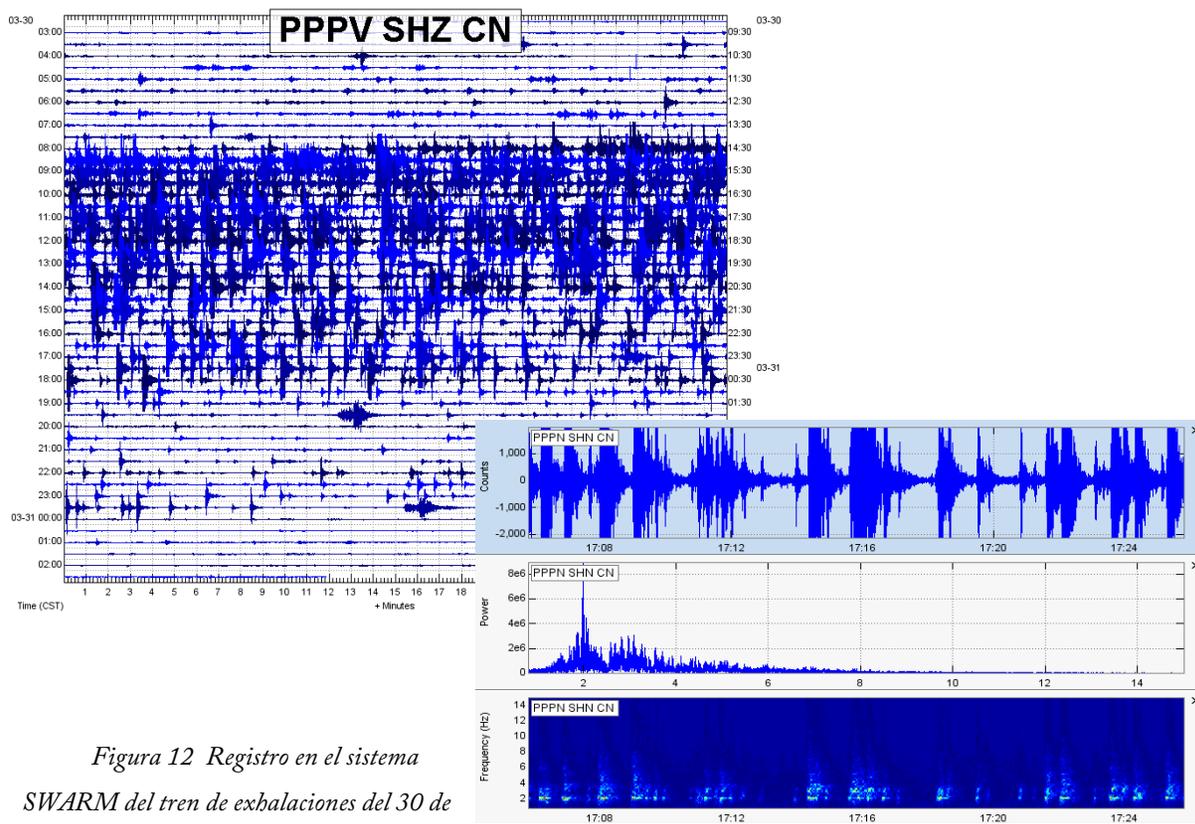


Figura 12 Registro en el sistema SWARM del tren de exhalaciones del 30 de marzo en la componente vertical de la estación Canario y traza, espectro y espectrograma de un segmento de este tren de exhalaciones

A partir del 13 de abril y hasta inicios de junio se generalizó el registro de trenes de exhalaciones y de segmentos de temblor armónico y espasmódico de gran amplitud y de varias horas de duración. Los episodios de temblor, que se presentaron en bandas de varias horas, tuvieron en estos meses una duración total de 276.3 horas (16,578 minutos, Figura 11) y presentaron predominancia durante el mes de mayo. Los trenes de exhalaciones sumaron un total de 59.6 horas (3,574 minutos, Figura 11) y tuvieron

predominancia durante la última quincena de abril. Durante los meses de junio a agosto se registraron también segmentos de tremor y de trenes de exhalaciones de menor amplitud y menor duración que en los meses de abril y mayo. En el conjunto de los cinco meses se registraron 309 horas de tremor y 70.8 horas de trenes de exhalaciones.

Entre los días 13 y 21 de abril predominaron los trenes de exhalaciones, con duraciones entre 0.5 y 5.8 horas. Los primeros trenes se producen la noche del 13 de abril, con posterioridad a las explosiones de las 03:20 Y 03:35 GMT, entre las 05:55 y 10:17 GMT (madrugada del día 14, Figura 13). El tren de exhalaciones de mayor duración se registró la tarde del 16, con un total de 7 h 25 min (Figura 14). El 25 de abril se produce el último tren de exhalaciones del mes con una duración de 5.3 horas. La tipología de las señales en el interior de estos trenes es principalmente de tipo 2 y su amplitud varía a lo largo del tren, siendo máximas en las horas centrales. La repetición de exhalaciones dentro de los trenes se produce cada pocos segundos. También se registraron trenes de exhalaciones los días 11 y el 23 de mayo (Figura 15) combinados con bandas de tremor armónico y espasmódico; el 2, 5, 6, 12 y 15 de junio con duraciones entre 15 minutos y 6 horas el último día; el 9 y 21 de julio, con 1.7 y 4.5 horas de duración respectivamente y en agosto se presentaron 3.8 horas el día 7, posterior a la explosión registrada el día anterior, y entre 1.7 y 5.7 horas entre los días 17 y 19.

Las bandas de tremor de gran amplitud iniciaron también la noche del 13 de abril, jornada en la que se prolongaron por un lapso de 6.5 horas. El tremor fue de tipo espasmódico y presentó amplitudes entre 4,000 y 40,000 cuentas. Hasta el 20 de abril se presentaron bandas de tremor espasmódico de duraciones entre 15 minutos y 2 horas. Entre el 23 y el 25 de abril se intensifica el registro de tremor y aparecen los primeros segmentos de tremor armónico, aunque el tremor se presenta mayoritariamente como una combinación de espasmódico y armónico, no siendo posible separarlos claramente (Figura 16).

Las bandas de tremor predominan especialmente durante mayo, cuando se registran prácticamente todos los días, después de un lapso de relativa calma sísmica entre el 26 de abril y el 2 de mayo. Entre el 3 y el 14 de mayo se registran en promedio 9.6 h diarias de tremor, principalmente combinado entre armónico y espasmódico de gran amplitud, aunque se registran algunos segmentos de tremor armónico claramente identificable (Figura 17).

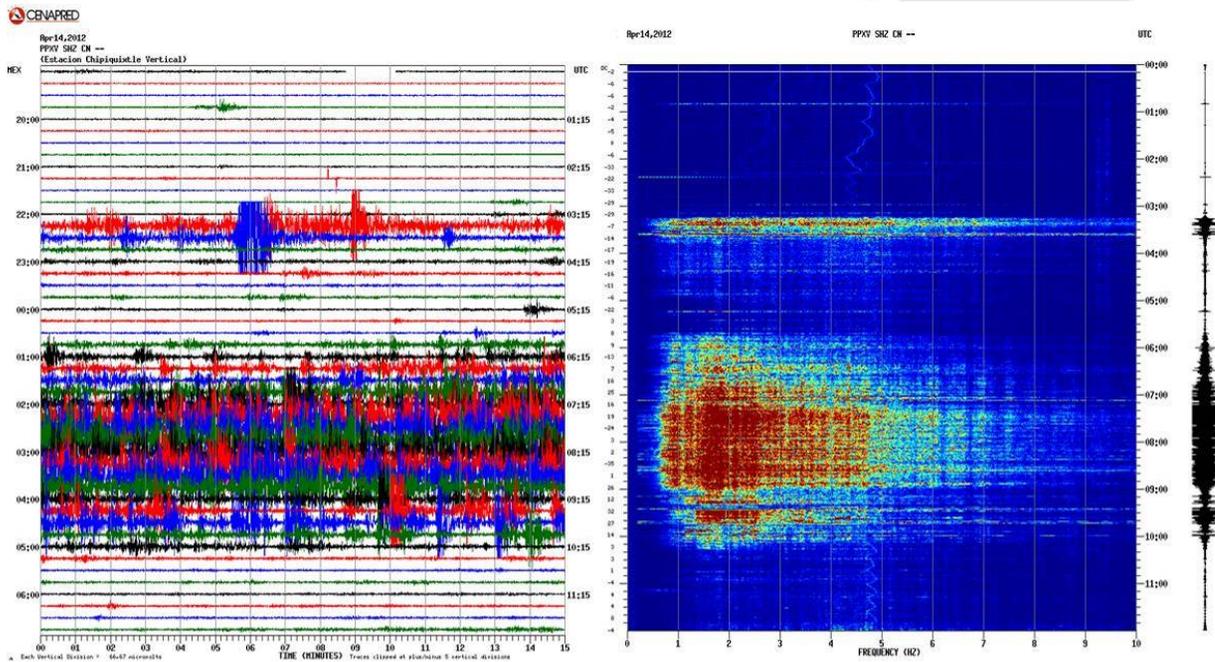


Figura 13 Tren de exhalaciones del 14 de abril entre las 05:55 y 10:17 GMT, posterior a explosiones registradas a las 03:20 y 03:35 GMT, acompañadas por tremor espasmódico de 25 min

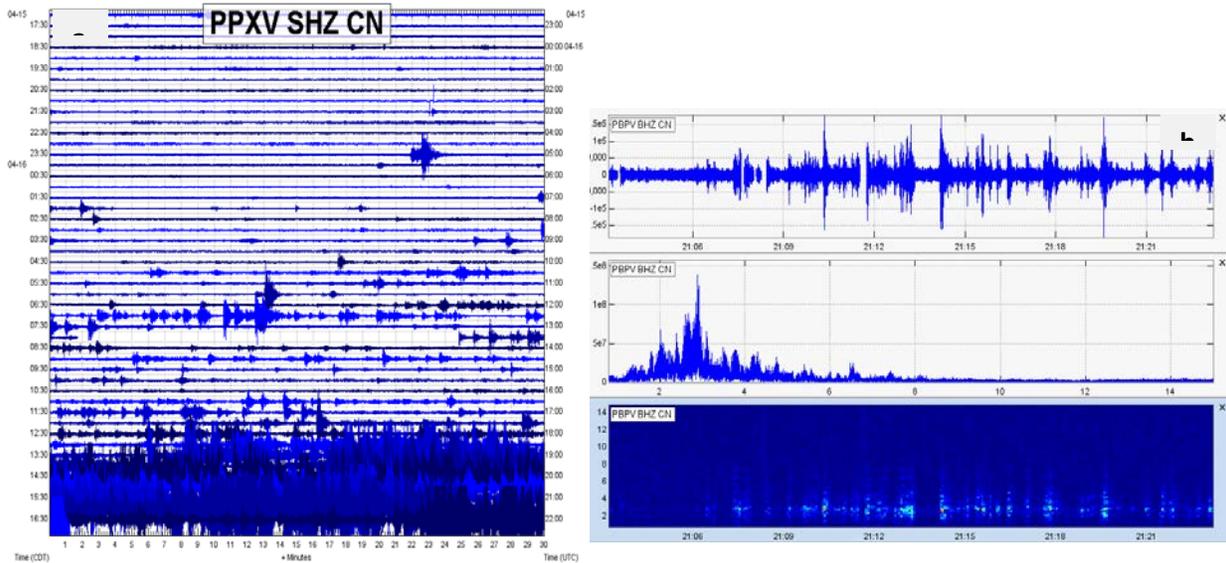


Figura 14 a) Registro del tren de exhalaciones de la tarde del 16 de abril de abril, el cual inició a las 18:37 GMT y se prolongó por 7 h 25 min; b) Traza, espectro y espectrograma de un segmento de este tren de exhalaciones entre las 21:06 y 21:22 GMT

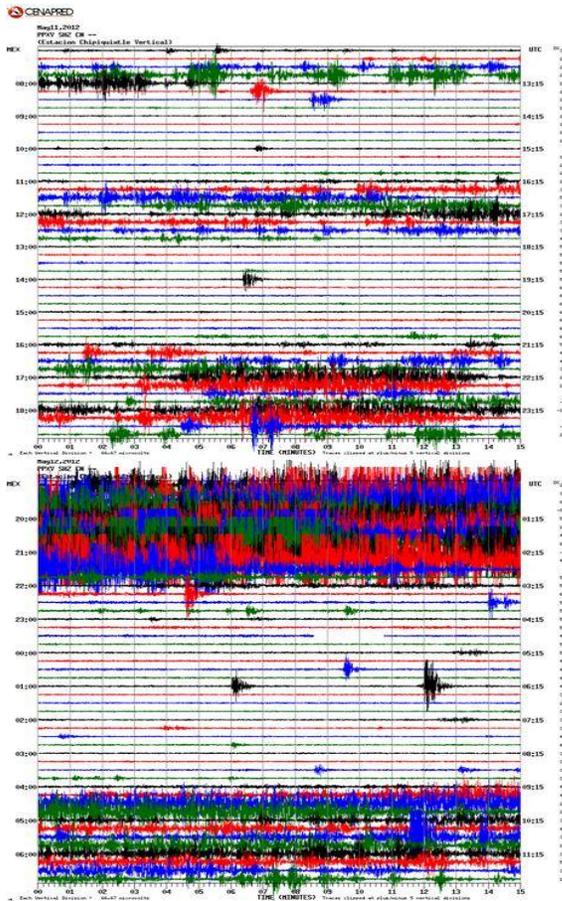


Figura 15 El tren de exhalaciones del 11 de mayo se produjo entre las 23:30 y las 23:59, combinado con bandas de tremor espasmódico y armónico. Asociada a esta actividad sísmica se produjeron diversas explosiones que lanzaron fragmentos incandescentes sobre las laderas del volcán

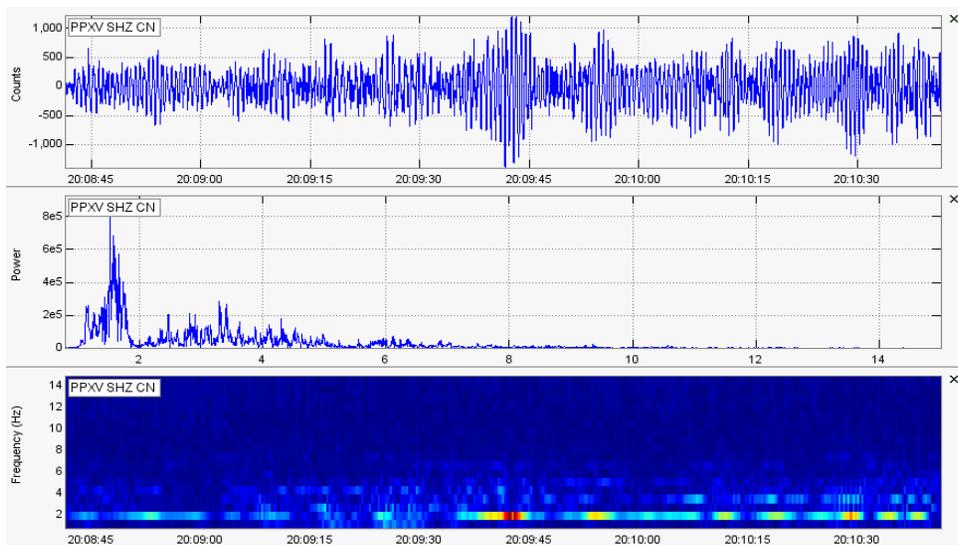


Figura 16 Trazas, espectro y espectrograma de un segmento de tremor armónico del 23 abril, donde pueden distinguirse con dificultad las frecuencias armónicas, ya que se presenta parcialmente combinado con tremor espasmódico

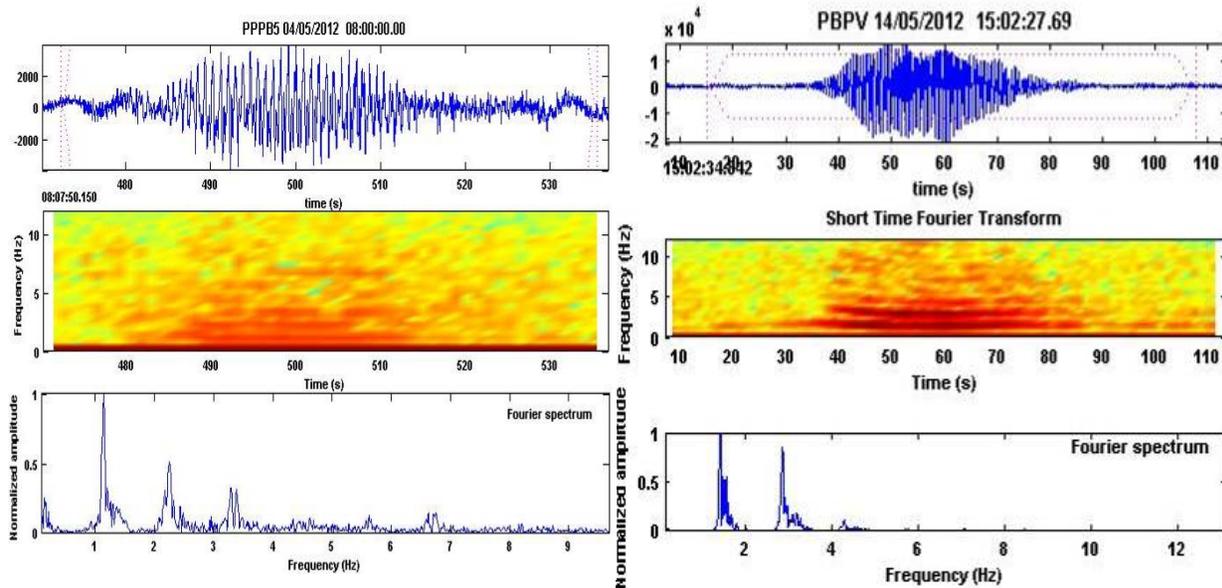


Figura 17 Trazas, espectrogramas y espectros de segmentos de tremor armónico del 4 y del 14 de mayo, donde pueden identificarse los picos de frecuencias equidistantes

Cabe destacar las 23 h de tremor que se registraron el 11 y 12 de mayo, con las mayores amplitudes máximas de todo el período estudiado (100,000 y 150,000 cuentas), coincidentes con los días de mayor actividad eruptiva (Figura 18). Mayoritariamente el tremor fue de tipo combinado armónico-espasmódico, aunque una parte significativa (7 horas) del tremor registrado el día 12 fue de tipo armónico “puro”.

Entre el 12 y el 24 de mayo se registraron en promedio 5.2 horas de bandas de tremor por día, entre las que destacan las 7 horas registradas el día 15. Este tremor fue principalmente de tipo combinado entre armónico y espasmódico, con amplitudes máximas entre 10,000 y 50,000 cuentas. Las bandas de tremor armónico más claro se presentaron los días 22 (3 h 40 min) y 24 (25 min), aunque también se registraron segmentos cortos de pocos minutos en otros días de este periodo. En la última parte del mes, entre el 25 y el 30 de mayo el promedio diario de tremor fue de 2.3 horas, también de tipo combinado armónico-espasmódico y con amplitudes máximas menores a las del resto del mes (~ 10,000 cuentas), aunque puntualmente este máximo en las amplitudes alcanzó un orden de magnitud superior. El 31 de mayo y el 1º de junio se registraron más de 10 horas por día de tremor de tipo espasmódico y combinado.

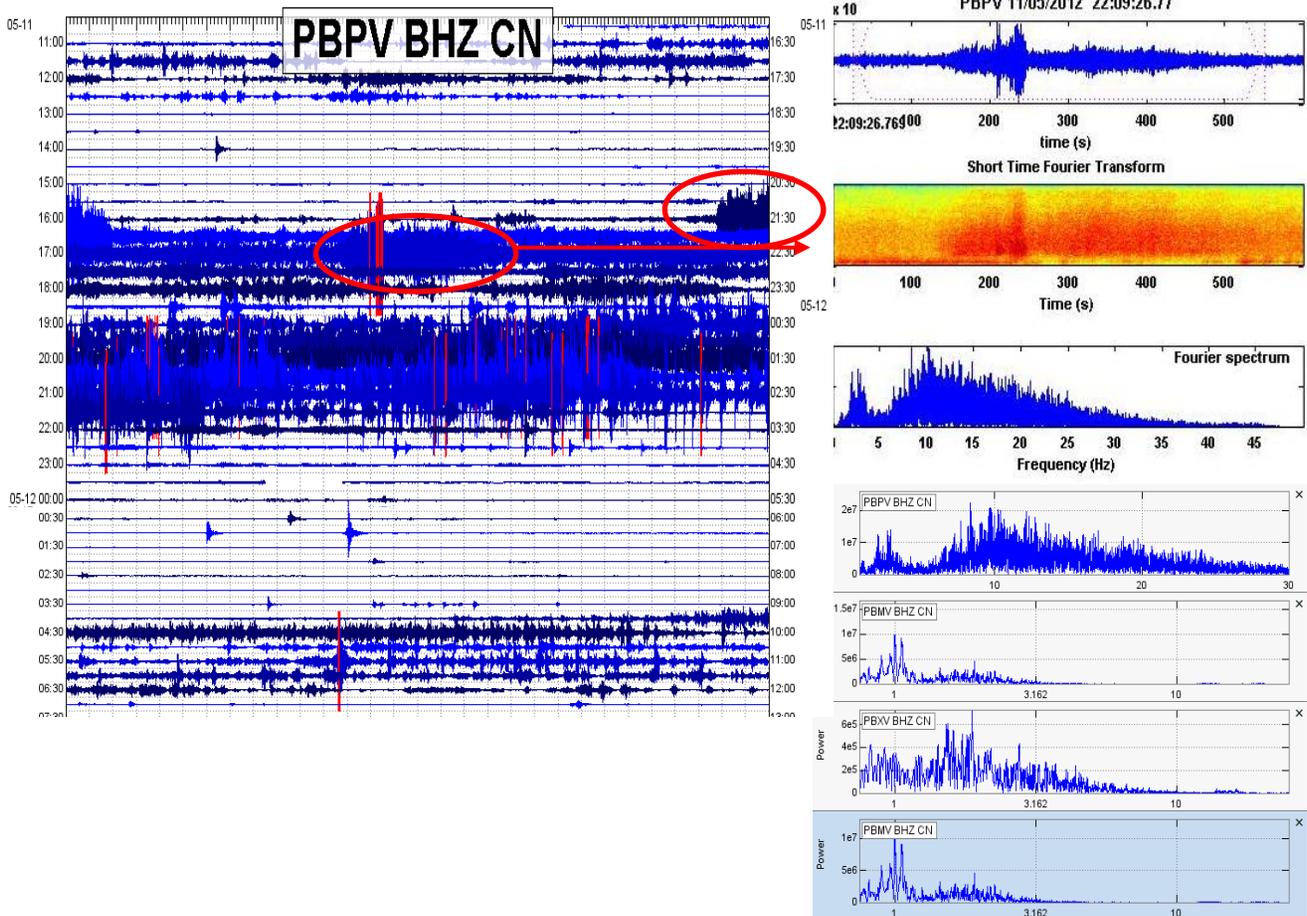


Figura 18 Registro SWARM de la estación de banda ancha en Canario (componente vertical) del tembor armónico y espasmódico del 11 de mayo. Se señalan los dos derrumbes ocurridos a las 21:27 y 22:09 GMT, al inicio de las bandas de tembor. Se muestra la traza, espectrograma y espectro del segundo de estos derrumbes

Durante el resto de junio las bandas de tembor fueron espaciándose y reduciendo su duración y amplitud. Se registraron los días 2 y 5, del 10 al 13, el 16 y 17 y del 27 al 30 con un total de 52.6 horas (Figura 11). Prevalció el tembor de tipo espasmódico sobre el de tipo combinado, con una duración promedio de 2.6 h/día. Las amplitudes máximas fueron menores que en mayo, en un rango de 5,000 a 10,000 cuentas de amplitud máxima, con la excepción del tembor registrado los días 29 y 30 de junio. El registro de tembor se mantuvo durante la primera semana de julio, con características similares a las mencionadas para los últimos días de junio, registrándose un total de 16.6 horas de tembor. Durante el resto de julio no se registraron bandas de tembor, situación que se mantuvo prácticamente todo el mes de agosto.

Excepcionalmente los días 21 al 27 de agosto se registraron segmentos de tremor armónico de muy baja amplitud (~2,000 cuentas) con duraciones de 15 a 30 min, igual que el día 26, cuando se registró el mismo tipo de tremor por un período de 3 h 40 min. En total se registraron 16.47 horas de tremor durante agosto.

En septiembre se registraron 10.65 horas de tremor, prácticamente todo el día 11, después de la explosión del día anterior. Este tremor fue mayoritariamente de tipo armónico, con niveles máximos de 5,500 y 7,500 cuentas. Se registró también un tren de exhalaciones de 3.28 horas de duración el día 18, coincidiendo con un periodo de actividad incrementada registrado entre los días del 14 al 21. En los meses posteriores, de octubre a diciembre, se registraron diversos segmentos de tremor armónico de baja amplitud, que sumaron un total de 14.3 horas, generalmente después de la ocurrencia de exhalaciones con componente explosivo. El tremor se presentó en segmentos de 30 a 90 minutos por día. Excepcionalmente el 19 de octubre se registraron 3.7 horas.

c) Sismos volcanotectónicos

El sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl registró la ocurrencia de 149 eventos volcanotectónicos (Figura 3 y 19, Tabla 1 en Anexo 1) durante 2012. La mayor parte de estos (112) tuvieron magnitudes coda entre 1 y 2. El resto tuvieron magnitudes inferiores a 1 (15 eventos), entre 2 y 3 (20 eventos) y 2 fueron mayores a magnitud 3 (Figura 20). Los sismos de mayor magnitud ocurrieron el 5 de enero a las 08:02 GMT, a 1 km de profundidad con 3.2 de magnitud; el 14 de abril a las 12:12 GMT, a 6.2 km de profundidad con magnitud de 3.2 y el 23 de julio a las 06:57 GMT, a 5 km de profundidad con una magnitud de 2.9. En general los sismos volcanotectónicos registrados en 2012 muestran una ligera tendencia a decrecer en magnitud a lo largo del año. (Figura 20).

El conjunto de sismos volcanotectónicos (VT) se localizaron a profundidades entre 1 y 12 km, en tres sectores principalmente (Figura 3, 19 y 20): debajo del cráter, debajo del flanco sureste y debajo del flanco suroeste marcando una lineación de dirección NW-SE.

Durante el primer trimestre del año se registraron 21 VT, 15 de ellos durante la segunda quincena de marzo antecediendo el tren de exhalaciones del día 30.

Cabe señalar que el primer VT del año y del conjunto de VT de este trimestre fue uno de los de mayor magnitud y menor profundidad (5 enero, 1 km), que se localizó debajo del flanco NW, en las

inmediaciones de Amecameca, a 11 km del cráter del Popocatepetl. El grupo de VT de marzo se localizó principalmente debajo del cráter y del flanco sureste, a profundidades entre 10 y 2 km. Los primeros sismos de este grupo tuvieron mayores profundidades que fueron disminuyendo a finales del mes, cuando se presentaron nuevamente dos sismos con profundidades de 10 km (Figura 20). Los sismos tuvieron magnitudes entre 1.5 y 2.4, con tendencia general a aumentar con el tiempo.

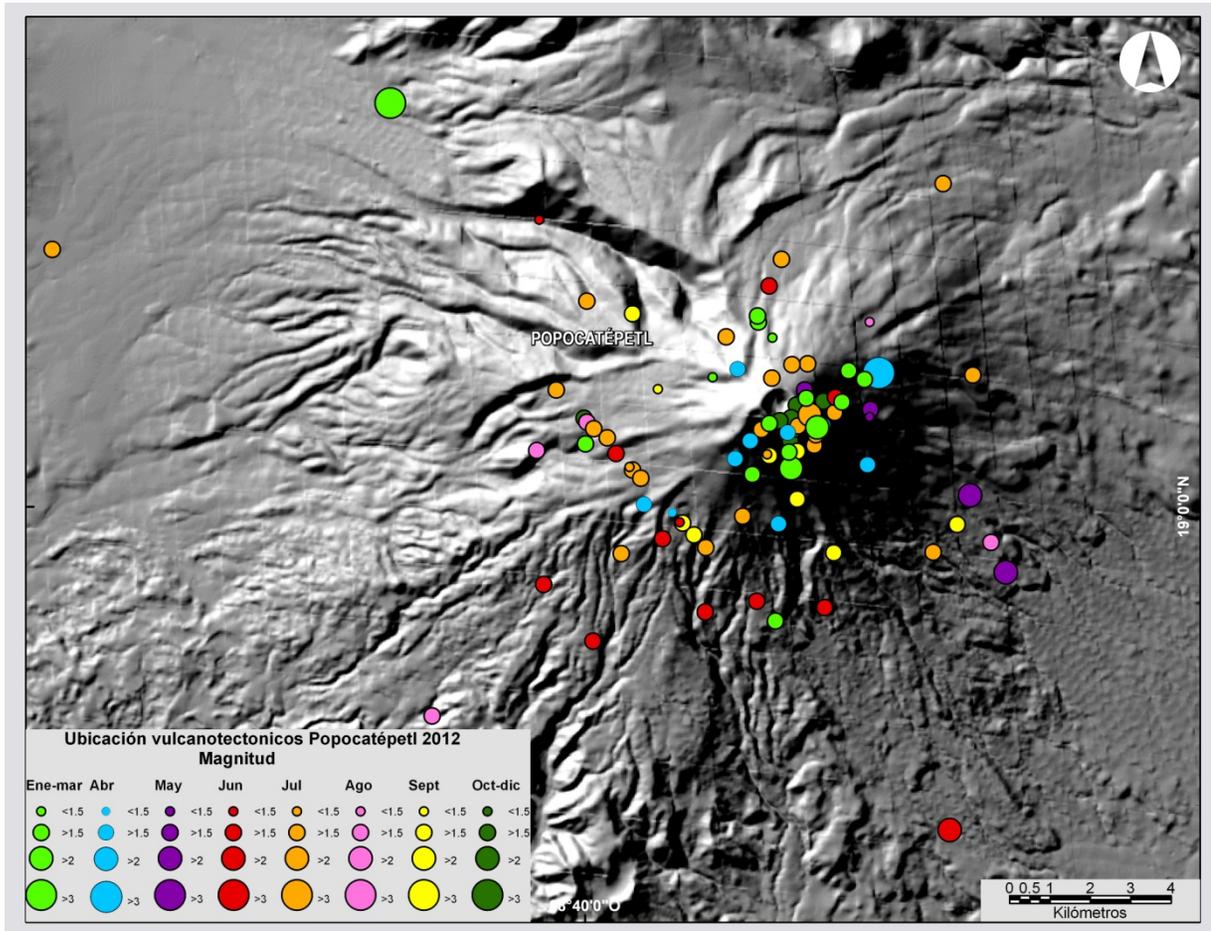
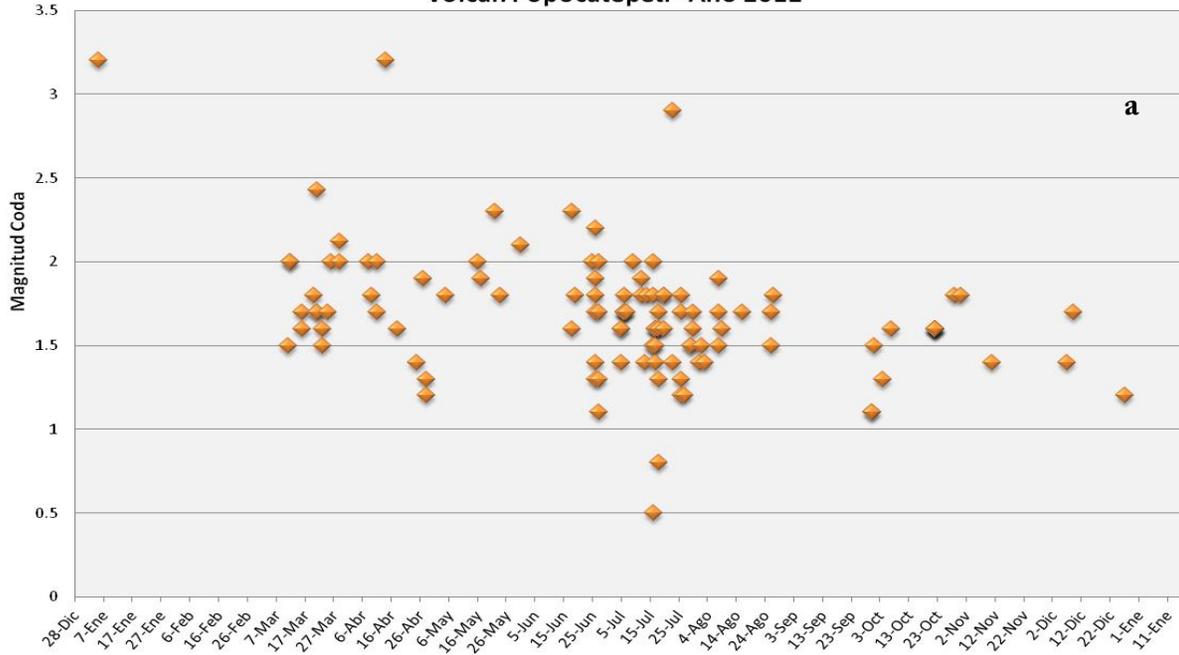


Figura 19 Localización de sismos vulcanotectónicos del volcán Popocatepetl registrados en 2012 por magnitudes y tiempo

**Distribución de MAGNITUDES de VT vs TIEMPO
Volcán Popocatepetl - Año 2012**



**Relación de PROFUNDIDADES de VT vs TIEMPO
Volcán Popocatepetl - Año 2012**

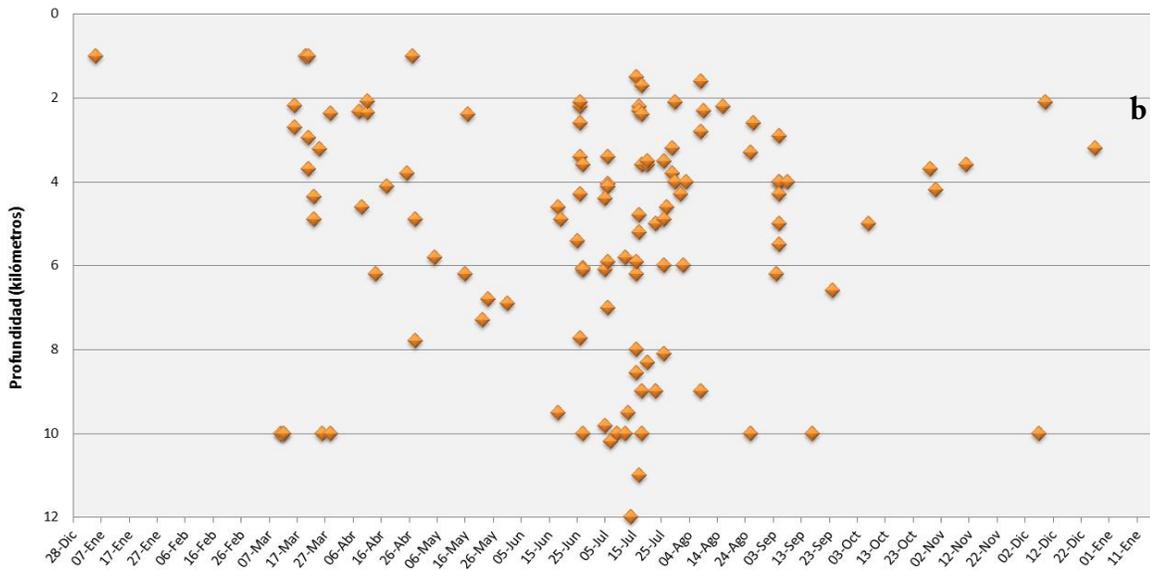


Figura 20 Gráficos de las magnitudes (a) y profundidades (b) de los sismos volcanotectónicos del volcán Popocatepetl respecto al tiempo durante 2012. Notar la escala vertical invertida en la gráfica de profundidades

En los meses de abril y mayo se registraron 10 y 6 VT respectivamente. Estos sismos se presentaron, en general, a profundidades menores a 6 km con una tendencia a incrementar la profundidad y tuvieron

magnitudes entre 1.7 y 2.3, sin que su distribución presente una tendencia clara. Cabe señalar, que nuevamente uno de los primeros sismos de este grupo, fue de magnitud 3.2 (14 de abril, 6.2 km). Los VT de abril se localizaron mayoritariamente debajo del cráter, aunque parecen distribuirse con cierta tendencia NE-SW, mientras que los de mayo lo hacen desde el cráter hasta el flanco SE.

A partir de junio se registra un incremento en el número de VT, con 14 sismos con magnitudes entre 1.3 y 2.3; que se confirmó durante julio, con el registro de 43 eventos, con magnitudes entre 1.2 y 1.8 mayoritariamente, aunque se registraron dos sismos de 2 (16 de julio) y 2.9 (23 de julio). Junto a los sismos volcanotectónicos se registraron asimismo numerosas señales híbridas con características de volcanotectónicos (Figura 21), que en ocasiones se presentaron en forma de trenes (finales de julio). Durante estos meses los VT alcanzaron profundidades de hasta 12km. Estos sismos se localizaron en dos sectores principales: una gran parte bajo el flanco SW marcando una lineación NE-SW y otra debajo del cráter.

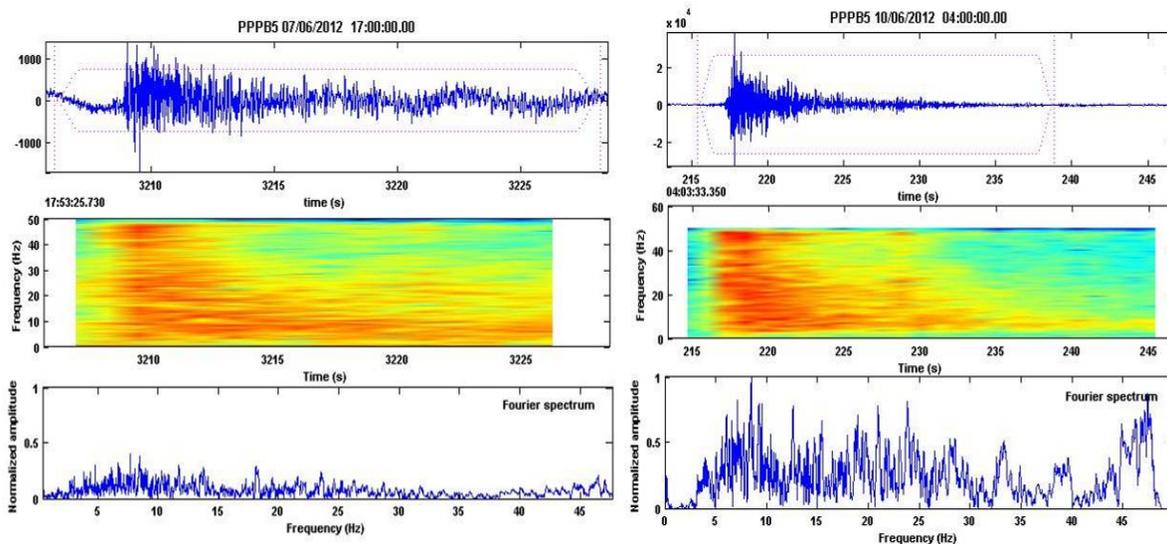


Figura 21 Trazas, espectrograma y espectro de dos señales híbridas de volcanotectónicos registradas el 7 y el 10 de junio en la estación de período corto de Canario (componente vertical)

En agosto se presentaron 11 VT, con magnitudes entre 1.4 y 1.8, localizados mayoritariamente a profundidades entre 1.5 y 4 km, aunque algunos de ellos presentaron profundidades hasta los 10 km.

En general los sismos de agosto y los posteriores en septiembre muestran una tendencia a hacerse más someros con relación a los registrados en julio. Igual que en el mes anterior, en agosto se registraron

trenes de eventos híbridos de volcanotectónicos los días 8, 14, 29 y 30. En agosto se registraron también diversas señales asociadas a derrumbes, algunos de ellos posteriores a los trenes de híbridos mencionados.

En el mes de septiembre se registró un leve incremento del número de sismos volcanotectónicos con relación a agosto, que sumaron un total de 10 eventos. Estos tuvieron magnitudes entre 1.1 y 1.7 y profundidades entre 3 y 6 km. Varios de los VT de agosto como los de septiembre se localizaron debajo de los flancos del volcán, a distancias variables del cráter, lo que parece indicar una cierta migración de los esfuerzos debajo del volcán.

Durante el período de octubre a noviembre se registraron 16 sismos volcanotectónicos, en un número por mes menor al resto de 2012. Para todos ellos se calculó una magnitud coda de 1.2 a 1.8. Se localizaron 7 sismos volcanotectónicos (Figura 19). Los tres de octubre se ubicaron en los flancos S, E Y NE, a distancias de 1 a 2.5 km del cráter. El VT del 11 de noviembre se localizó en el flanco SE, a menos de 1 km de distancia del cráter, así como los dos últimos de diciembre. Todos los sismos se localizaron a profundidades entre 2 y 5 km, con excepción del registrado el 7 de diciembre que presenta una profundidad de 10 km y se localizó en el flanco oeste a una distancia de 4.5 km del cráter.

La distribución mensual de los 155 sismos volcanotectónicos registrados en 2012 y en especial los contabilizados durante julio, suponen un incremento significativo de eventos de este tipo con respecto a los contabilizados mensualmente desde mediados de 2003 y un cambio de tendencia desde enero de 2010 (Figura 23). En conjunto el número de sismos volcanotectónicos tiene un rango similar a los registrados durante 2007 y 2008.

Energía acumulada de los sismos volcanotectónicos

La energía acumulada total de los VT en 2012, considerando un total de 155 eventos, fue de 12.9×10^9 Joules. Los sismos del primer trimestre del año supusieron una aportación de aproximadamente un tercio de la energía total mencionada. Entre abril y agosto la energía VT acumulada fue de 7.72×10^9 Joules, cuya mayor aportación fue debida a los sismos de $M_c = 3.2$ del 14 de abril y de $M_c = 2.9$ del 23 de julio, que marcarían el inicio y final del período de actividad sísmica incrementada. Estas aportaciones significaron cambios de pendiente significativos en el gráfico de energía VT acumulada (Figura 24). La aportación de energía VT entre octubre y diciembre fue de 2.33×10^8 J, lo que no implicó un cambio significativo en la tendencia de la curva de energía acumulada.

El número de sismos registrados en marzo, junio y especialmente en julio tiene rangos similares a los registrados durante las crisis volcánicas de 1997, 1999 y en diciembre-enero de 2000-2001. Sin embargo la energía VT acumulada en 2012 es un orden de magnitud más pequeña que la acumulada en los

períodos de abril a junio de 1997 (4.29 x10¹⁰ Joules) y de noviembre 2000 a enero 2001 (1.75x x10¹⁰ Joules) (Figura 24).

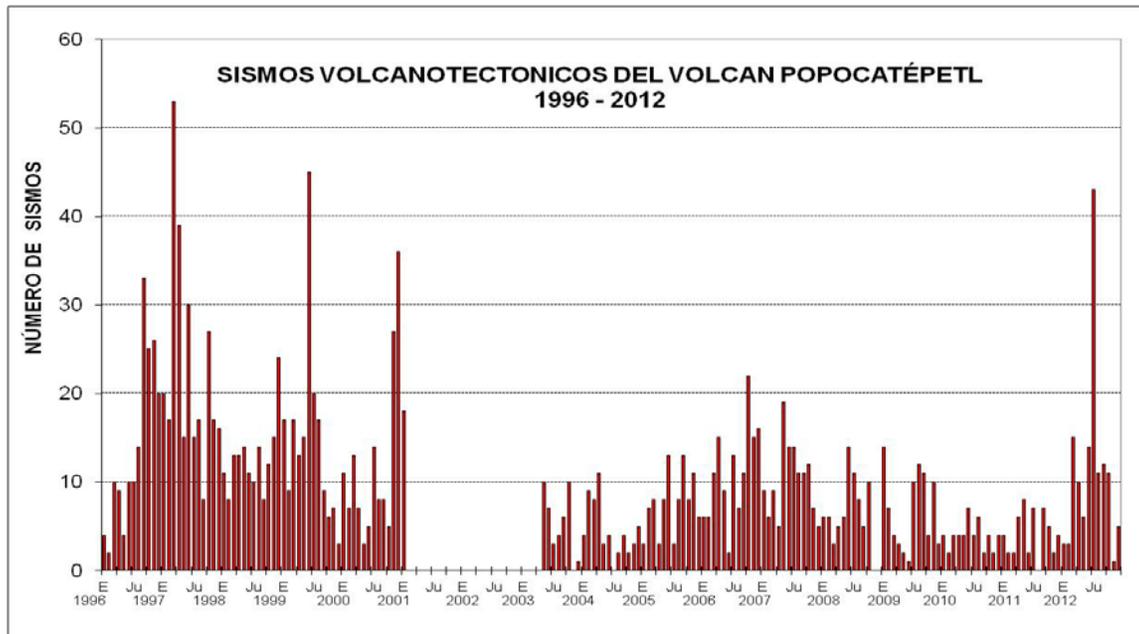


Figura 23 Número de sismos volcanotectónicos mensual del periodo 1996 a 2012 identificados en la red sísmica del volcán Popocatepetl

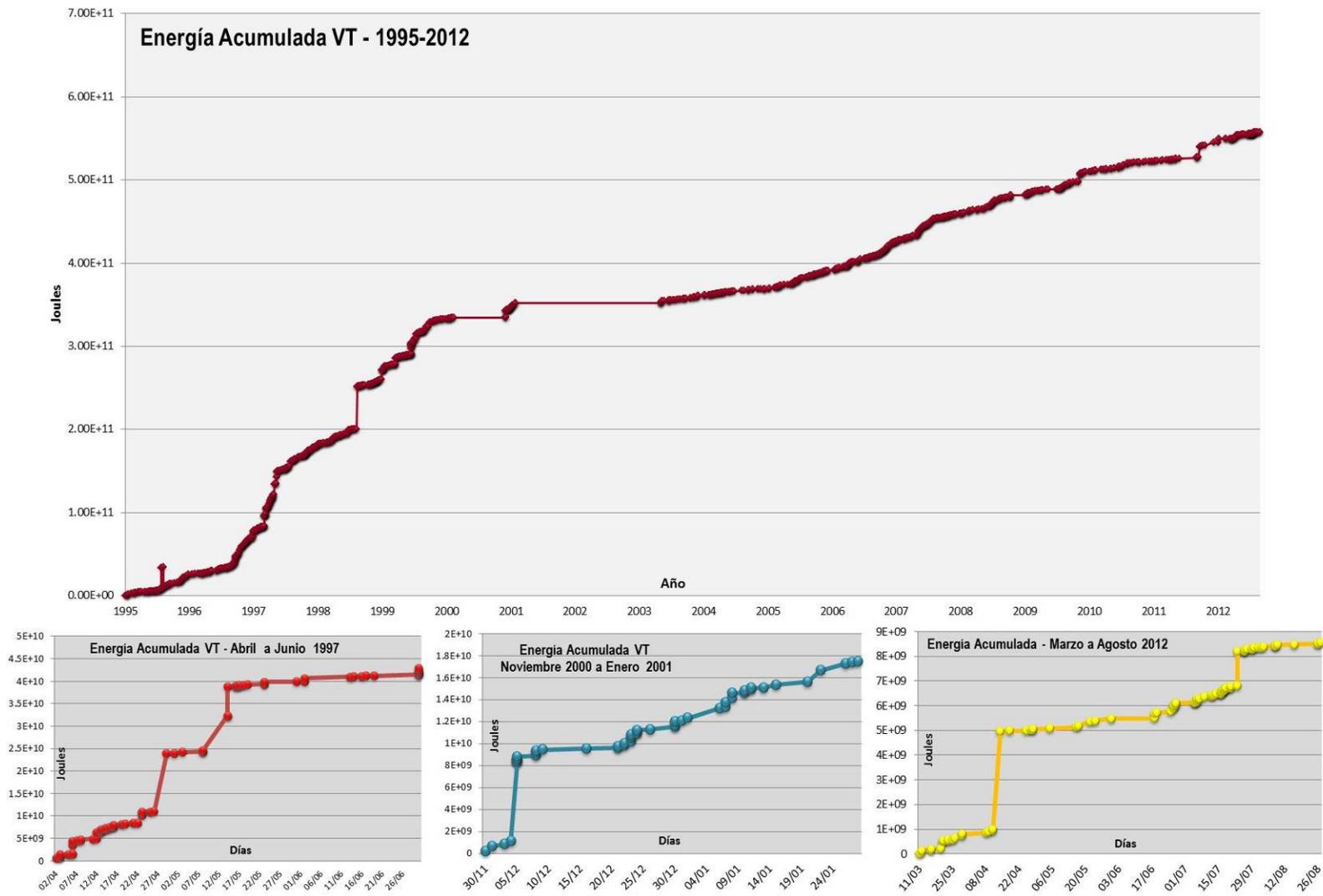


Figura 24 Energía VT acumulada del período 1995 a agosto 2012. En las gráficas inferiores se muestran en detalle los incrementos de energía acumulada de los períodos de abril a junio de 1997, de noviembre 2000 a enero 2001 y de marzo a agosto de 2012

d) Derrumbes y flujos

El sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl registró durante todo el año señales asociadas a derrumbes en el interior del cráter, en los bordes o en el centro del domo (deflación). Se registraron principalmente en las estaciones sísmicas ubicadas a mayor altura en el volcán (Canario y Chipiquixtle). Se registraron algunas señales de derrumbe durante el mes de abril y mayo, al inicio de las bandas de tremor más importantes (p.ej. 11 de mayo en Figura 18). Estas señales fueron especialmente abundantes a finales de agosto, asociadas a enjambres de eventos híbridos de volcanotectónicos y en octubre, mes en el que se contabilizaron más de 80 señales de este tipo, mayoritariamente de pequeña amplitud.

Los días 14, 16 y 17 de octubre se registraron siete señales por día de este tipo. Las señales de derrumbe de mayor amplitud se registraron los días 6 (13:40 GMT), 13 (13:07 GMT), 15 (04:25 GMT; Fig. 6a), 17 (15:13 Y 15:40 GMT; Fig. 6b) y 19 (13:02 GMT). Durante el mes de noviembre y diciembre se registraron dos señales por mes de este tipo.

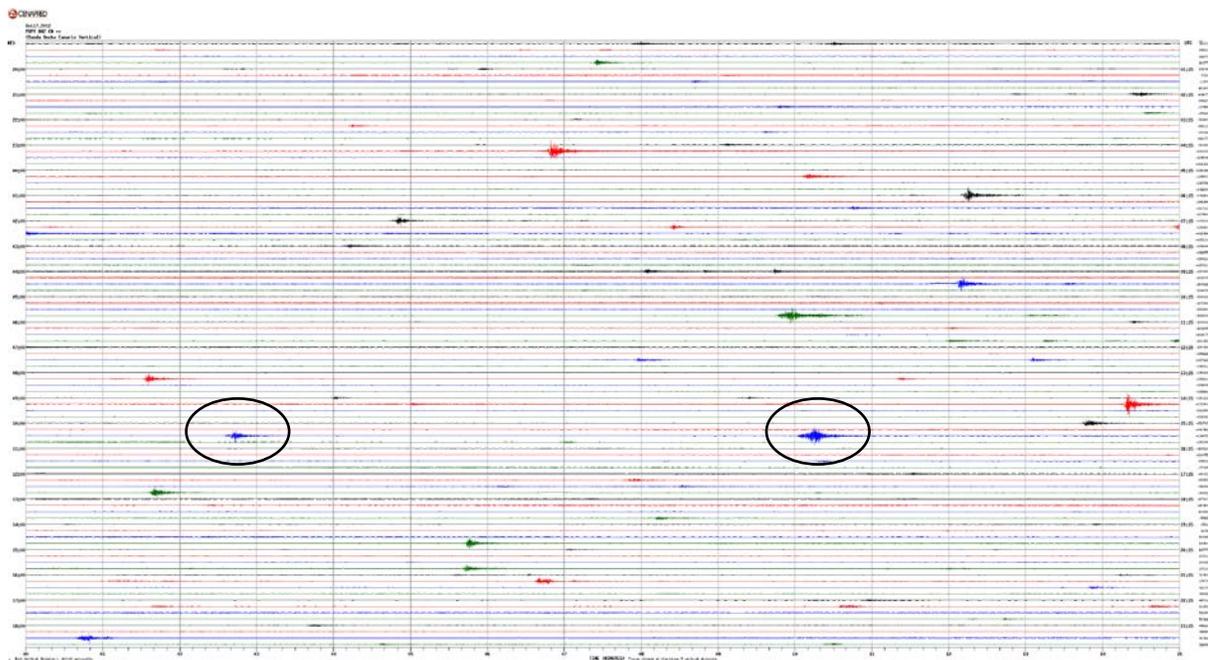


Figura 25 Registros sísmicos de la estación banda ancha en Canario (componente vertical) con las trazas de las señales asociadas a derrumbe del 17 de octubre

Adicionalmente, entre abril y agosto, coincidiendo con la época de lluvias, se registraron disparos en las estaciones de flujo del volcán y señales en la estación de banda ancha en Canario. Pudo corroborarse

la ocurrencia de pequeños flujos de agua y lodo en siete ocasiones, a través de imágenes de la cámara en Tlamacas.

Los eventos más importantes se registraron el 16 de abril, el 29 de julio y el 10 de agosto, todos en la quebrada Huiloac, sin que estos llegaran a alcanzar las partes bajas del volcán. El primero de estos flujos fue producido por deshielo de la nieve acumulada en la ladera noreste del volcán en las horas de mayor insolación (Figura 26). Los demás flujos, a partir de mayo, fueron disparados por lluvias. El 10 de agosto se registró el flujo de lodo de mayor magnitud, tanto en las estaciones sísmicas de Canario y Chipiquixtle como en los sensores de flujo, que se dispararon durante 2 horas 43 minutos.



Figura 26 Flujo de agua y lodo del 16 de abril en la barranca de Tenenepango (izquierda) y en la barranca de la Espinera (derecha).

e) Señales de muy largo periodo

En las estaciones de banda ancha del sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl cabe destacar también la presencia clara, a partir de mayo, de señales de muy largo periodo (VLP por sus siglas en inglés) que se registraron hasta el mes de agosto, en segmentos de varios minutos. En septiembre no se registraron señales de este tipo. Los días 1, 14, 20 y 21 de octubre se presentaron diversos segmentos de 10 a 20 minutos de periodo muy largo, como los registrados en los meses de mayo a agosto.

f) Sismicidad regional registrada en la red sísmica del volcán Popocatepetl

La red de estaciones sísmicas del volcán Popocatepetl registró el sismo de Mw=7.4 de las 18:02 GMT del 20 de marzo de 2012, localizado por el Servicio Sismológico Nacional en las cercanías de

Tabla 2 Registro del paso de flujos de agua y lodo en los sensores de flujo del volcán Popocatepetl

Fecha	Visual	Geófono 1			Geófono 3			Duración total del evento	Registro sísmico
		Hora inicio	Hora final	Duración	Hora inicio	Hora final	Duración		
16-abr-12	Si	15:48:54	19:07:47	3:18:53	17:00:33	17:55:31	0:54:58	3:18:53	PBPV
11-may-12	Si	16:27:56	17:50:54	1:22:58	No se registró	No se registró	No se registró	1:22:58	PBPV
10-jun-12	Si	17:24:10	18:17:00	0:52:50	No se registró	No se registró	No se registró	0:52:50	PBPV
29-jun-12	Si	16:25:59	17:40:34	1:14:35	17:01:01	19:05:14	2:04:13	2:39:15	PBPV
12-jul-12	Si	14:59:30	16:25:27	1:25:57	16:31:51	16:39:58	0:08:07	1:40:28	PBPV
19-jul-12	Si	13:06:51	15:25:15	2:18:24	13:33:56	16:18:46	2:44:50	3:11:55	PBPV
10-ago-12	Si	11:51:41	14:35:07	2:43:26	No se registró	No se registró	No se registró	2:43:26	PBPV, PBXV

Ometepec, Guerrero y Pinotepa Nacional, Oaxaca en las coordenadas 16.42 latitud N y -98.36 longitud W y a 15 km de profundidad (Figura 27).

El Servicio Sismológico Nacional (SSN) reportó la ocurrencia de 280 réplicas de este sismo, de magnitudes superiores a 3.5, desde el 20 de marzo hasta el 2 de abril de 2012. De estas, 248 fueron identificadas en el registro sísmico de la componente norte de la estación Canario. El conteo fue corroborado en el registro de la estación Halcón instalada en el volcán Pico de Orizaba. Adicionalmente, en los días mencionados, la estación Canario registró otras 162 señales de menor tamaño, relacionadas con sismos regionales por su contenido de frecuencia, que se estima son parte de las réplicas de magnitud inferior a 3.5 no reportadas por el SSN.

Durante la ocurrencia del sismo del 20 de marzo y durante las réplicas inmediatamente posteriores no se observaron cambios en la dinámica de la pluma de gases o en las tasas de emisión de SO₂. Sin embargo, días después pudo observarse directamente y a través de la revisión de las imágenes obtenidas de las web-cam, que se producían exhalaciones asociadas a la ocurrencia de réplicas. Así, la réplica de la tarde del 22 de marzo, a las 23:50 GMT, sentida en gran parte del centro del país, fue también sentida en las poblaciones al SE del volcán, desde donde se tomó la imagen de la Figura 28.

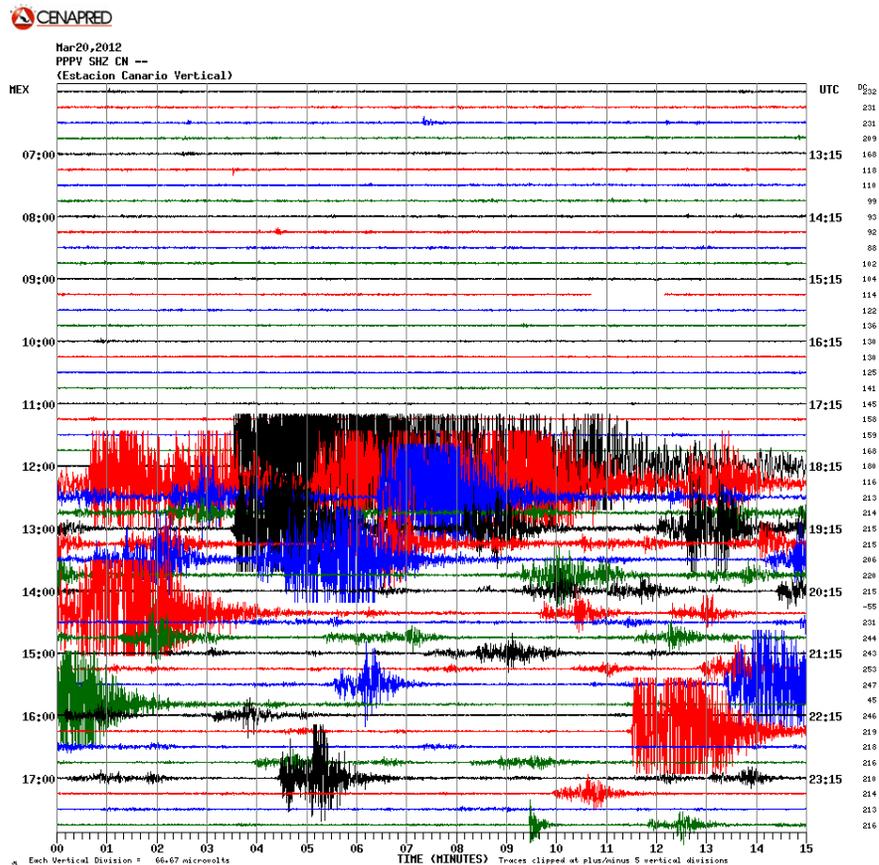


Figura 27 Registro digital en la componente vertical de la estación Canario del sismo del 20 de marzo a las 18:02 GMT y de parte de las réplicas ocurridas en las primeras horas posteriores



Figura 28 Exhalación asociada a la réplica de las 23:50 GMT del 22 de marzo. Imagen tomada desde San Baltasar Atlimeyaya

g) Energía sísmica liberada

La energía sísmica liberada por el conjunto de la actividad del volcán Popocatepetl en 2012 presentó variaciones significativas sobre la línea base, considerada entre 20 y 40 cuentas de promedio diario, en el período entre el 30 de marzo y el 3 de junio, coincidiendo con el período principal de actividad sísmica y eruptiva (Figura 29). Los valores elevados de energía sísmica liberada en el periodo del 20 de marzo al 2 de abril, están relacionados con el registro en las estaciones sísmicas del volcán Popocatepetl del sismo de Ometepec y las réplicas asociadas. Otros incrementos significativos se asociaron a las explosiones del 25 de enero y del 6 de agosto. Todos estos incrementos quedaron reflejados en la curva de energía acumulada (Figura 30).

La energía acumulada para el año 2012 fue de 66,000 cuentas, de las cuales la mayor aportación se produjo durante los meses de abril y mayo con 46,000 cuentas. Esta energía acumulada supuso un 50% de la registrada en el período de diciembre de 2000 a enero de 2001, que desembocó en la actividad eruptiva de mayor magnitud registrada en el ciclo reciente de actividad del volcán Popocatepetl.

La curva de energía acumulada muestra trayectorias cóncavas, con un comportamiento asintótico previos a los eventos explosivos de mayor intensidad registrados durante 2012, antes de la actividad del 20 de abril, 11 de mayo y 6 de agosto.

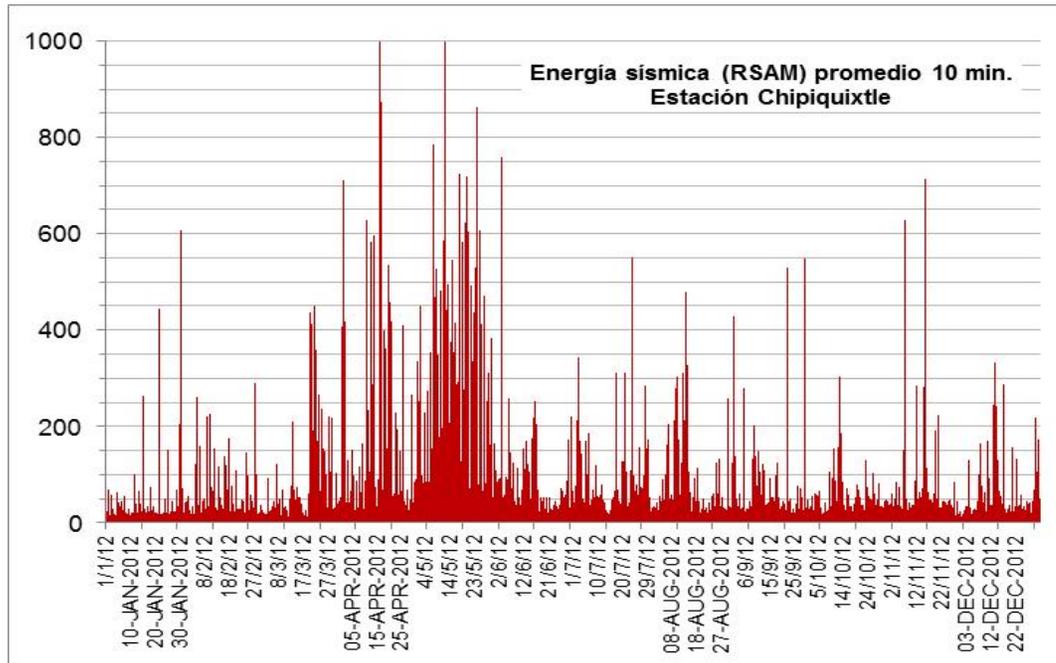


Figura 29 *Energía sísmica liberada de la estación de periodo corto en Chipiquixtle (componente vertical) durante 2012, promediada cada 10 minutos*

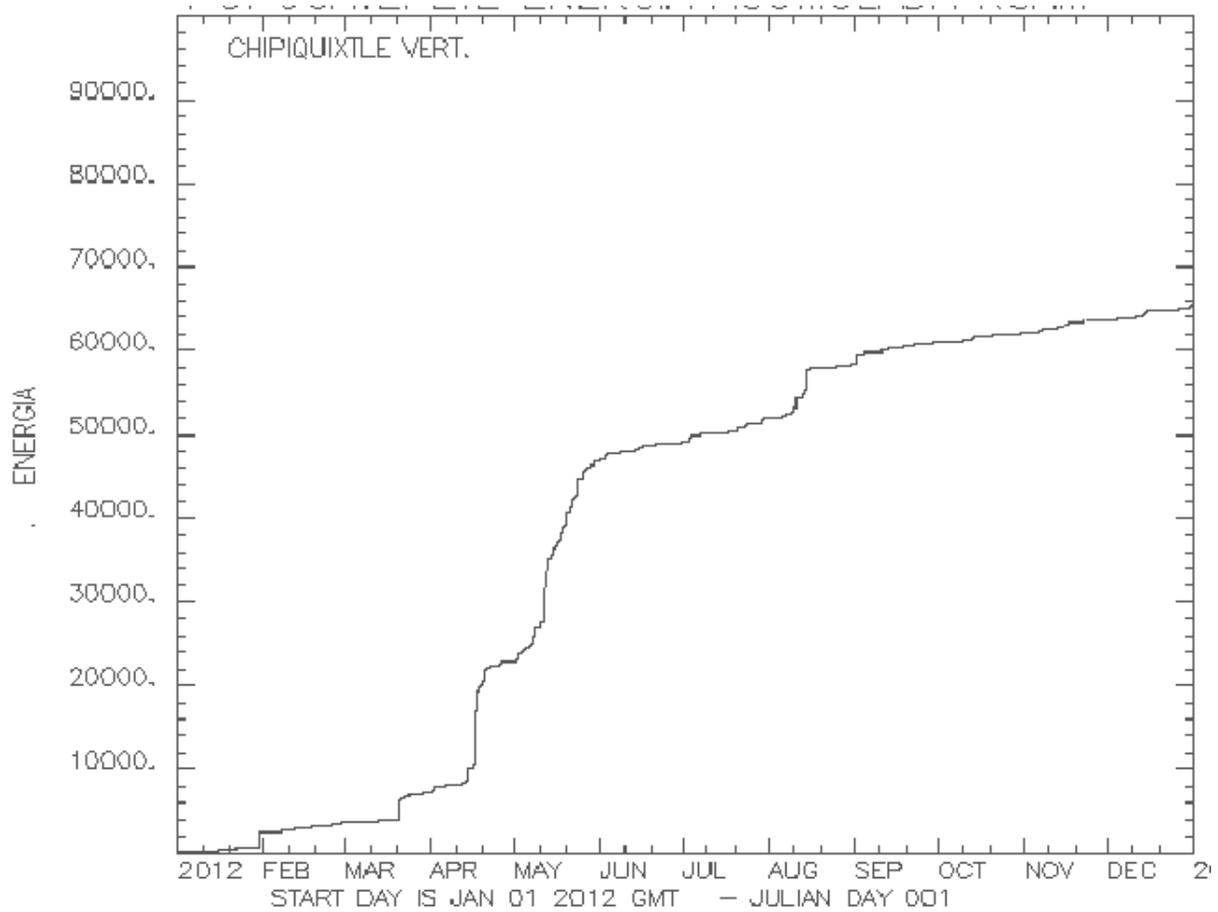


Figura 30 Acumulado de la energía sísmica liberada de la estación Chipiquixtle (componente vertical) durante 2012

Actividad explosiva

Durante el año 2012 se produjeron alrededor de 110 eventos explosivos que dieron lugar a plumas de vapor de agua y gases iguales o superiores a 1 km de altura, acompañadas de cantidades variables de cenizas (Figura 31).

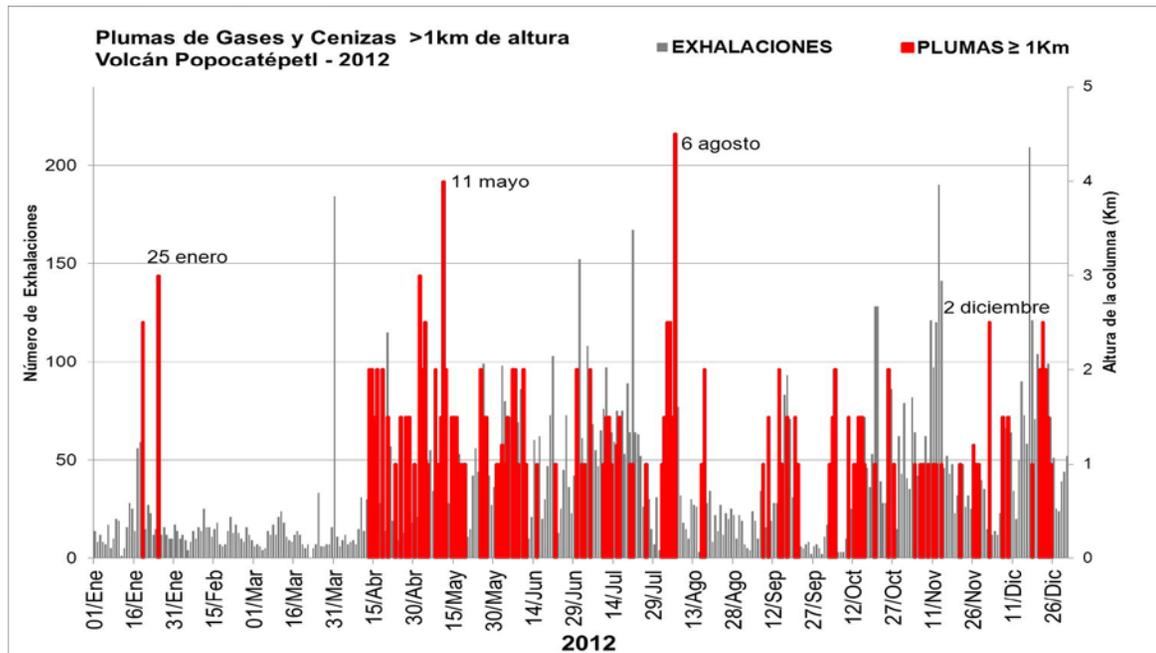


Figura 31 Cronología de exhalaciones con componente explosiva y explosiones ocurridas durante 2012. Se señalan las alturas de columna alcanzadas por las plumas de gases y cenizas.

Durante el primer trimestre de 2012 se produjeron dos eventos explosivos, el 19 y 25 de enero. El segundo de ellos, el de mayor intensidad, fue registrada por todas las estaciones sísmicas e infrasónicas de la red de monitoreo del volcán. La explosión del 25 de enero se produjo a las 17:10 h GMT y generó la proyección de fragmentos balísticos en las partes más altas de las laderas del volcán y una columna vertical de gases y cenizas que alcanzó los 3 km de altura, y que los vientos desplazaron hacia el noreste (Figura 32). La explosión quedó registrada también en las imágenes térmicas (Figura 33). No se recibieron informes de caída de ceniza en las poblaciones situadas en la ladera noreste del volcán Popocatepetl.

El incremento de actividad del volcán Popocatepetl registrado a partir de la segunda quincena de abril, dio lugar a la emisión de plumas de vapor de agua y gases con una altura superior a 1 km (Figura 31) en repetidas ocasiones, la mayoría de las cuales contenían cantidades variables de cenizas. Estas plumas se produjeron de forma muy frecuente desde mediados de abril hasta mediados de junio. En 14 ocasiones las columnas tuvieron alturas superiores a 2 km, las más importantes observadas el 2 y 11 de mayo, con 3 y 4 km de altura respectivamente. En este período las plumas, de color pardo-gris por el contenido moderado a alto de cenizas, eran sostenidas y persistentes por varias horas y estuvieron asociadas principalmente a los trenes de exhalaciones (Figura 34). Los días en que se emitieron cenizas en mayor cantidad fueron el 13, 14, 20 y 23 de abril; y el 2, 3, 5, 11, 14, 23 y 24 de mayo.



Figura 32 Secuencia de imágenes de la explosión ocurrida a las 17:10 GMT del 25 de enero de 2012. La columna de gases y cenizas alcanzó una altura de 3 km

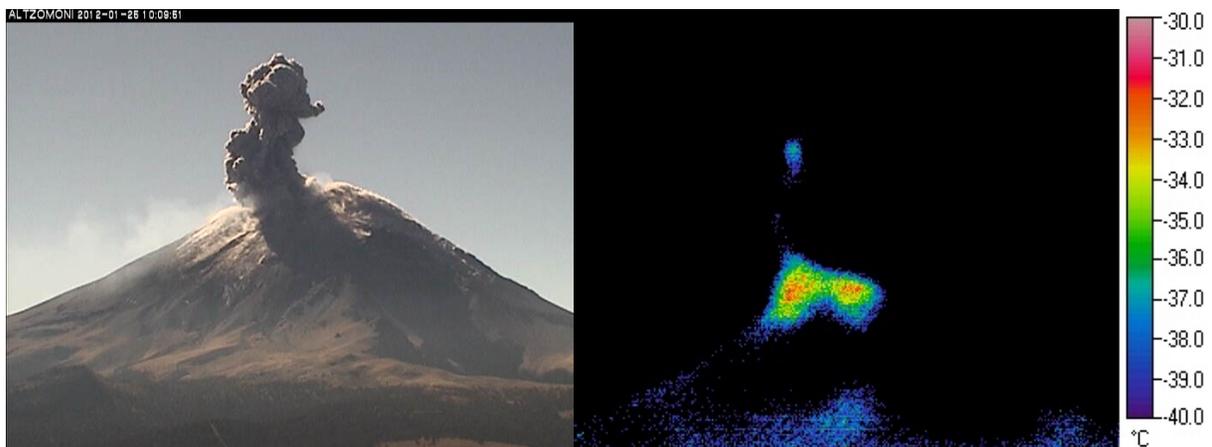


Figura 33 Imagen visible y térmica de una secuencia de la explosión del 25 de enero de 2012



Figura 34 Imágenes de las plumas de gases y cenizas persistentes generadas por la actividad del volcán Popocatepetl durante abril y mayo de 2012; en la primera fila plumas de gases y cenizas del 14 y 16 de abril captadas por las web-cam y por el satélite GOES de la NOAA; en la segunda fila pluma sostenida del 20 de abril con contenido de ceniza y en la tercera fila pluma de gases y cenizas del 25 de abril y pluma sostenida de 1 km de altura del 11 de mayo

Esta actividad estuvo acompañada frecuentemente por la emisión de fragmentos balísticos, observables principalmente durante la noche por ser incandescentes, que se depositaban sobre las partes altas de las laderas del volcán, a distancias entre 500m y 1 km del cráter. Los eventos de lanzamiento de balísticos se producían en forma repetida, pulsante y corta.

Estas emisiones se produjeron los días 13, 14, 16, 18, 20 y 30 de abril y 3, 5, del 9 al 13, 15, 19, 20 y 23 de mayo, asociadas a los segmentos de tremor y trenes de exhalaciones más importantes. Los más importantes se produjeron la noche del 13 al 14 de abril (Figura 35), el 16 y 20 de abril (Figura 36) y el 11 de mayo (Figura 37), que fueron especialmente intensos en sus fases iniciales. Concretamente el 13 de abril se registraron dos explosiones a las 22:20 h y a las 22:36 h, una hora después del inicio de las bandas de tremor espasmódico de gran amplitud. La primera explosión tuvo una duración de la fase intensa de 15 segundos, los bloques alcanzaron una distancia de 500 m sobre la ladera NNE (Figura 35). La explosión de las 22:36 h fue la de mayor intensidad, con una duración de la fase intensa de 40 segundos. Los bloques incandescentes alcanzaron distancias de 1 km sobre todas las laderas del volcán y permanecieron incandescentes por un lapso de 10 minutos, siendo captados por la cámara térmica (Figura 35). El estruendo de la explosión se percibió en San Pedro Benito Juárez.

En la tarde del viernes 11 de mayo la actividad sísmica del volcán Popocatepetl se intensificó registrándose señales de tremor con amplitudes promedio mayores a las registradas en horas y días previos (máximos de 100,000 cuentas). Se produjo una columna de ceniza que alcanzó una altura de 3 km sobre el cráter, con cantidades importantes de ceniza, que se desplazó hacia el noreste. Asimismo, se observó en repetidas ocasiones la emisión de fragmentos incandescentes, que alcanzaron hasta medio kilómetro de altura sobre el cráter, y que rodaron hasta distancias de 1 km sobre las laderas del volcán (Figura 37).

En los meses posteriores, el lanzamiento de fragmentos incandescentes fue mucho menos frecuente; se produjeron el 8, 10 y 15 de junio, el 20 de julio y el 6, 7 y 27 de agosto. Durante la segunda mitad de junio no se observaron plumas de vapor de agua y gases tan altas, periodo que coincide con una relativa calma sísmica. Las plumas de gases >1 km reaparecen durante el mes de julio, asociadas principalmente a exhalaciones discretas de mediana y gran intensidad con componente explosivo. La frecuencia y contenido de cenizas de estas plumas fueron considerablemente menores que las emitidas durante abril y mayo. Durante los primeros días de agosto, aún con la actividad sísmica disminuida, incrementa nuevamente la frecuencia con que se producen pulsos de la pluma de vapor de agua y gases, que alcanzaron entre 1.5 y 2.5 km, asociados a exhalaciones de mediana y gran intensidad. El contenido de ceniza de estas plumas fue de leve a muy leve.

A las 17:58 hora local (22:58 GMT) del 6 de agosto se produjo una explosión que generó una columna de gas y ceniza de 4.5 km de altura (Figura 38), según los informes recibidos por el sistema de control del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, y probablemente la emisión de fragmentos incandescentes sobre las laderas del volcán, aunque esto no pudo ser observado con claridad. La columna de gases y cenizas, claramente visible desde la ciudad de México, se elevó verticalmente dispersándose a mayor altura hacia el W-SW-suroeste.

La explosión se produjo después de dos semanas de actividad relativamente baja, caracterizadas por el registro de exhalaciones de baja intensidad y segmentos cortos de tremor de baja amplitud. Desde el día 26 de julio se habían registrado 12 eventos volcanotectónicos de magnitudes entre 1.2 y 1.7, con profundidades entre 8 y 2.1 km. La traza sísmica de esta explosión (Figura 39) fue muy parecida a una exhalación de tipo 1. La fase intensa de la exhalación duró aproximadamente un minuto, permaneciendo con tremor espasmódico durante unos 15 minutos. El evento fue registrado también por los sensores sónicos en Tlamacas y Colibrí. Posteriormente, entre las 02:16 y las 05:40 GMT se registró un tren de exhalaciones de 3 h 20 min de duración. En los días siguientes y hasta final de mes, la actividad sísmica de exhalaciones decreció, pero se presentaron también 8 eventos volcanotectónicos de magnitudes entre 1.5 y 1.9, con profundidades menores que los previos a la explosión, entre 3.3 y 1.6 km.

Durante el resto del mes de agosto y la primera semana de septiembre no se produjeron emanaciones de consideración, con excepción de los días 16 y 17 de agosto.

El 10 de septiembre se registró una nueva explosión, de menor intensidad que la del 6 de agosto. La columna de gases y cenizas alcanzó 1.5 km de altura y que arrojó abundantes fragmentos incandescentes sobre todas las laderas del volcán a distancias de 1.5 km, constituyendo el evento de mayor importancia de este tipo (Figura 40.) Esta explosión estuvo seguida por segmentos de tremor armónico el 11 de septiembre y por un período de actividad sísmica incrementada, entre el 14 al 21, período en el cual se observaron también las columnas más importantes de este mes, con alturas entre 1.5 y 2 km (Figura 31).

Entre octubre y diciembre se produjeron 27 exhalaciones, algunas con componente explosiva, que generaron plumas de vapor de agua y gases con alturas iguales o superiores a 1 km (Figura. 31). En 11 ocasiones esta actividad estuvo asociada a la emisión de fragmentos incandescentes sobre las laderas del cráter a distancias de 500 hasta 1 km del cráter. El evento más importante de este tipo se produjo el 20 de octubre (Figura 41).

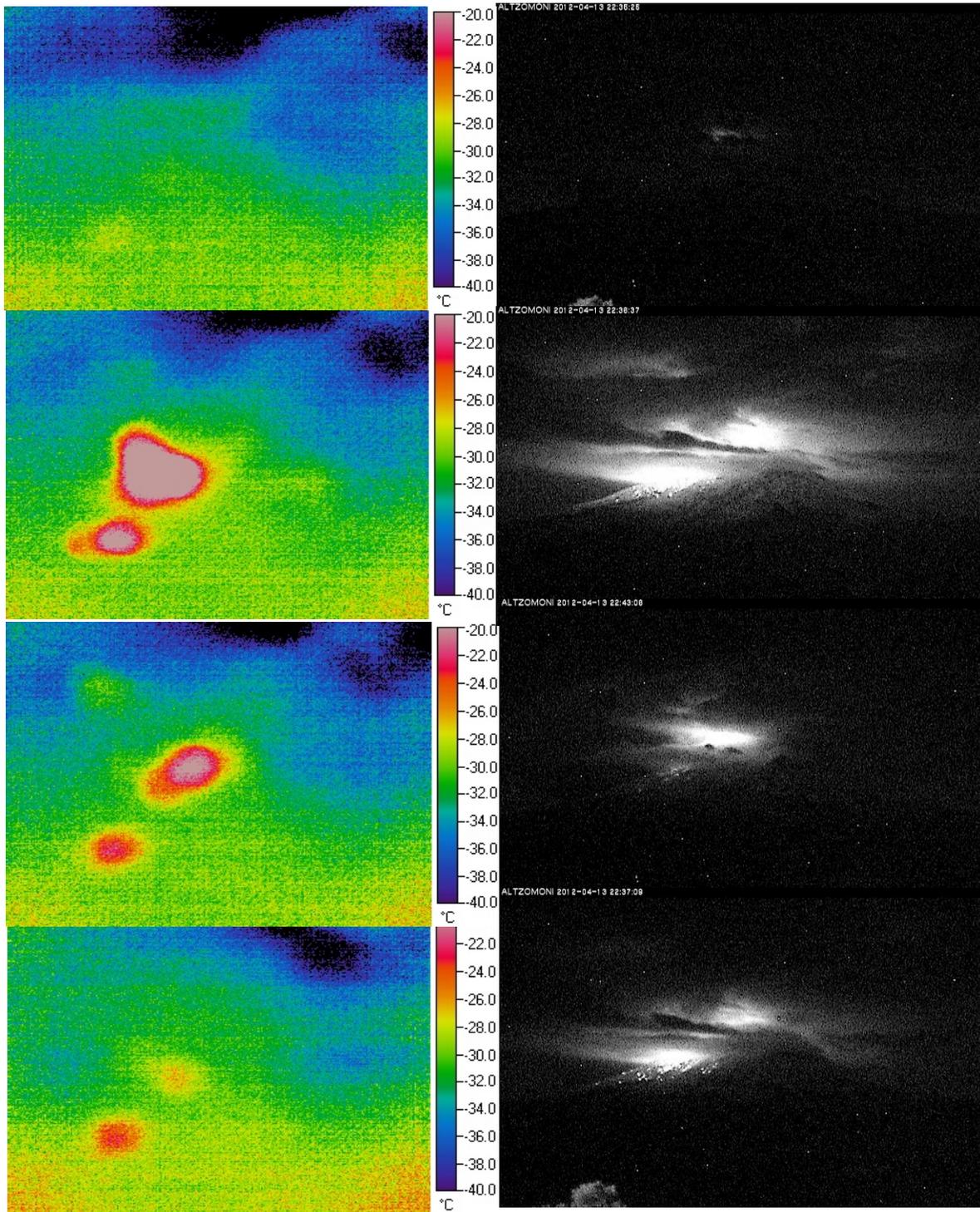


Figura 35 Registro de la cámara térmica de la emisión de bloques incandescentes lanzados por las explosiones del 13 de abril, a las 22:20 h y a las 22:36 h



Figura 36 Lanzamiento de fragmentos balísticos y pluma de gases y cenizas el 20 de abril

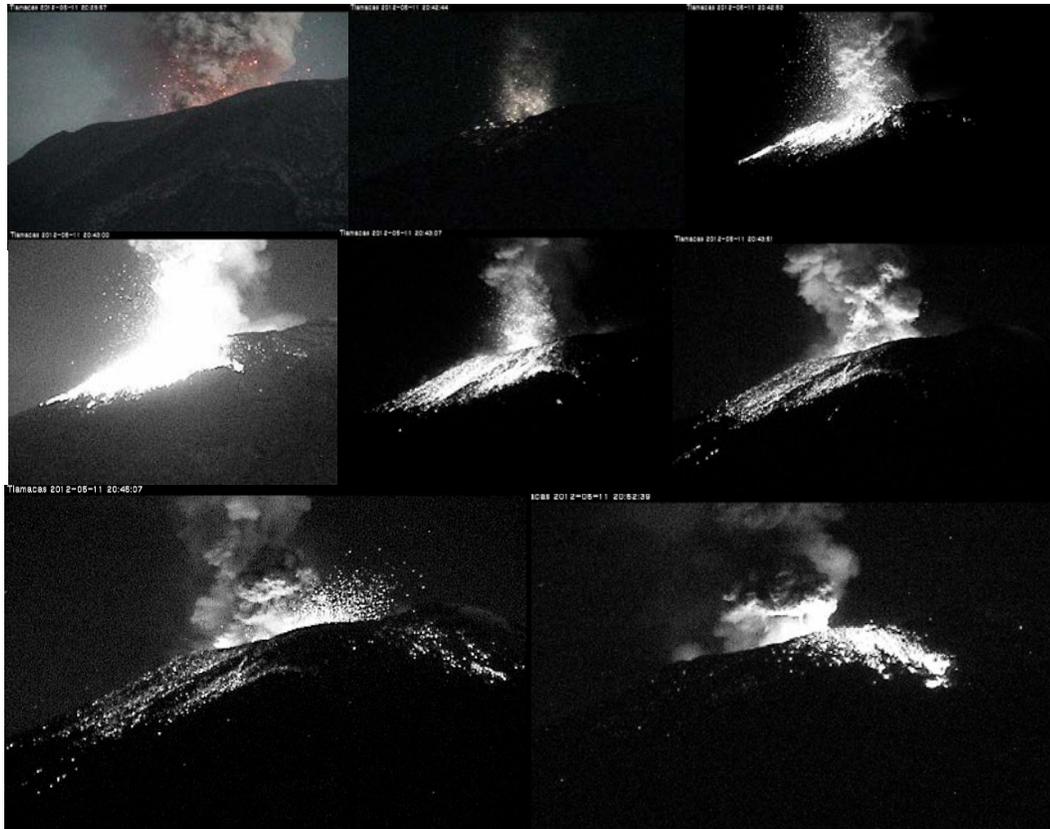


Figura 37 Emisión de fragmentos incandescentes y columna de gases y cenizas asociada a la actividad eruptiva de la noche del 11 de mayo



Figura 38 Columna de ceniza a generada por la explosión del 6 de agosto de 2012, registrada por la cámara-web ubicada en la población de Tochimilco, en el flanco sur del volcán

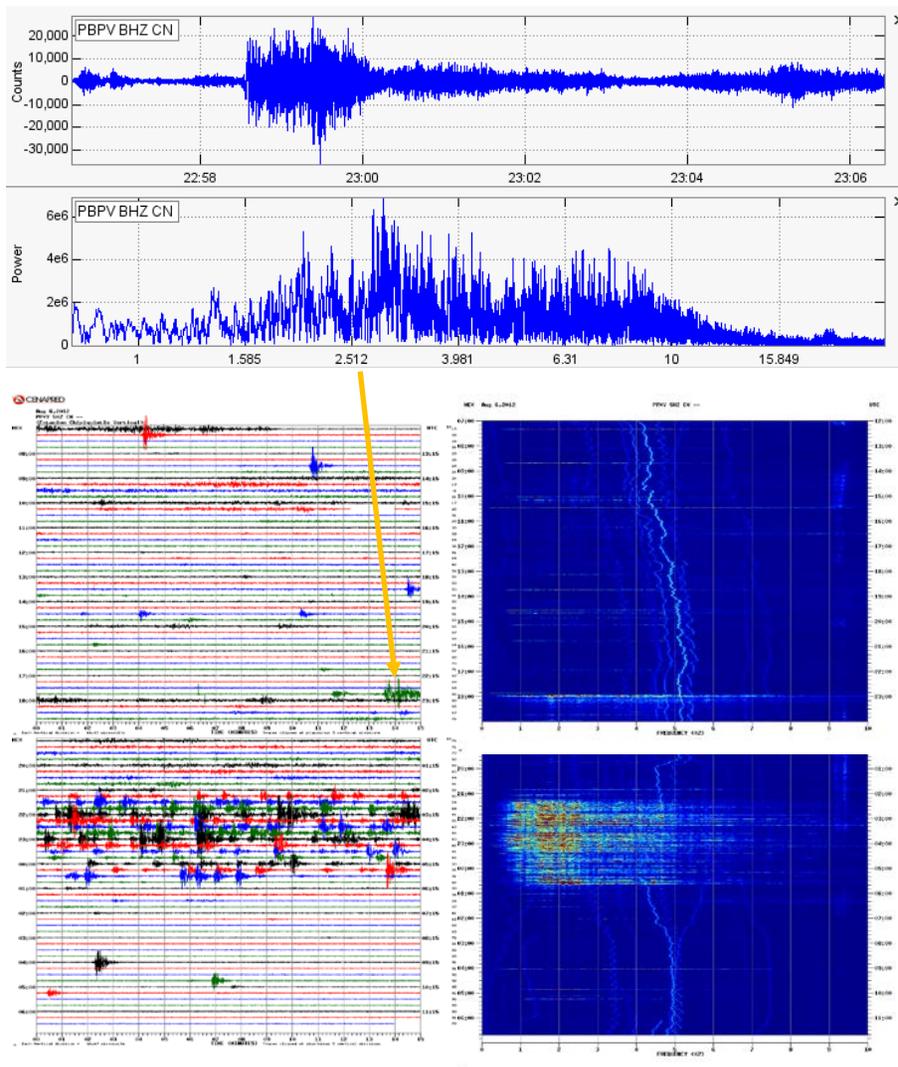


Figura 39 a) Traza y espectro de la señal asociada a la explosión del 6 de agosto (22:58 GMT) y b) Helicorders y espectrograma del 7 de agosto mostrando la traza de la explosión y el tren de exhalaciones posterior

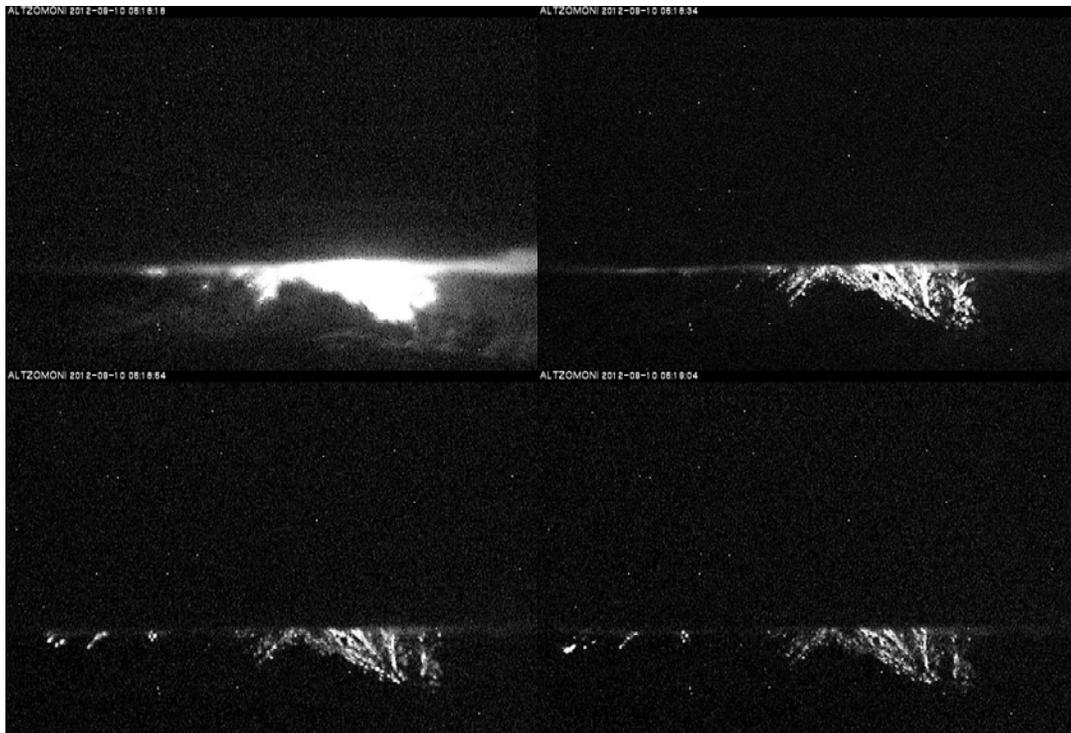


Figura 40 Explosión ocurrida a las 05:19 h del lunes 10 de septiembre, que no pudo ser observada completamente por las condiciones de nubosidad en la parte alta del volcán. Sin embargo, la web-cam en Altzomoni captó la caída de fragmentos hasta 1.5 km sobre la ladera N, NE y NW del volcán que permanecieron incandescentes durante varios minutos

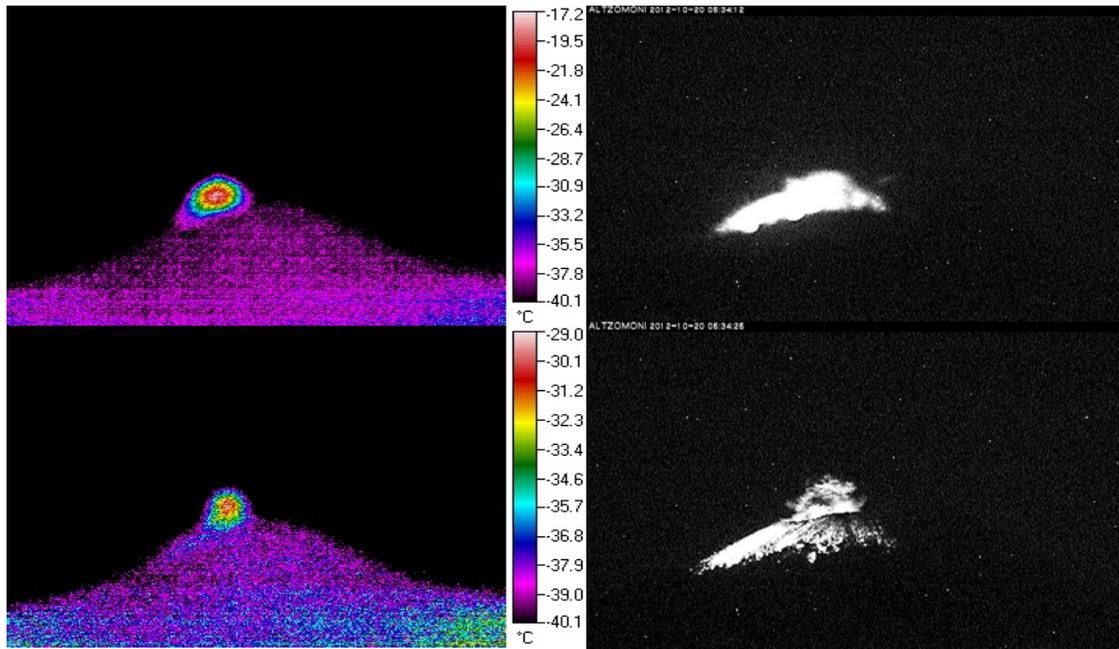


Figura 41 Registro de la cámara térmica de la emisión de bloques incandescentes lanzados por la explosión del 20 de octubre a las 10:34 h GMT

En diciembre, se registró una columna de gases y cenizas de 2.5 km de altura el día 2, asociada a una exhalación con componente explosivo a las 15:03 hora local. Asociado también a una exhalación de este tipo, a las 22:22 hora local del día 16 se produjo la emisión de fragmentos incandescentes sobre la ladera noreste del volcán a unos 500 m de distancia. Entre los días 21 y 24 de diciembre, acompañando el incremento de actividad sísmica de la última quincena del año se produjeron diversas exhalaciones con componente explosivo que dieron lugar a columnas verticales y densas, de gases y cenizas, de 2 km de altura. Las más importantes se produjeron el día 21, a las 08:40 hora local (Figura 42) que alcanzó una altura de 2.5 km.



Figura 42 Imágenes de las cámaras en Tianguismanalco (este) y Tochimilco (sur) de la exhalación con componente explosiva del 21 de diciembre a las 08:40 hora local. La columna de gases y cenizas alcanzó 2.5 km de altura

Distribución y áreas de afectación de las principales emisiones de ceniza

Se construyó una base de datos de los sitios afectados por caída de cenizas a partir del 13 de abril, con los reportes emitidos por el CENACOM, llamadas telefónicas de avisos de caída de ceniza recibidas en el CENAPRED, así como algunos avisos del SENEAM. Esta base de datos tiene como objetivo poder realizar cálculos del área afectada por este fenómeno, así como estimar los volúmenes de ceniza que pudieron ser emitidos por el Popocatepetl en cada uno de los eventos discretos.

Los días en que se emitieron cenizas en mayor cantidad fueron el 13, 14, 20 y 23 de abril; y el 2, 3, 5, 11-12, 14, 23 y 24 de mayo. Las emisiones de ceniza tuvieron una distribución de mediano alcance. Se presentó caída de ceniza no sólo en las poblaciones cercanas al volcán sino también en sitios ubicados a decenas de kilómetros (Figura 43). Las exhalaciones con ceniza que se presentaron durante abril fueron llevadas por los vientos principalmente al este, afectando diversas poblaciones del Estado de Puebla, aunque también se presentó caída de ceniza en algunos municipios del Estado de México, al oeste, y Morelos, al suroeste (Tabla 3, Figura 43). El área afectada por caída de cenizas el 13 de abril fue de 2,600 km² y de 3,700 Km² el día 14 (Martín del Pozzo, com. pers.).

Durante los primeros días de mayo los vientos cambiaron de dirección y dispersaron las cenizas principalmente al noroeste, ocasionando caída de ceniza en algunos municipios del Estado de México y en las delegaciones Xochimilco, Coyoacán, Tlalpan, Venustiano Carranza, Benito Juárez y Cuauhtémoc del Distrito Federal, incluido el Aeropuerto Internacional Benito Juárez. También se registró caída de ceniza en Tlaxcala al noreste y en Morelos, al suroeste (Tabla 3, Figura 43). La caída de ceniza del 3 de mayo cubrió un área de 1,900 Km².

En la segunda semana de mayo se presentó caída de ceniza principalmente en los municipios del Estado de Puebla, aunque excepcionalmente el 8 de mayo se reportó caída de ceniza en Tepeji del Río, Hidalgo, localizado a más de 120 km al noroeste del volcán. Durante esta semana se registró ceniza en el Aeropuerto Internacional Hermanos Serdán de Puebla, por lo que permaneció sin operaciones los días 8 y 10 de mayo. El 11 de mayo se presentó una de las emisiones con mayor cantidad de ceniza. La ceniza se distribuyó hacia el noreste hasta Huejotzingo sin que se notara su presencia en el Aeropuerto Hermanos Serdán. El área afectada por esta caída fue de 1,700 km². Las emisiones con ceniza se redujeron notablemente después del 11 de mayo. Destacan la emisión del 14 de mayo que depositó ceniza en los municipios del sur de Tlaxcala y la emisión del 24 de mayo que distribuyó sus cenizas hacia el sureste.

Tabla 3. Municipios afectados por caída de ceniza.

Fecha	Municipios afectados			Área cubierta
13/04/12	Edo. de México	Puebla	Morelos	2,600 km²
	Amecameca Atlautla Ayapango Ecatzingo	Atlixco, Huejotzingo, Puebla, S. P. Benito Juárez, S.P. Cholula, S. Xalitzintla, Tianguismanalco	Tetela del volcán	
14/04/12	Puebla			3,700 km²
	Atlixco Calpan Cuatlancingo Domingo Arenas	J.C. Bonilla, Nealtican, Ocoyucan, Puebla y S.J Tecuanipan Serdán Tecamachalco	S.M. Xoxtla S. Nicolás S.I. Cholula Tianguismanalco	
3/05/12	Edo de México	Distrito Federal	Tlaxcala	1,900 km²
	Amecameca Atlautla, Chalco, Ecatzingo, Ixtapaluca, Ozumba Valle de Chalco	Coyoacán, Iztapalapa, Milpa Alta, Nezahualcoyotl, Tláhuac, Venustiano Carranza y Xochimilco	Nativitas Tepetlipa Zacatelco	
11/05/12	Puebla			1,700 km²
	Calpan Domingo Arenas Huejotzingo Metepec, Nealtican	Puebla S.A, Cholula Texmelucan S.P. Benito Juárez Cholula	San Nicolás de los Ranchos, Xalitzintla y S.I. Cholula	

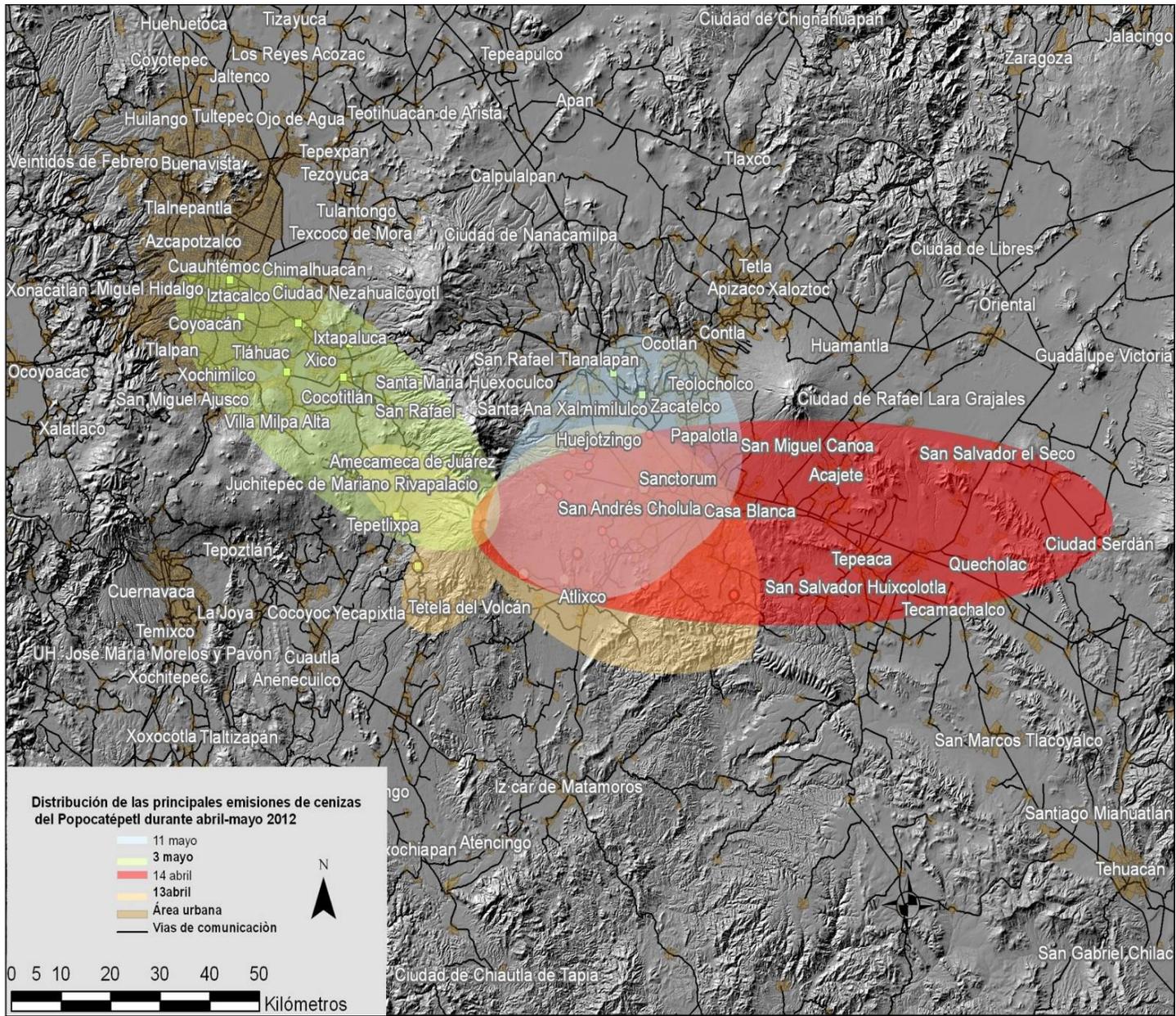


Figura 43 Mapa de distribución de las principales caídas de ceniza de los meses de abril y mayo. Se muestran las emisiones del 13 y 14 de abril y del 3 y 11 de mayo. Distribución según reportes del CENACOM. La distribución del 14 de abril y 11 de mayo fue ampliada con datos de la Dra. Martin del Pozzo.

Anomalías térmicas

El sistema MODVOLC (Wright et al., 2002, 2004), de la Universidad de Hawaii, basado en el análisis de imágenes MODIS (resolución de 1 km), emitió 282 reportes de anomalías térmicas en el cráter del Popocatepetl durante 2012 (Figura 44a). La intensidad de la anomalía térmica se valora a través del Índice Térmico normalizado (NTI, por sus siglas en inglés) que se obtiene de normalizar la radiancia espectral obtenida en diferentes bandas de las imágenes MODIS.

Las anomalías reportadas para el volcán Popocatepetl se mantuvieron, en su mayoría con un NTI entre -0.8 y -0.4. Sin embargo, de marzo a mayo y en días puntuales de julio, agosto y septiembre se presentan anomalías con un NTI mayor. Los mayores valores de este índice se registraron a finales de marzo (entre los días 17 y 22) y posteriormente durante la segunda quincena de abril, los días 21 y 25 (NTI= -0.1 y -0.3 respectivamente). Previamente se habían registrado anomalías significativas en enero, el día 5, coincidiendo con el registro de un VT de magnitud 3.2 y la noche del 25 de enero, con posterioridad a la explosión registrada ese día.

Entre el 15 de junio y el 4 de julio no se tuvieron reportes, período que coincide con actividad sísmica disminuida y la ausencia de plumas de gases de altura significativa. Durante el mes de agosto reaparecen las anomalías, mostrando una tendencia a disminuir en intensidad. Los días 21 de julio y 4 de agosto se registraron anomalías térmicas superiores a -0.4 de NTI, así como el 23 de septiembre. El conjunto de anomalías en el último trimestre del año muestran una tendencia a la baja con relación a las identificadas durante el período de abril-mayo y el 23 de septiembre, aunque la densidad de las anomalías es mayor que en el resto del año.

Las anomalías registradas en abril son las mayores detectadas durante 2012 y desde que se tienen datos, a partir del año 2000 (Figura 44b). En general, la intensidad promedio de las anomalías de abril y mayo de 2012 es ligeramente superior a las detectadas a finales del año 2000 e inicios de 2001.

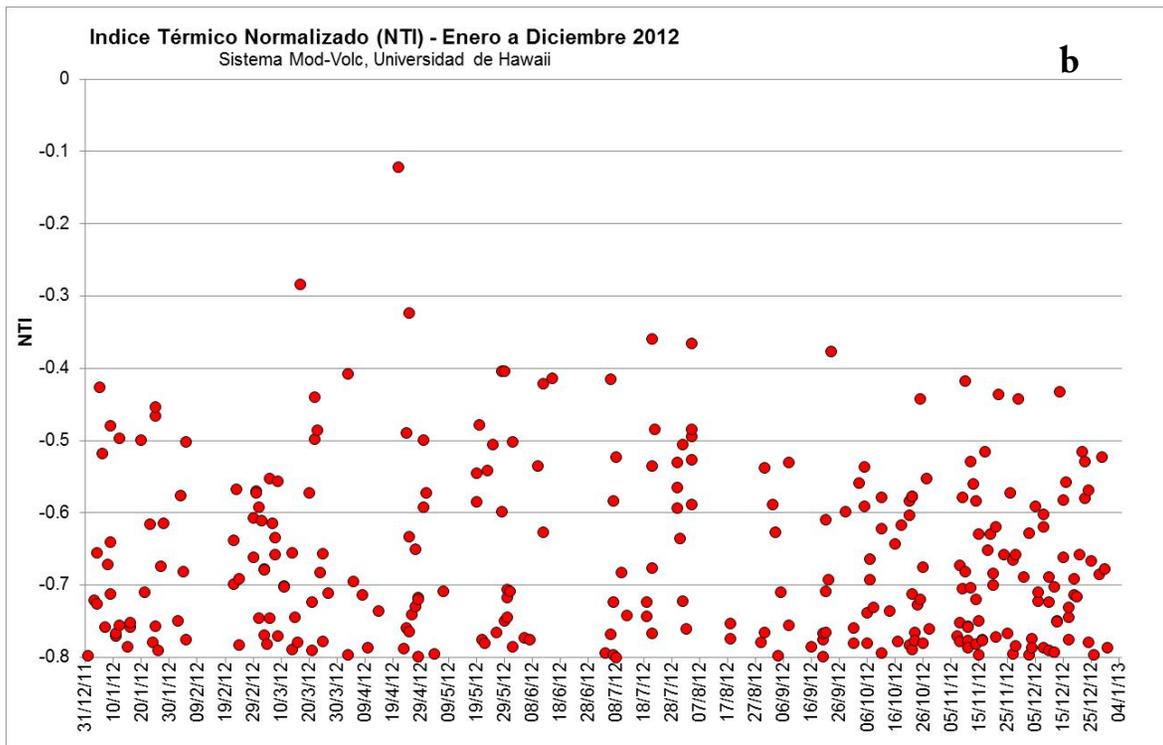
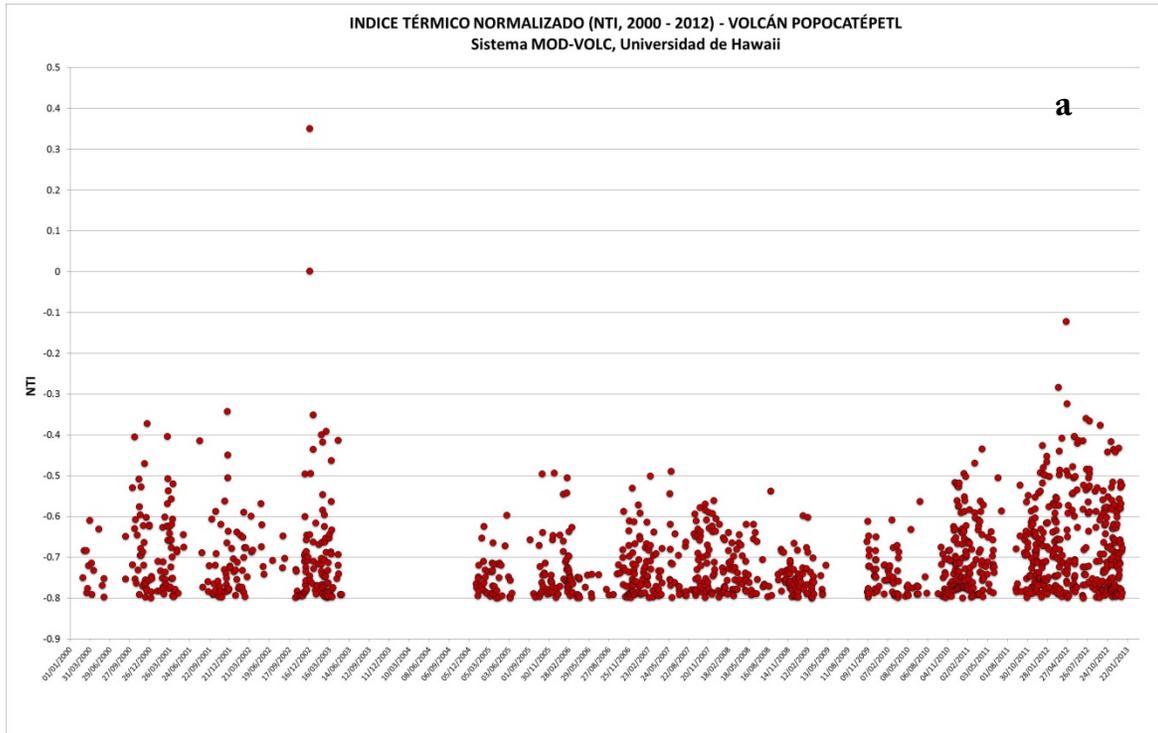


Figura 44 Índice Térmico Normalizado de las anomalías térmicas detectadas por el sistema MODVOLC sobre el cráter del volcán Popocatepetl: a) Anomalías registradas en 2012 y b) Registro histórico de anomalías desde 2000 a 2012

Monitoreo de Gases

El dióxido de azufre (SO_2) es uno de los principales gases volcánicos. El sistema de monitoreo del volcán Popocatépetl cuenta con dos sistemas de medición de este gas: la red DOAS (Figura 45) para medición continua, con cuatro equipos instalados en las estaciones Tlamacas (norte), Cruz Blanca (noroeste), Chipiquixtle (oeste) y Colibrí (sureste) y un equipo COSPEC para la realización de mediciones discretas a través de transeptos debajo de la pluma de gases. Durante 2012 estuvieron funcionando correctamente dos de los equipos DOAS (Tlamacas y Chipiquixtle) y parcialmente el de la estación Colibrí. Con el equipo COSPEC se realizaron 15 mediciones a lo largo de 2012.

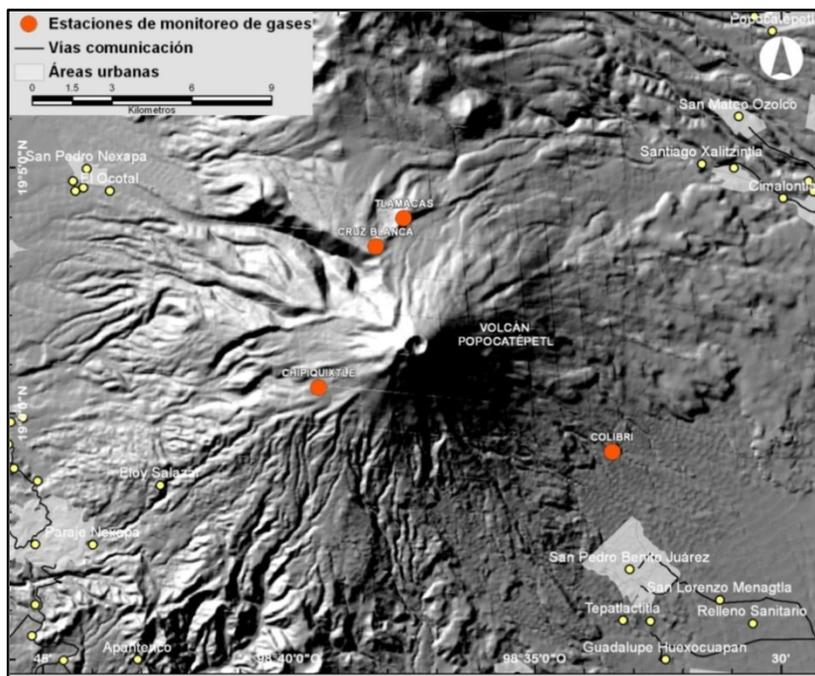


Figura 45 Localización de las estaciones DOAS para el monitoreo de la tasa de emisión del dióxido de azufre (SO_2).

a) Mediciones de la red DOAS

Las mediciones con DOAS de la tasa de emisión de SO_2 mostraron una tendencia clara a incrementar a partir de junio de 2011 y durante toda la segunda mitad de ese año. Este incremento se confirmó a mediados del mes de enero y febrero de 2012, con un promedio diario de emisión superior a

las 5,000 t/día.

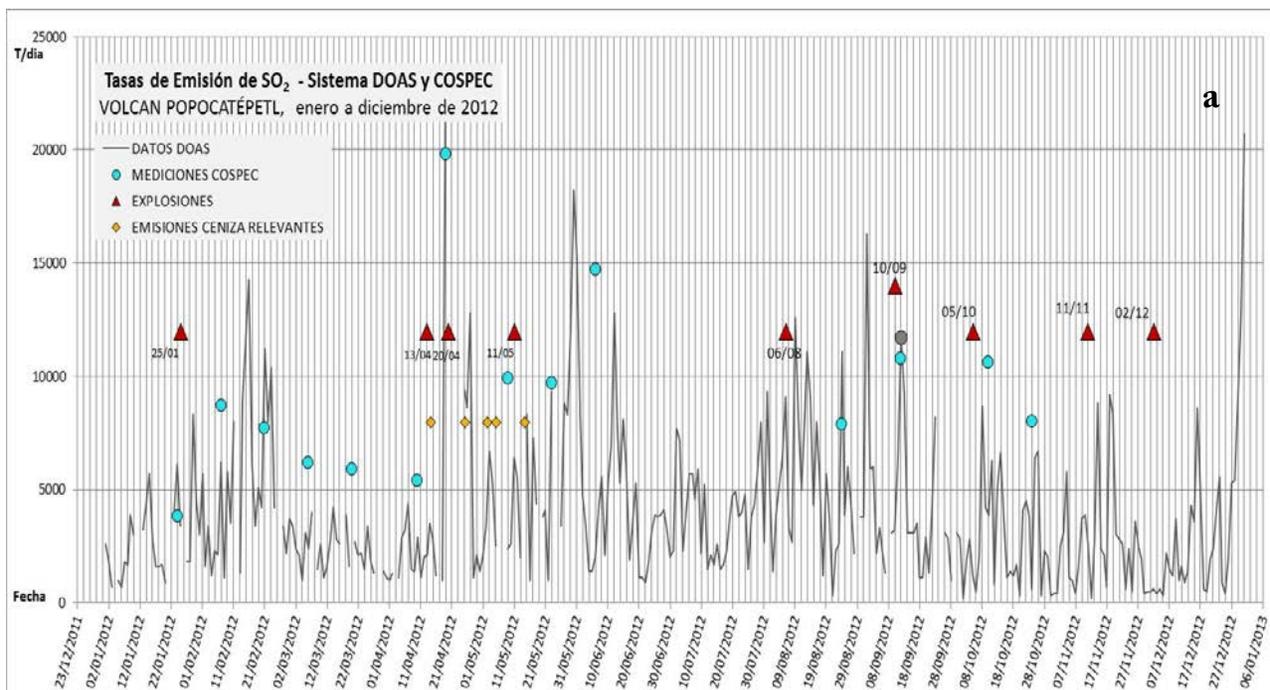
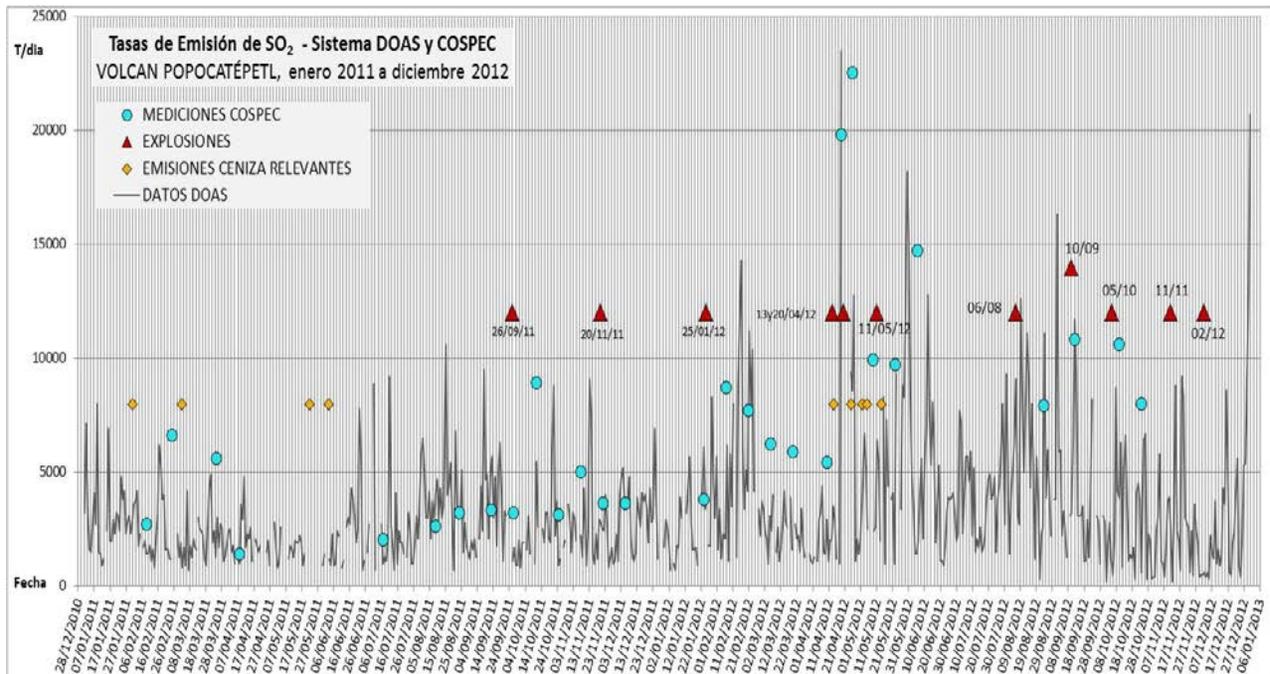


Figura 46 a) Mediciones continuas de emisión de SO_2 obtenidas con la red DOAS del Instituto de Geofísica de la UNAM y mediciones discretas obtenidas con el equipo COSPEC del CENAPRED desde enero a diciembre de 2012 y b)

Después de la explosión del 25 de enero se registraron valores de 8,300 t/día el 29 de enero y de 5,700 t/día el 1 de febrero. Entre el 15 y el 23 de febrero, coincidiendo con un incremento de la actividad sísmica, se registraron tasas superiores a las 10,000 t/día, con un valor máximo de 14,300 t/día el día 16 (Figura 46 b).

En el periodo del 27 de febrero al 19 de abril hay un descenso significativo de las tasas de emisión, que se confirmó con las mediciones de COSPEC, las cuales siguieron la misma tendencia (Figura 46b). El promedio diario de emisión en marzo fue de 2,200 t/día y de 3,900 t/día en abril, por debajo de la línea base de 4,000 t/día.

A partir de la segunda semana de abril y hasta el 12 de junio se observó una tendencia al alza en las tasas de emisión medidas con la red DOAS, tanto en los valores mínimos como máximos. La tasa diaria promedio durante este período fue de 5000 t/día. Sin embargo hubo una gran variabilidad, y fueron significativos los picos registrados el 19, 25 y 27 de abril, de entre 10,000 y 23,000 t/día y del 29 al 31 de mayo con picos entre 11,000 y 15,000 t/día. El último de estos picos se registró el 12 de junio, con 12,800 t/día.

Durante el mes siguiente se registró un descenso en las tasas de emisión por día, sin ser tan acusado como el registrado en marzo. Los promedios diarios de emisión de SO₂ durante mayo y junio se mantuvieron sobre la línea base, con valores ligeramente superiores a las 4,000 t/día.

A partir del 20 de julio y durante los meses de agosto y septiembre se registra un nuevo incremento en las tasas de emisión. Los promedios diarios en estos dos meses fueron de 5,000 t/día y 4,000 t/día, pero se registraron algunos picos con valores superiores a las 10,000 t/día, como el 9 (12,600 t/día), el 13 de agosto (11,100 t/día) y el 1 de septiembre (16,300 t/día). Aunque desde inicios de septiembre y hasta finales de octubre, se presentaron fallas en el equipo DOAS en Colibrí, fue posible obtener mediciones discretas con los equipos COSPEC (CENAPRED) y Móvil-DOAS del Instituto de Geofísica de la UNAM, el día 12 de septiembre, en las que se obtuvieron resultados de 10,800 t/día y 11,700 t/día respectivamente, que parecen corroborar la tendencia al alza mencionada durante septiembre.

En el último trimestre del año el promedio de la tasa de emisión de este gas fue algo inferior a las 3,000 t/día, aunque esporádicamente se registraron tasas superiores a las 8,000 t/día. Los valores de promedio mensual de octubre pudieron ser afectados por fallas en el equipo. En noviembre y diciembre las tasas de emisión durante varios días fue inferior a 1,000 t/día, especialmente en diciembre (del 29 de

noviembre al 5 de diciembre, el 18-19 de diciembre y 24-25 de diciembre). Estas bajadas bruscas en la tasa de emisión fueron previas a las exhalaciones con componente explosiva que emitieron fragmentos incandescentes, el 5 de octubre, el 11 de noviembre y el 3 de diciembre.

En la última quincena de diciembre la tasa de emisión por día incrementó paulatinamente, aun con fluctuaciones significativas. A finales de diciembre los valores obtenidos con la red DOAS muestran una clara tendencia al alza. Los días 30 y 31 se registraron 12,800 y 20,700 t/día, respectivamente. El valor del 31 de diciembre es el segundo más alto registrado durante el 2012, después del 19 de abril (23,500 t/día).

La tasa de emisión de dióxido de azufre acumulada, medida por la red DOAS (Figura 47) muestra cambios de pendiente significativos entre el 12 y 22 de febrero, entre el 17 y el 27 de abril, entre el 25 y 31 de mayo y entre el 25 y 31 de diciembre. Otros cambios notables de la pendiente pero de menor magnitud que los mencionados se observan el 1-2 de septiembre y del 15 al 20 de noviembre.

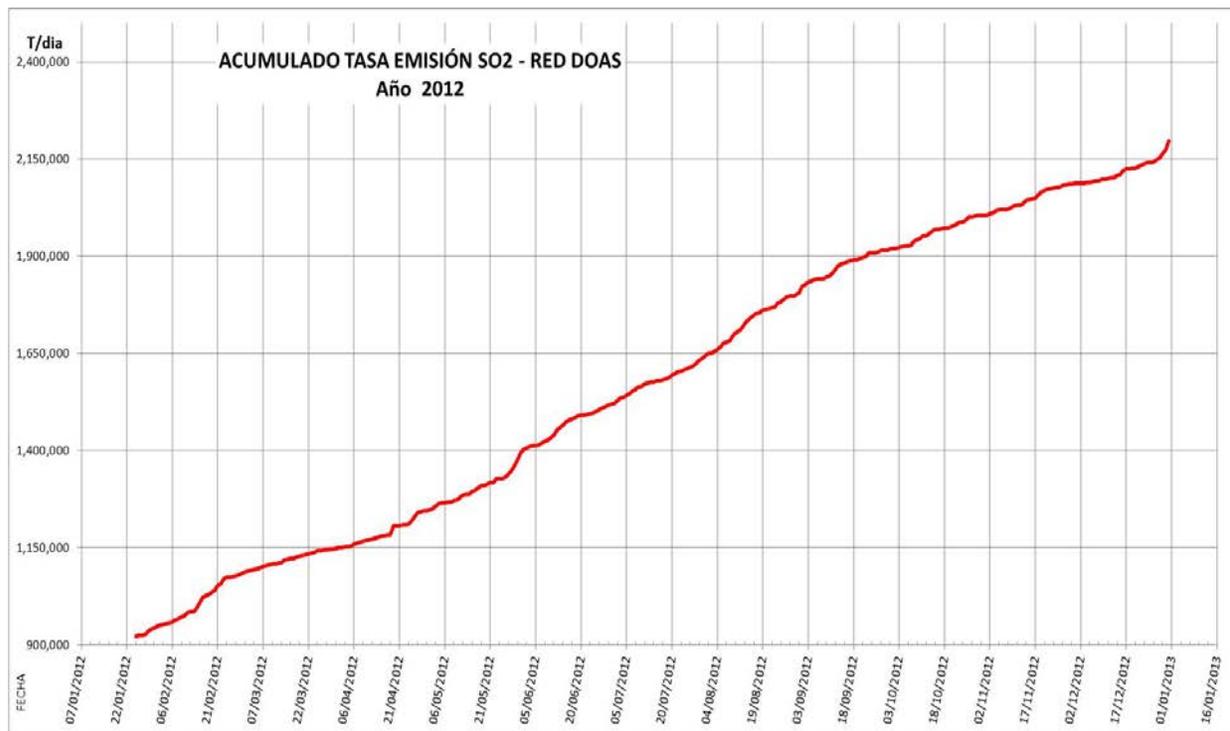


Figura 47 Acumulado de las tasas de emisión diaria de SO₂ medidas con la red DOAS del Instituto de Geofísica de la UNAM

b) Mediciones con COSPEC

Entre el 24 de enero y el 24 de octubre de 2012 se realizaron 15 mediciones con el equipo COSPEC,

cuyos resultados muestran de forma general una tendencia similar a los registrados con la red DOAS (Figura 46).

Aunque los datos de las dos técnicas de monitoreo de gases no pueden correlacionarse directamente, ambas muestran tendencias parecidas, de incrementos en las emisiones durante las dos semanas centrales del mes de febrero, el descenso de las tasas de emisión durante marzo y un incremento significativo durante abril y mayo, así como valores incrementados en los primeros días de septiembre.

Los valores obtenidos oscilaron entre las 3,800 t/día, registrado en el mes de enero a y 22,500 t/día el 26 de abril. El promedio anual de los valores de tasas de emisión medidos con COSPEC fue de 10,000 t/día, aunque debe considerarse este dato con reservar, por ser pocos el conjunto de datos considerados. Exceptuando el valor de enero, el resto de datos fueron superiores a las 5,000 t/día y desde abril hasta final de año se tuvieron valores superiores a las 9,000 t/día. Los valores más altos medidos con el COSPEC se obtuvieron en abril, con 19,800 t/día el 19 de abril y 22,500 t/día el 26 de abril.

Monitoreo de Deformación

La red de inclinómetros del volcán Popocatepetl consta de dos equipos situados en Chipiquixtle y en Nexpayantla.

El inclinómetro en Chipiquixtle mostró una alta correlación de las variaciones en sus dos ejes, con los datos de temperatura, lo que indicaría que este equipo no operaba correctamente, por lo que no se presentan los datos en este informe. Por otra parte, debido a una tormenta eléctrica en la parte alta del volcán a finales de julio, que afectó la estación Chipiquixtle, se perdió la recepción de datos de este instrumento. A mediados de diciembre se instaló un nuevo equipo en esta ubicación, cuyos datos se analizarán en un futuro próximo para incorporarlos al análisis de actividad del volcán.

La operación del inclinómetro en Nexpayantla (sector NW del volcán) fue restablecida en los últimos días del mes de febrero de 2012 por área de Instrumentación Volcánica y desde entonces se han obtenido buenos datos, con excepción de algunos períodos muy puntuales. En este equipo la mejor respuesta es la del eje de las y orientado hacia el cráter del volcán (dirección SE-NW). Los datos registrados para este

eje se presentan en la figura 48, junto con el comportamiento de la temperatura, cuyos valores se escalaron para efectos de representación.

El pico de deformación entre los días 20 y 22 de marzo se asocian a la respuesta del instrumento al sismo regional de $M_w=7.4$ del 20 de marzo en Ometepec y algunas de las réplicas más importantes.

En los datos del eje de la Y en Nexpayantla puede observarse una variación de $-25 \mu\text{rad}$ (Figura 48), desde inicios de marzo hasta los primeros días de mayo. En las siguientes semanas se presenta una fluctuación con una ligera tendencia a la recuperación hasta el 19 de julio. Desde esa fecha se produce nuevamente un cambio de pendiente en los datos, con una variación de aproximadamente $-10 \mu\text{rad}$ que se hace más acusada durante los últimos días de agosto. En septiembre los muestran una variación significativa con relación a agosto, con tendencia a recuperar los niveles previos a la crisis eruptiva de abril-mayo de este año. Durante octubre se registró una tendencia similar a la de septiembre, con una tendencia al alza de los datos. Esta tendencia cambia claramente entre el 21 y 28 de diciembre, coincidiendo con un incremento de la actividad sísmica y en la tasa de emisión de gases. Los datos presentan una nueva alza en los últimos días del mes. Cabe señalar que no se tuvieron datos entre los días 7 al 24 de noviembre, por fallas en la transmisión de los datos.

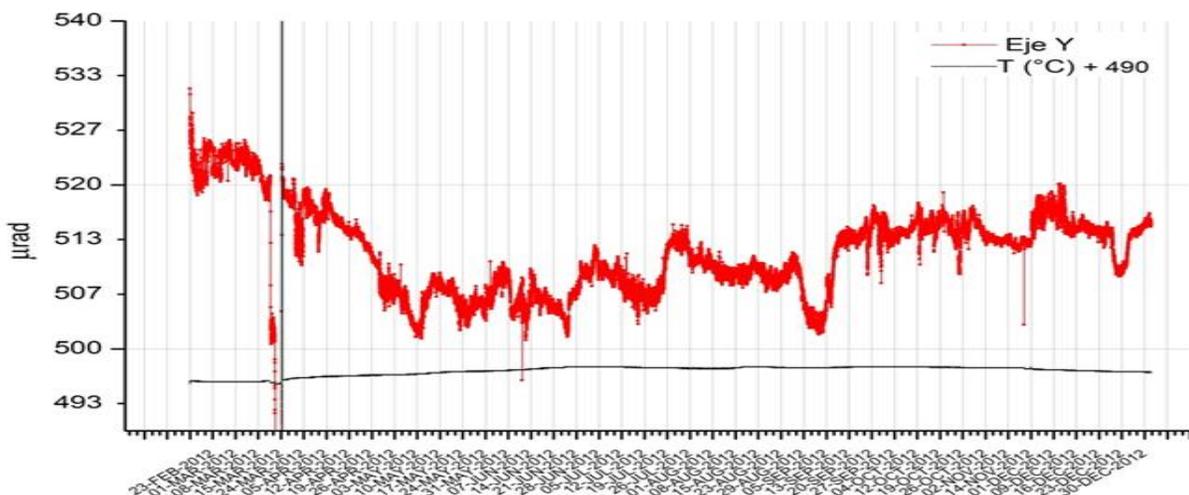


Figura 48 Registro del eje y del inclinómetro en Nexpayantla de febrero a diciembre de 2012

Monitoreo geoquímico de aguas

El monitoreo geoquímico de aguas en el volcán Popocatepetl se realiza desde 1995. Durante 2012 se realizaron siete campañas de muestreo y medición en seis manantiales y un pozo de extracción ubicados al SW, S y SE del volcán, en los alrededores de Cuautla (Morelos) y Atlixco (Puebla), a distancias entre

18 y 40 km del cráter del volcán (Figura 49). Normalmente son seis los muestreos que se realizan al año, en 2012 debido al incremento de actividad a partir de abril, se realizó un muestreo adicional durante ese mes.

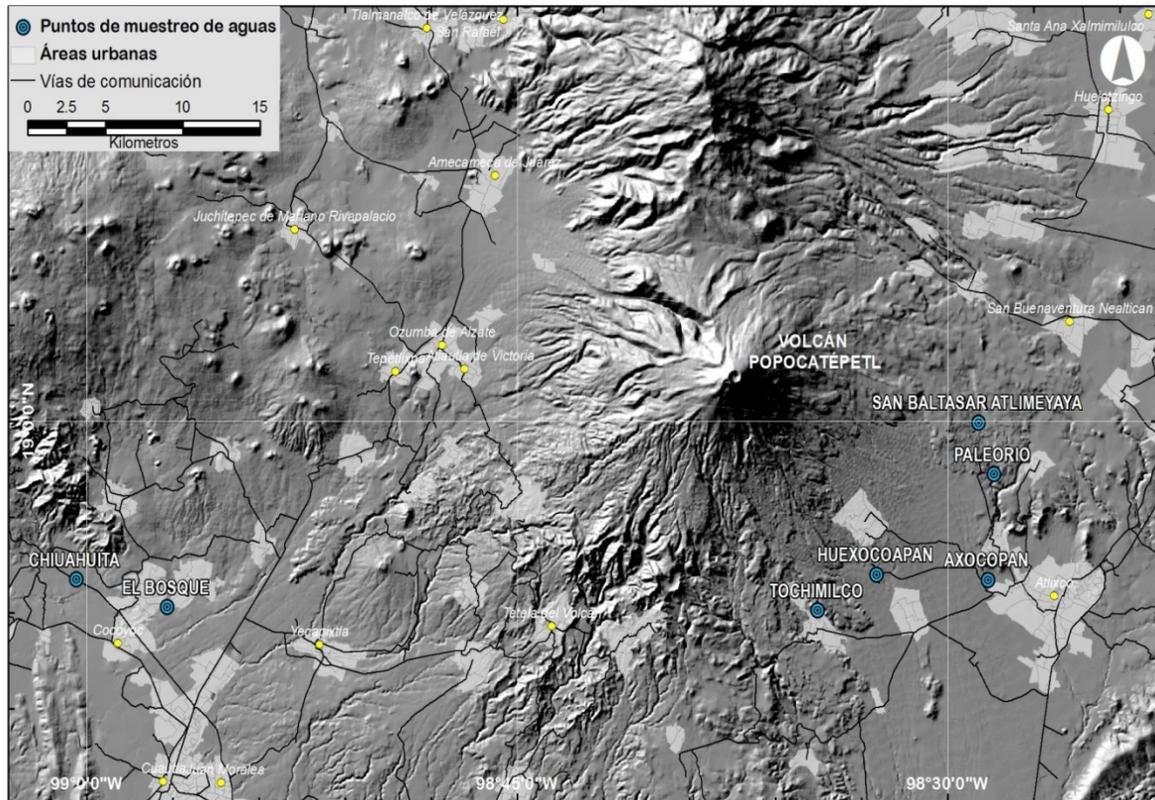
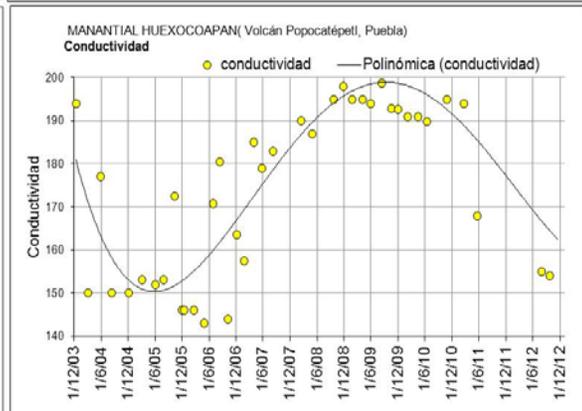
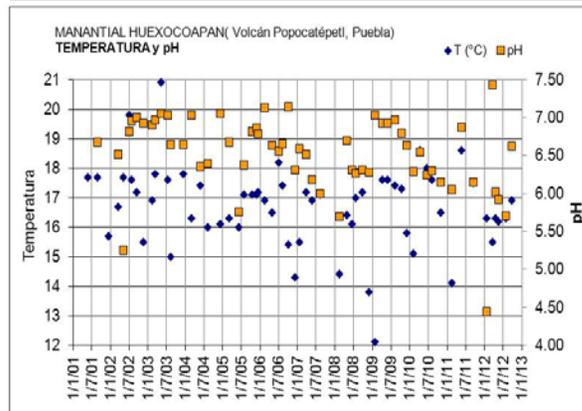
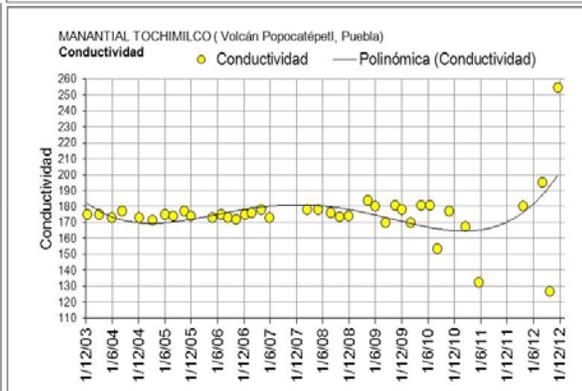
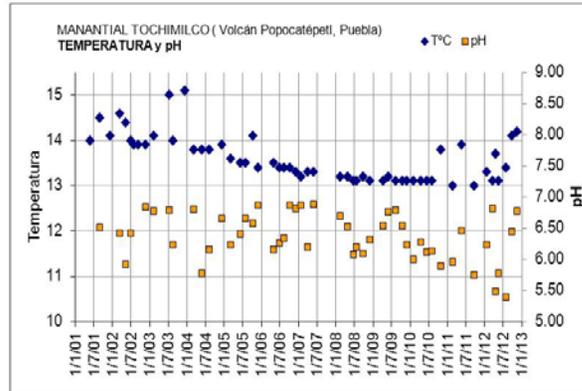
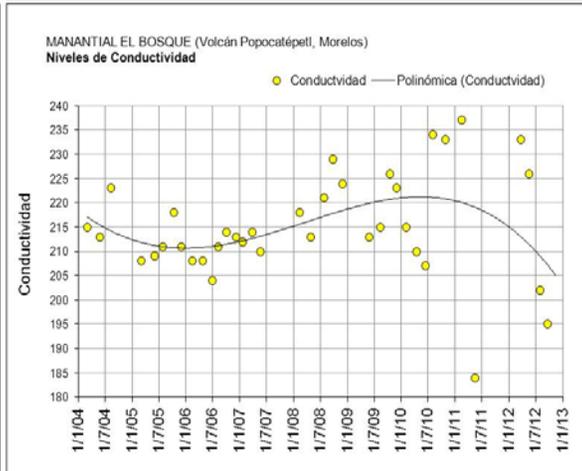
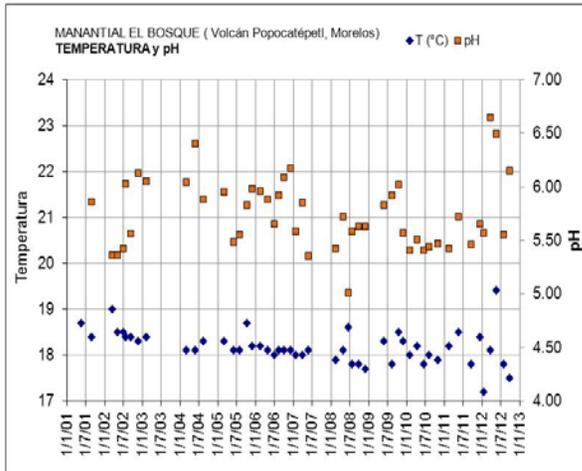
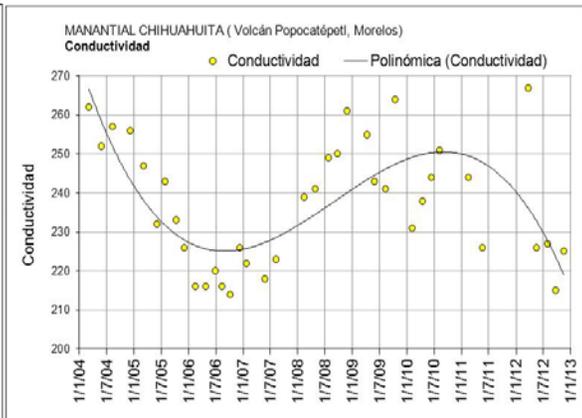
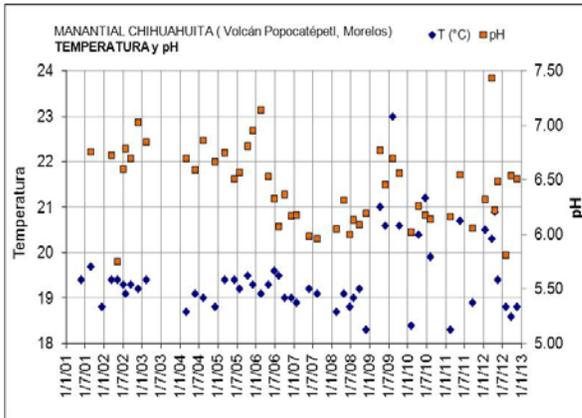


Figura 49 Ubicación de los manantiales muestreados en los sectores SE, S y SW del Volcán Popocatepetl en los estados de Morelos y Puebla.

Además de la toma de muestras, en cada manantial se midieron in situ temperatura, pH y conductividad (Tabla 4), parámetros para los cuales se tiene datos desde 2001. Las variaciones de estos parámetros desde 2001 se muestran en las gráficas de la Figura 50.

Tabla 4. Mediciones in-situ de T, pH y Conductividad

PUNTO DE MUESTREO	FECHA	HORA	MUESTRA	T °C	pH	CONDUCTIVIDAD (µS/cm)
CHIHUAHUITA (POZO)	21/03/2012	12:15	1	20.3	7.43	267
	18/04/2012	13:15	1	20.9	6.22	44.1
	15/05/2012	11:15	1	19.4	6.49	226
	30/07/2012	12:10	1	18.8	5.81	227
	20/09/2012	11:55	1	18.6	6.54	215
	15/11/2012	11:00	1	18.8	6.51	225
HUEXOCOAPAN (QUEBRADA)	22/03/2012	10:28	4	15.5	7.43	209
	18/04/2012	16:55	2	16.3	6.02	29.3
	15/05/2012	18:45	4	16.2	5.92	-
	30/07/2012	19:21	4	16.3	5.7	155
	20/09/2012	16:40	4	16.9	6.62	154
No se muestreo en noviembre						
SAN BALTASAR ATLIMEYAYA (MANANTIAL)	22/03/2012	14:38	6	12.6	5.84	193.2
	18/04/2012	18:01	3	12.6	6.46	32.5
	16/05/2012	12:30	6	13	5.87	137
	31/07/2012	13:30	7	12.6	5.64	170
	21/09/2012	07:35	6	12.5	6.57	162.5
	15/11/2012	17:53	6	15.2	6.29	190
AXOCOPAN (MANANTIAL)	22/03/2012	11:40	5	18.6	5.8	757
	19/04/2012	11:00	4	18.7	6.3	158.3
	16/05/2012	11:00	5	18.7	5.64	735
	31/07/2012	11:15	5	18.7	5.49	631
	20/09/2012	17:34	5	18.2	5.63	753
	15/11/2012	14:51	3	18.7	5.89	747
TOCHIMILCO (MANANTIAL)	21/03/2012	18:32	3	13.1	6.81	180.2
	19/04/2012	12:30	5	13.7	5.48	31.3
	15/05/2012	17:20	3	13.1	5.78	-
	30/07/2012	17:37	3	13.4	5.39	-
	20/09/2012	15:30	3	14.1	6.45	127
	15/11/2012	13:40	2	14.2	6.77	255
EL BOSQUE (MANANTIAL)	21/03/2012	13:25	2	18.1	6.65	233
	15/05/2012	12:45	2	18	5.87	-
	30/07/2012	13:25	2	17.8	5.55	202
	20/09/2012	13:15	2	17.5	6.15	195
No se muestreo en noviembre						
PALEORIO (QUEBRADA)	22/03/2012	12:45	5	13.7	7.42	220
	31/07/2012	12:30	6	12.6	5.64	170
	21/09/2012	08:30	7	12.1	6.20	182.2
No se muestreo en noviembre						



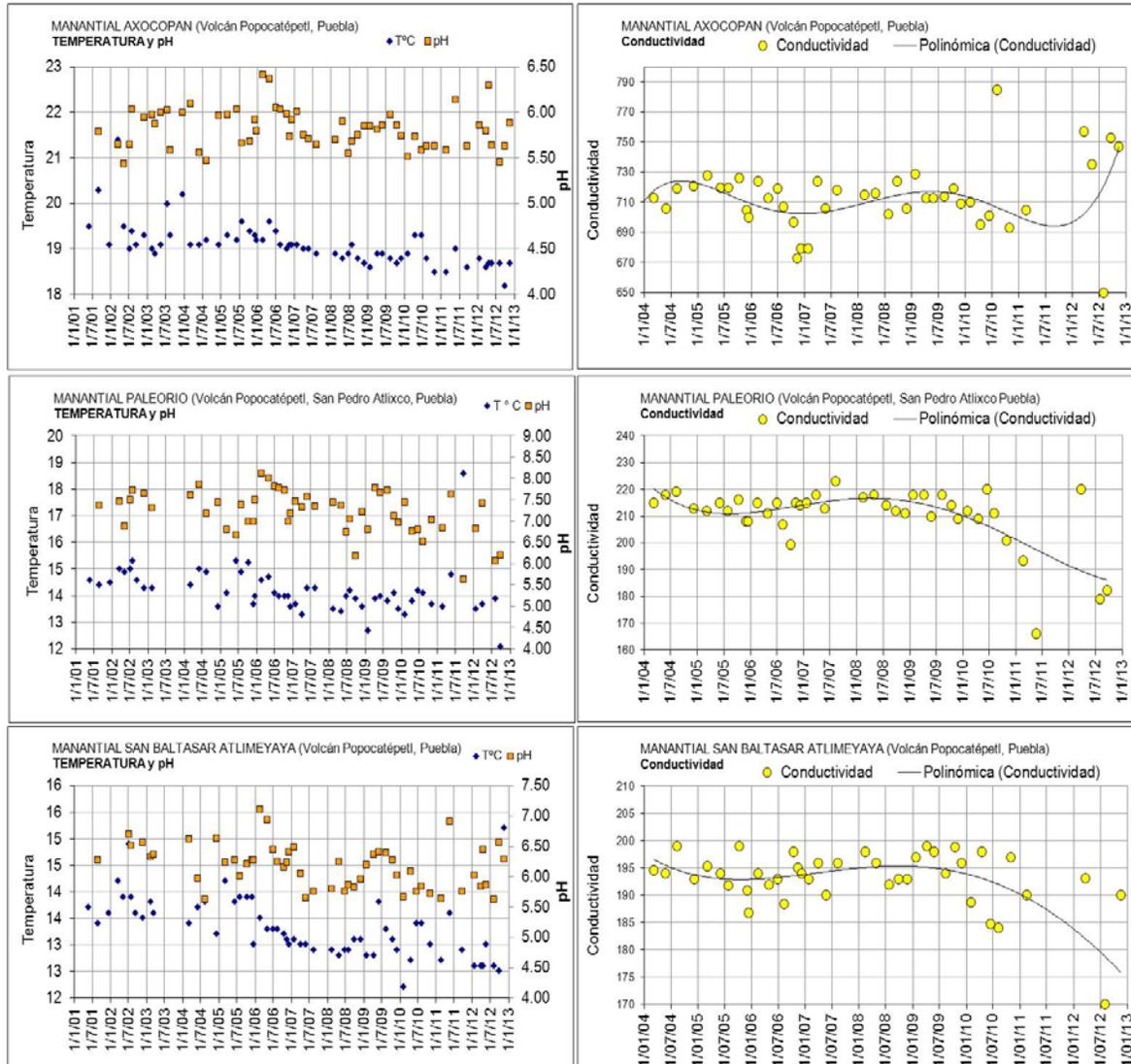


Figura 50 Gráficos de datos de Temperatura, pH y conductividad, desde 2001 a septiembre de 2012. Medidos en los siete manantiales que se muestrean alrededor del volcán Popocatepetl.

En general los datos de pH, temperatura y conductividad no presentaron variaciones importantes durante 2012. Sin embargo, cabe mencionar que en enero se presentó una disminución de los valores de pH en cuatro de los manantiales y a partir de septiembre un incremento en los valores de conductividad en el manantial Axocopan (Puebla). También se identificaron en el mes de mayo descensos en los valores de pH en la mayor parte de manantiales. Esta variación sistemática en mayo permite pensar que pudieron producirse errores instrumentales en la medición.

Las muestras de agua recolectadas fueron entregadas al Laboratorio de Química Analítica del

Instituto de Geofísica de la UNAM y al Laboratorio de Muestras Ambientales del CENAPRED para su análisis.

En general la composición química de las aguas tuvo cambios significativos, especialmente en los muestreos previos al incremento de la actividad que tuvo lugar en abril, y a finales de año. La concentración de boro en las muestras tomadas en enero fue superior al límite de detección en el manantial Axocopan. La presencia de Boro se confirmó en el muestreo de marzo para este manantial y apareció también en dos manantiales más del SE del volcán. El Laboratorio de Química Analítica y la Subdirección de Riesgos Geológicos evaluaron que estos resultados indicaban un incremento en el aporte de gases magmáticos hacia el acuífero. Desde febrero de 2011 no se había detectado la presencia de este elemento a niveles detectables en ninguno de los sitios. El Boro en concentraciones detectables, es uno de los precursores más tempranos del incremento de actividad eruptiva, que se produjo en abril.

A partir del muestreo de abril y los siguientes muestreos realizados en mayo las concentraciones de iones mayores no mostraron cambios significativos respecto a las determinadas en enero y marzo. No se detectó presencia de boro en ninguno de los manantiales, sin embargo se detectaron sulfuros en Huexocoapan y se observó un incremento en las concentraciones de CO₂ disuelto en tres de los manantiales. Estos resultados indicaron una alta disolución de gases volcánicos.

Las bajas concentraciones de fluoruros durante abril junto con la ausencia de boro y sulfuros en los mantos freáticos, pudieron ser debidas a que en este periodo de actividad estos gases salieron a través del cráter por medio de las constantes emisiones y explosiones visibles en el volcán, mientras que en mayo el incremento en las concentraciones de CO₂ disuelto, detectado en los manantiales, pudo ser resultado del taponamiento del conducto volcánico, lo que dificultó la difusión de los fluidos a la atmosfera y aumentó las cantidades de gases en los mantos freáticos. Para el muestreo de julio se observaron cambios menores en las concentraciones de iones principales en relación a las determinaciones de mayo. Se mantuvo la ausencia de Boro en todos los manantiales; tampoco se detectaron sulfuros. Sin embargo, se observó un incremento en las concentraciones de carbonatos disueltos en tres manantiales

Durante septiembre los resultados de los análisis realizados en campo no mostraron cambios significativos en los parámetros medidos en ninguno de los manantiales. Sin embargo, las concentraciones de CO₂ disuelto mostraron un incremento en dos de los manantiales (en uno de ellos al doble del determinado en julio) y disminuyeron ligeramente en otro. Las tendencias observadas indicaron la persistencia en la disolución de gases volcánicos en los rangos observados

En noviembre en el manantial Axocopan se observó un ligero incremento en la conductividad medida en el agua, que se aleja un poco del rango normal del manantial y se registró un incremento de

aproximadamente 15% en la concentración de bicarbonatos y 24% de sulfatos en el manantial Chihuahuita respecto a las determinadas en septiembre. El resto de los parámetros en ese y los otros tres sitios muestreados no mostraron cambios importantes en los iones mayores. Sin embargo, se detectó presencia de boro en San Baltasar Atlimeyaya, en el límite de detección, y en Axocopan en una concentración ligeramente superior.

Es importante hacer notar que desde marzo de 2012 hasta la fecha no se había presentado boro por encima de los límites de detección en ninguno de los manantiales. Las concentraciones de CO₂ disuelto se incrementaron alrededor del doble y 80 %, respectivamente, en relación al muestreo realizado en septiembre para los manantiales San Baltasar Atlimeyaya y Chihuahuita, y disminuyeron a la mitad en Axocopan. Estos resultados indican un pequeño pero significativo incremento en el aporte de gases volcánicos en el agua subterránea a finales de 2012.

Presencia de domos

El último domo observado en el cráter del volcán Popocatepetl en 2011, fue el núm. 35, probablemente emplazado a raíz del tremor armónico registrado el 5 de diciembre y cristalizado en los días siguientes, del 7 al 9 de diciembre, durante los cuales se registraron más de 100 exhalaciones por día de gran amplitud. Las bandas de tremor armónico registradas el 18 y 30 de diciembre de 2011, generaron el crecimiento del domo observado a inicios de diciembre (Figura 51).

A partir de la reconstrucción fotogramétrica realizada con las imágenes obtenidas por la Dirección General de Carreteras Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), se realizó un cálculo del volumen del domo No 35. Se calculó que el domo, de 50 m de diámetro y 20m de altura, tuvo un volumen mínimo de 13,000 m³, en el momento de tomarse la fotografía. Dicho domo probablemente creció rellenando el hueco dejado por la explosión del 20 de noviembre de 2011 (volumen que no se ha considerado para el cálculo del volumen mínimo, Figura 52).



Figura 51 Imagen aérea del cráter del volcán Popocatepetl del 8 de diciembre de 2011, en la que puede observarse en el centro un promontorio de color más oscuro correspondiente al domo núm. 35 (facilitada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes)

Se estima que las exhalación con componente explosiva del 19 de enero y posteriormente la explosión del día 25 destruyeron, al menos parcialmente este domo. El registro de varios segmentos de tremor de diferentes tipos entre el 19 y 31 de enero y posteriormente el incremento significativo de la actividad sísmica y de gases del Popocatepetl los días del 10 al 17 de febrero, se asociaron al emplazamiento de material magmático en el cráter.

La baja tasa de emisión de gases durante marzo pareció indicar que se produjo la cristalización de este material, presurizando el sistema. Los diversos segmentos de trenes de exhalaciones registrados durante marzo, en especial el mayor de ellos el día 30 de marzo, estuvieron asociados con probabilidad al crecimiento de este nuevo domo (¿No 36?).

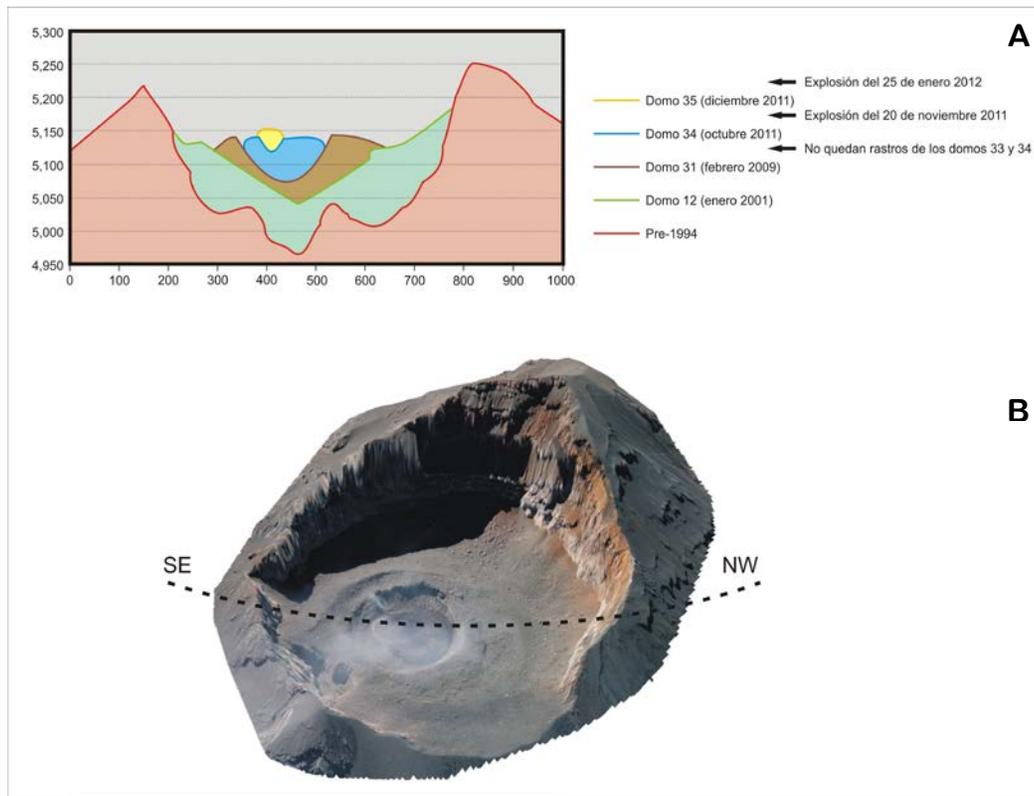


Figura 52 A) Reconstrucción del crecimiento de domos en el interior del cráter del Popocatepetl entre enero de 2001 y diciembre de 2011; B) Vista en relieve de la restitución fotogramétrica del interior del cráter al 8 de diciembre de 2011 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes)

El incremento de actividad a partir de la segunda quincena de abril se asoció al emplazamiento y destrucción de domos en el interior del cráter, con una tasa de crecimiento superior a la de los meses anteriores. Algunos de estos domos pudieron ser observados se a través de vuelos (facilitados por la Policía Federal Preventiva) y se cuantificaron las dimensiones de los mismos a través de fotografías oblicuas y ortofotografías proporcionadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), así como por información proporcionada por el Volcano Disaster Assistance Program (VDAP) con base en imágenes satelitales de uso restringido. El VDAP proporcionó también una imagen de Radarsat de la Agencia Canadiense.

El 14 de abril se obtuvo una imagen de este domo núm. 36; Figura 53), que tenía unos 150 m de diámetro y 20 de espesor, para un volumen aproximado de 350,000 m³.

A partir de entonces y hasta principios de junio la actividad se caracterizó por bandas de tremor armónico, que acompañaban el emplazamiento de lava en el cráter, y simultáneamente tremor espasmódico y trenes de exhalaciones que acompañaban la destrucción del domo así formado, de tal

manera que el volumen total del domo no se modificó significativamente, puesto que la lava emplazada era fragmentada casi simultáneamente.

Para el 27 de abril se pudo observar (Figura 54) que el domo 36 alcanzó un diámetro de 170 metros sin variar mucho su espesor, alcanzando un volumen máximo de 450,000 m³. Dicho domo había sufrido una deflación, perdiendo 120,000 m³, y en su centro se había emplazado un nuevo domo (núm. 37) de 115 metros de diámetro pero de menos de 20 m de espesor y un volumen de 210,000 m³. Este domo también sufrió una deflación, perdiendo alrededor de 20,000 m³.

Para fines de mayo (Figura 54) este proceso de hinchamiento y deflación había resultado en el emplazamiento y destrucción de otros dos domos (núm. 38 y 39), el primero de ellos con un diámetro de 180 m y volumen estimado en 510,000 m³ y el núm. 39 que alcanzó un diámetro de alrededor de 150 m y volúmenes del orden de 180,000 m³ antes de deshincharse y perder buena parte de ese volumen.

El domo núm. 40 empezó a crecer probablemente entre el 10 y el 17 de junio, asociado a un breve periodo con trenes de exhalaciones y tremor. Para fines de julio, alcanzó un diámetro de 200 m y cerca de 25 de espesor, con un volumen de 785,000 m³ (Figura 55), cubriendo los restos de los domos anteriores (Figura 55). Sin embargo, buena parte de este volumen en realidad rellenó los huecos dejados por el deshinchamiento de los domos anteriores. Las imágenes tomadas el 31 de julio muestran una coloración más clara de las lavas emplazadas al centro de este domo (Figura 55).

Para finales de julio, el domo seguía circunscrito, al menos en su lado sur y suroeste, dentro del cráter interno generado por la explosión de 2009. Es probable que el domo núm. 40 fuera parcialmente destruido por la erupción del 6 de agosto. Un vuelo realizado con posterioridad, el 27 de agosto de 2012, con mala visibilidad, sólo permitió corroborar que no se habían modificado significativamente las dimensiones de este domo (Figura 56).

El incremento de actividad sísmica y de gases durante la semana del 14 al 21 de septiembre, que finalizó con el registro de un tren de exhalaciones, estuvo asociado con probabilidad al emplazamiento de un nuevo domo (núm. 41) en el espacio desalojado por las explosiones del 6 de agosto y 10 de septiembre. Hasta mediados del mes, se registró una desgasificación efectiva con valores altos de hasta 15,000 t/día, aunque a partir del día 20 la desgasificación disminuyó, y pudieron observarse fumarolas en los flancos exteriores del volcán, señal de presurización del sistema y de cristalización de este domo.



Figura 53 Vista oblicua del cráter del volcán Popocatépetl desde el este, con el domo núm. 36 observado el 14 de abril de 2012



Figura 54 Imágenes del cráter del Popocatépetl, mostrando las variaciones en el interior del cráter asociadas al crecimiento de los domos 36 y 37 (izquierda) y los domos 38 y 39 (derecha).

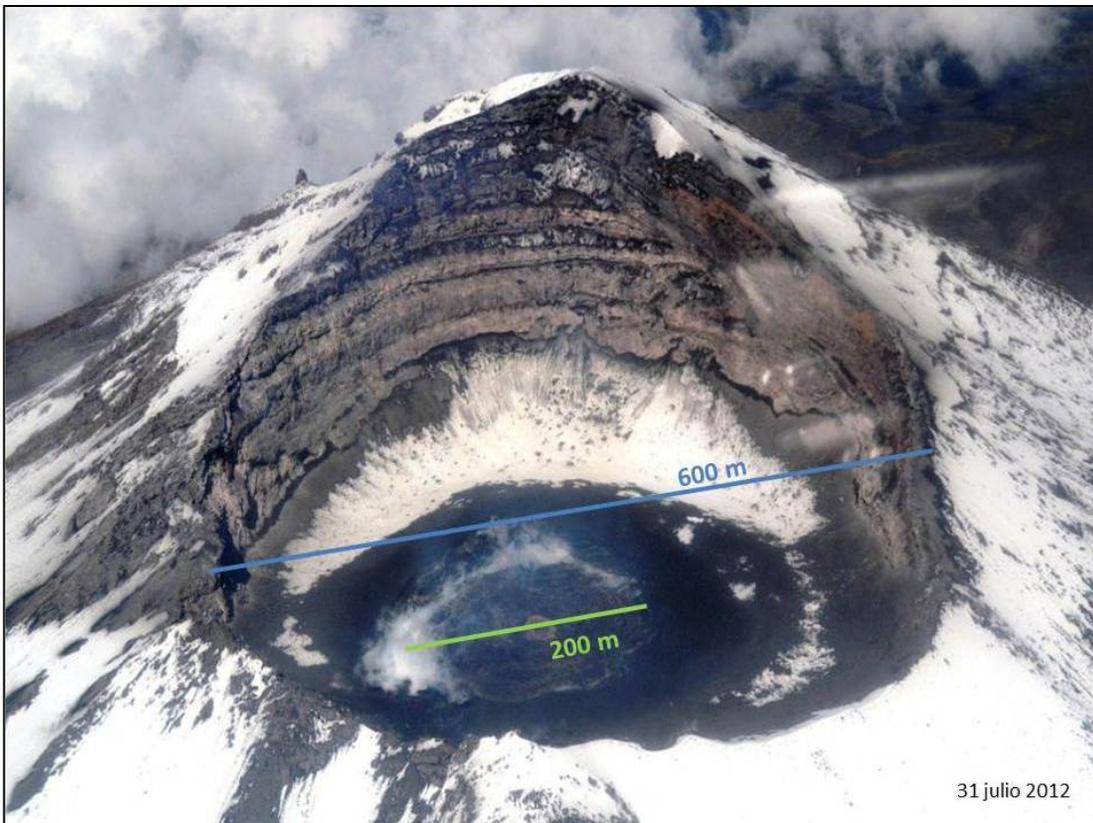


Figura 55 a) Vista oblicua de la construcción del domo núm. 40 y b) Vista oblicua del cráter del volcán Popocatepetl desde el noreste, mostrando el domo núm. 40 en el interior del cráter; nótese el cambio de coloración más clara del centro de este domo

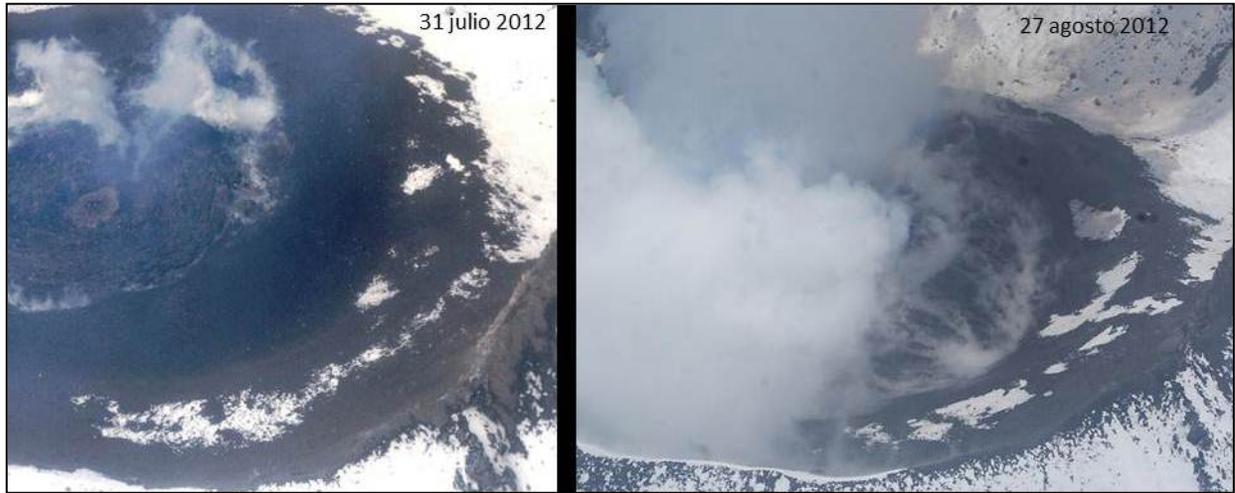


Figura 56 Imágenes que muestran la ausencia de cambios en el domo entre julio y agosto de 2012. En la imagen de agosto se observó que la degasificación del domo se producía también a través del anillo de tefra que lo rodeaba

Este domo no pudo ser observado hasta el 26 de octubre 2012, a través de imágenes proporcionadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT; Figura 57). El nuevo domo (No. 41) crecía anidado en el interior de los restos del domo anterior (No. 40). El domo 40 habría alcanzado dimensiones máximas de 220 m de diámetro y alrededor de 20 m de espesor, para un volumen aproximado de 760,000 m³, sin embargo, no habría sobrepasado los límites del cráter generado en la erupción de 2009, que ha controlado el emplazamiento de todos los domos subsecuentes.

El domo 41 fotografiado por la SCT alcanzaba dimensiones de 170 m de diámetro y unos 15 de espesor, con un volumen estimado en 340,000 m³.

Las imágenes del domo 41 muestran que la actividad de construcción y destrucción de domos iniciada en marzo de 2012 generó un anillo de fragmentos sueltos que rodea y cubre parcialmente los restos del domo 40, y aumentó el nivel de relleno del cráter, que prácticamente alcanza el labio inferior del cráter principal.

Durante los meses de noviembre y diciembre no fue posible realizar nuevos vuelos sobre el cráter. Sin embargo, la actividad de exhalaciones con componente explosivo registradas durante noviembre y diciembre hace pensar que el domo núm. 41 se destruyó parcialmente. El incremento significativo de la actividad sísmica y de gases a finales de diciembre se asocia al crecimiento de este domo o al emplazamiento de un nuevo domo, de forma similar a como ocurrió a mediados de febrero y finales de julio.



Figura 57 Imagen vertical del cráter del volcán Popocatépetl, con el domo 41 anidado en y sobre el domo 40. Destacan por su color más oscuro las huellas dejadas por los fragmentos balísticos sobre las laderas de los flancos S, SE Y NE y el mínimo desnivel que existe entre el nivel del relleno del cráter y el labio inferior del mismo en el borde noreste

Diagnóstico

El análisis del conjunto de datos de monitoreo y las observaciones de la actividad eruptiva del volcán Popocatepetl durante 2012 confirmaron la ocurrencia de una intrusión magmática, probablemente en diciembre de 2011, que desencadenó la aceleración del proceso de emplazamiento, crecimiento y destrucción de domos entre los meses de abril y julio de 2012. La dinámica de emplazamiento y destrucción de domos ha venido ocurriendo y ha sido observada durante todo el actual ciclo de actividad que inició en 1994. La actividad sísmica regional (sismo del 20 de marzo y sus réplicas) pudo afectar el sistema volcánico en profundidad e influenciar el transporte del material magmático de zonas profundas a someras en el interior del sistema volcánico.

Entre finales de enero y mediados de febrero tuvo lugar el emplazamiento del domo núm. 36l en el interior del cráter. El proceso de crecimiento del domo tuvo una pausa desde finales de febrero y marzo, siendo el proceso de cristalización más efectivo. La observación de plumas de gases débiles, delgadas, alcanzando entre 1 y 2 km de altura, así como la observación de fumarolas en las laderas externas del volcán, se interpretaron como un sellamiento y presurización del sistema.

El registro de 15 eventos volcanotectónicos durante la segunda quincena de marzo marcó un cambio en la dinámica de la actividad del volcán y probablemente anuncia el ascenso de material magmático a partes someras en el volcán. Los dos últimos sismos volcanotectónicos de marzo se producen el día 29, el primero a una profundidad de 2.37 km en el sector SE del cráter y el segundo a 10 km de profundidad en el sector W. Estos eventos fueron los precursores inmediatos del tren de exhalaciones del día 30 de marzo, de origen freático, que se prolongaron por un período de 10 horas y que se asociaron al crecimiento del domo núm. 36.

La intrusión de material magmático fue confirmada por el incremento acelerado de la actividad eruptiva a partir del 13 de abril y por los valores elevados en la tasa de emisión de dióxido de azufre de más de 10,000 t/día durante varias jornadas de abril y mayo. El incremento de la cantidad y amplitud de bandas de tremor y de trenes de exhalaciones se asoció con el crecimiento relativamente rápido del domo de lava en episodios, acompañado de plumas de gases y cenizas persistentes y su destrucción simultánea mediante la emisión de fragmentos incandescentes. La actividad pudo secuenciarse en los siguientes episodios:

- 13 a 25 de abril: actividad alta, con crecimiento y destrucción de dos domos (36 y 37) con un volumen total emitido de 1.3 millones de m³.
- 26 de abril a 1 de mayo: periodo de reposo y recarga, con actividad relativamente baja y sin crecimiento de domos. Se producen dos sismos regionales de importancia
- 2 al 6 de mayo: – Actividad alta, con crecimiento de un domo mayor (38) con un volumen estimado de 0.8 millones de m³ y su destrucción
- 7 al 27 de mayo – Actividad alta, con el crecimiento de otro domo (39) con un volumen estimado de 180,000 m³. La actividad sísmica incrementada se mantiene hasta el 6 de junio.

Las características vitreas observadas en los fragmentos líticos y la reducida cantidad de cristales encontrados en las cenizas denotan un rápido enfriamiento del magma. La alta cantidad de gases encontrados adheridos a las partículas de ceniza refuerza la idea de rápido enfriamiento del magma, pues magmas con enfriamiento lento tienden a perder mayor cantidad de gas, mientras que en magmas con enfriamiento rápido la cantidad de gas que se pierde es menor. Por otro lado, los resultados de los análisis de estos gases por el método de lixiviación, permitió identificar un recalentamiento en el sistema volcánico producto de un nuevo aporte de magma en el sistema, observable en el decaimiento de la relación Cl/F.

A este período de actividad incrementada le siguieron unos días de relativa calma sísmica. Posteriormente la tasa de extrusión de material magmático y de construcción de domos se ralentiza. A partir de Entre el 10 y 17 de junio se registra un nuevo período de actividad incrementada con trenes de exhalaciones y bandas de tremor que probablemente marca el inicio de la construcción del domo 40, que se prolongó hasta finales de julio. Posteriormente, este domo fue destruido, al menos parcialmente por las explosiones del 6 de agosto y 10 de septiembre.

Los 57 sismos volcanotectónicos registrados en el sistema de monitoreo del Popocatepetl durante junio y julio se relacionaron con procesos de fracturación a profundidad del cuerpo rocoso en el sistema volcánico, que pudieron ser debidos a reacomodo de fallas y grietas después del paso del material magmático y/o a la intrusión de nuevos pulsos de magma. Estos eventos venían produciéndose en los meses anteriores (marzo-mayo) en un número aproximado de una decena de eventos por mes, con tendencia a incrementar su profundidad.

Esta secuencia de eventos inició con el sismo de mayor magnitud (Mc 3.2) de todo el período y

profundidad de 6 km, registrado el 14 de abril. En junio y julio incrementa el número de eventos por mes, los cuales tienen mayoritariamente magnitudes entre 1 y 2 y se localizan tanto en zonas profundas (12-8 km), intermedias (6-4 km) y someras (4-2 km). El 23 de julio se produce el segundo sismo de mayor magnitud (Mc 2.9) de todo el período, y una profundidad de 5 km. La energía acumulada por estos eventos fue significativa marcando un cambio en la pendiente de la curva, aunque menor que las registradas en las crisis volcánicas de 1997 y 2000-2001.

Siguiendo la dinámica iniciada en junio y hasta diciembre se registraron, al menos una vez por mes, períodos de varios días de actividad incrementada, con trenes de exhalaciones o con gran cantidad de exhalaciones aisladas, que se asociaron al emplazamiento de nuevos volúmenes de material en el cráter (17-19 agosto; 14-21 de septiembre; 20- 21 de octubre, 10-14 de noviembre y 14- 25 de diciembre). Las tasas de crecimiento y volúmenes de estos aportes son mucho menores a los observados para los domos emplazados durante abril y mayo.

El más importante de estos períodos fue el registrado en septiembre, coincidente con un incremento en la tasa de emisión de gases, que probablemente generó el emplazamiento del domo núm. 41, observado el 26 de octubre. Este domo fue parcialmente destruido por exhalaciones con componente explosiva en noviembre y diciembre. El incremento de la actividad a finales de diciembre, conjuntamente con el cambio en la tipología de exhalaciones y el registro de valores muy altos en la tasa de emisión de dióxido de azufre permiten pensar que se produjo el emplazamiento de un nuevo domo (núm. 42?).

Esta actividad en su conjunto tiene similitudes con la observada a fines de 1994, cuando se marca propiamente el inicio de la actual etapa eruptiva. En aquella ocasión el inicio de la actividad también estuvo asociado con actividad freática, que eventualmente se transformó en actividad magmática de emplazamiento y destrucción de domos de lava. También presentó similitudes con la crisis volcánica de diciembre de 2000 y enero 2001, especialmente en el registro de trenes de exhalaciones de gran amplitud y el registro de bandas de tremor armónico y espasmódico. Sin embargo, el conjunto de energía liberada durante el período de abril a agosto de 2012 ha significado un 55% de la energía liberada en la crisis eruptiva de 2000-2001, que concluyó con una de las mayores erupciones de la historia reciente del volcán.

Semáforo de Alerta Volcánica

El Semáforo de Alerta volcánica del volcán Popocatepetl se mantuvo en Amarillo Fase 2 durante el período del 1 de enero al 16 de abril, fecha en que el Comité Científico Asesor del volcán Popocatepetl recomendó cambiarlo a Amarillo Fase 3, debido al incremento de actividad sísmica y eruptiva.

El nivel de Amarillo Fase 3 se mantuvo durante cuatro meses y medio, del 16 de abril al 31 de agosto.

El 1 de septiembre, igualmente por sugerencia del Comité Científico Asesor el semáforo de alerta volcánica regreso a Amarillo Fase 2.

Anexos

Anexo 1

Listado de sismos volcanotectónicos registrados en la red de monitoreo sísmico del volcán Popocatepetl.

Anexo 2

Para la discusión del pronóstico de la actividad volcánica durante el período de abril a agosto y con el objetivo de apoyar las discusiones del equipo del CENAPRED y del Comité Científico Asesor, se elaboraron diversas versiones de un árbol de eventos preliminar, la última de las cuales se anexa. Esta herramienta deberá ser mejorada con la cuantificación de probabilidades con base en el historial de erupciones conocido del volcán Popocatepetl y la experiencia del comité en la evaluación de las señales de los diferentes parámetros de monitoreo.

Referencias

- De la Rosa, F.; Valdés C., Gutiérrez, C, 2003. Análisis de patrones sísmicos asociados a algunas explosiones y emisiones de ceniza importantes del volcán Popocatepetl, México. Revista Geofísica. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Enero-Junio 2003
- McNutt, S. R., 1992. Volcanic tremor, in *Encyclopedia of Earth System Science*, vol. 4, edited by W. A. Nierenberg, pp. 417–425, San Diego, California
- Sistema MODVOLC. Near-real-time monitoring of thermal of global hot-spots. Universidad de Hawaii. <http://modis.higp.hawaii.edu>

Notas

El contenido de este informe se elaboró con datos proporcionados por los sistemas de monitoreo del CENAPRED, el Laboratorio de Química Analítica y la red DOAS del Instituto de Geofísica de la UNAM, el Servicio Sismológico Nacional y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. También se utilizó la información proporcionada por el VDAP-USGS.

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 del volcán Popocatepetl 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 y colaboraron en este informe.

Colaboraron: Dra. Ma Aurora Armienta, Dra. Ana Lilian Martin del Pozzo, Dr. Servando de la Cruz, Dr. Hugo Delgado, Dr. Carlos Valdés y los estudiantes de servicio social Luís Inés y Antulio Zaragoza.

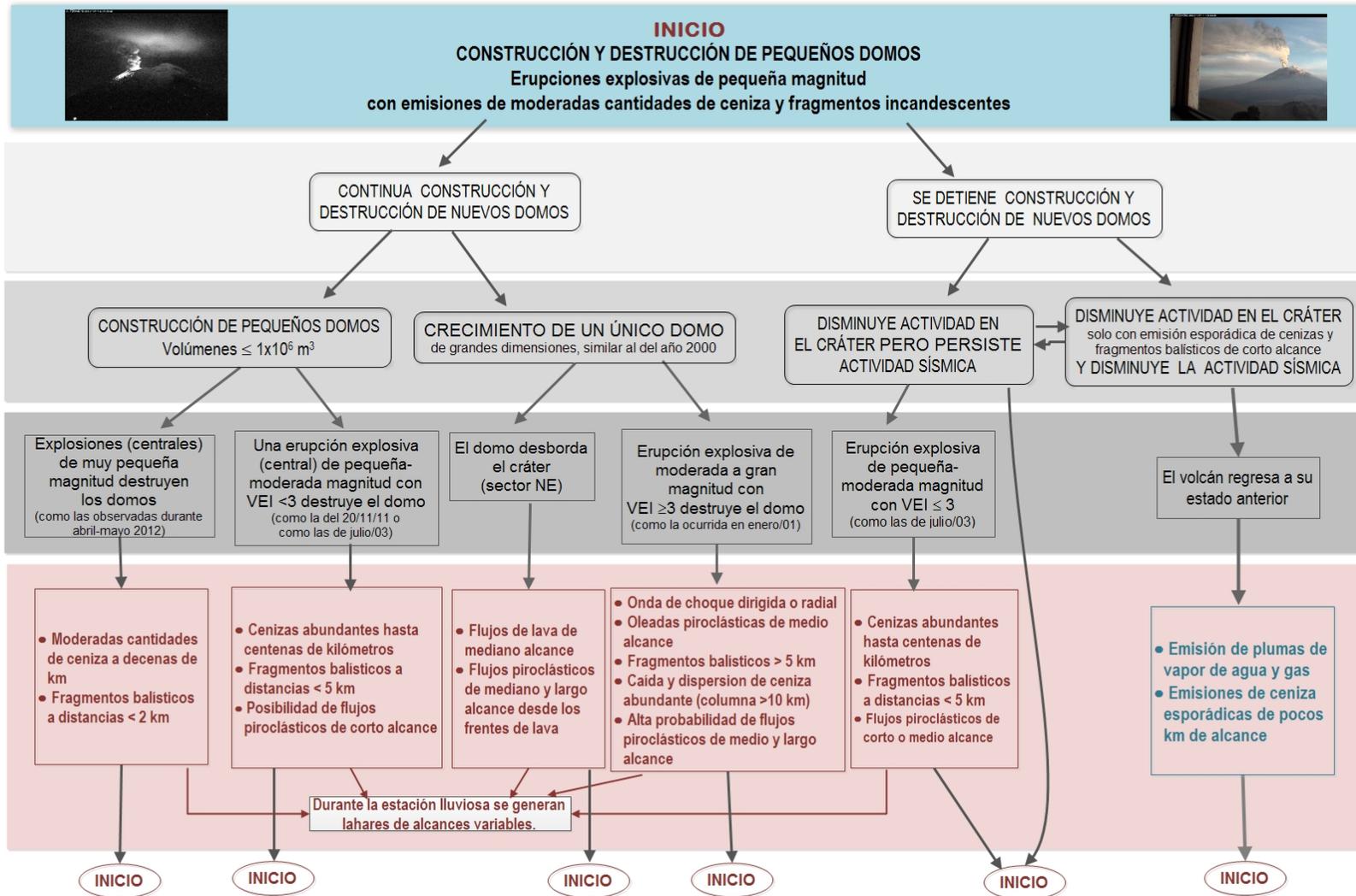
Anexo 1

No.	Fecha	Hora UTC	Latitud	Longitud	Prof	Mag	RMS	ERLN	ERLT
1	04-ene	11:24							
2	05-ene	08:02	19.09	-98.71	1	3.2			
3	07-ene	00:59							
4	13-feb	05:25							
5	14-feb	13:27							
6	19-feb	03:23							
7	01-mar					1			
8	05-mar					1			
9	09-mar					1			
10	11-mar	19:56	19.0173	98.3829	10	1.5			
11	12-mar	14:53	19.0247	98.3768	10	2			
12	12-mar	19:32	19.0255	98.3769	10	2			
13	16-mar	03:23	19.0111	98.3753	2.19	1.7			
14	16-mar	03:25	19.0145	98.3704	2.71	1.6			
15	20-mar	17:54	19.0182	98.3647	1	1.8			
16	21-mar	11:33	19.0051	98.3724	3.69	2.43			
17	21-mar	12:23	19.0043	98.3776	2.94	1.7			
18	21-mar	13:46	19.0073	98.3727	1	1.7			
19	22-mar					1			
20	23-mar	08:55	19.0226	98.3749	4.9	1.5			
21	23-mar	12:34	19.017	98.3626	4.35	1.6			
22	24-mar					1			
23	25-mar	08:42	19.014	98.3756	3.21	1.7			
24	26-mar	17:59	18.5847	98.3745	10	2			
25	29-mar	03:43	19.0106	98.3689	2.37	2.12			
26	29-mar	21:50	19.0084	98.3999	10	2			
27	08-abr	20:12	19.0056	98.3622	2.33	2	0.179	0.1	0.1
28	09-abr	21:19	18.5977	98.3741	4.6	1.8	0.483	1	0.6
29	11-abr	07:24	19.0064	98.3799	2.34	2	0.311	0.3	0.2
30	11-abr	07:27	19.0088	98.3779	2.08	1.7	0.238	0.3	0.2
31	14-abr	12:12	19.0179	98.3607	6.2	3.2	0.318	0.1	0.1
32	18-abr	15:07	19.0109	98.3682	4.1	1.6	0.214	0.2	0.4
33	25-abr	00:31	19.0099	98.3729	3.8	1.4	0.196	0.3	0.4
34	27-abr	20:36	19.0184	98.3796	1	1.9	0.667	0.5	0.4
35	28-abr	02:01	18.5992	98.3883	7.8	1.2	0.568	0.9	0.8
36	28-abr	05:29	19.0003	98.3921	4.9	1.3	0.141	0.1	0.1
37	05-may	13:31	19.0145	98.3651	5.8	1.8	0.417	0.1	0
38	16-may	19:37	19.013	98.3618	6.2	2	0.23	0.2	0.1
39	17-may	08:21	19.0156	98.3706	2.4	1.9	0.18	0.3	0.1
40	22-may	01:06	19.0015	98.3485	7.3	2.3	0.254	0.1	0.4
41	24-may	06:59	19.012	98.3619	6.8	1.8	0.261	0.2	0.2
42	31-may	19:30	18.5912	98.3437	6.9	2.1	0.315	0.1	0.4
43	18-jun	19:42	19.0146	98.3665	4.6	1.6	0.338	0.3	0.3
44	18-jun	19:45	18.5567	98.3512	9.5	2.3	0.621	0.9	1.4
45	19-jun	10:56	19.0295	98.3754	4.9	1.8	0.249	0.5	0.3
46	25-jun	08:28	18.5896	98.4055	5.41	2	0.731	0.7	0.7
47	26-jun	03:31			2.2				
48	26-jun	03:35	18.582	98.3989	3.4	1.9	2.152	2.5	2.1
49	26-jun	03:39	18.5957	98.3896	7.73	1.8	0.532	0.6	0.5
50	26-jun	03:47	19.0384	98.4061	2.1	1.3	1	2.1	1.6

51	26-jun	05:24	18.5865	98.3679	2.6	1.7	0.456	0.4	1.1
52	26-jun	10:40	18.5859	98.3839	4.3	1.4	0.774	0.8	0.9
53	27-jun	05:20	19.0071	98.3958	6.05	1.7	0.222	0.2	0.2
54	27-jun	11:35	18.5873	98.377	10	2	0.8	1.4	1.3
55	27-jun	20:18			3.6	1.1			
56	27-jun	22:42	18.5979	98.3873	6.1	1.3	0.3	0.3	0.3
57	05-jul	11:54	19.0156	98.4038	9.81	1.6	0.688	1	0.9
58	05-jul	11:59			6.1	1.6			
59	05-jul	16:10			4.4	1.4			
60	06-jul	01:07	19.0191	98.3702	4.05	1.7	0.288	0	0
61	06-jul	01:08	19.0146	98.3663	4.1	1.7	0.412	0.1	0.1
62	06-jul	02:51	19.0172	98.375	5.9	1.7	0.675	2	2.4
63	06-jul	02:53	19.0126	98.3666	7.01	1.8	0.596	0.1	0.1
64	06-jul	07:59	19.019	98.3723	3.41	1.7	0.202	0.2	0.1
65	07-jul	02:02			10.2	1.7			
66	09-jul	09:18	19.0331	98.3737	10	2	0.2212	0.1	0.1
67	12-jul	06:05	19.0108	98.3715	5.8	1.8	0.338	0.4	0.3
68	12-jul	12:42	19.0275	98.3997	10	1.9	0.146	0.9	2.6
69	13-jul	22:46			9.5	1.4			
70	14-jul	20:01	19.0176	98.3481	12	1.8	0.586	0.4	0.4
71	16-jul	03:01	18.5945	98.3838	8.55	1.5	0.429	0.5	0.5
72	16-jul	10:03			6.2	1.5			
73	16-jul	13:42	18.5937	98.3951	5.9	1.8	0.473	0.7	0.6
74	16-jul	19:29	18.5939	98.3534	8	2	0.4	0.3	0.6
75	16-jul	20:06			1.5	0.5			
76	17-jul	00:00			11	1.6			
77	17-jul	00:05			2.2	1.5			
78	17-jul	00:37			5.2	1.6			
79	17-jul	20:37	19.0103	98.3764	4.8	1.6	0.438	0.5	0.5
80	17-jul	20:58	19.007	98.3756	2.3	1.4	0.438	0.2	0.4
81	18-jul	08:01			3.6	1.3			
82	18-jul	14:43	19.0049	98.3936	10	1.6	0.538	1.5	1.2
83	18-jul	19:08	19.0432	98.3521	9	1.6	1.2	0.6	0.3
84	18-jul	20:15			2.4	1.7			
85	18-jul	22:52			1.7	0.8			
86	20-jul	19:07	19.0082	98.3693	3.6	1.6	0.148	0	0
87	20-jul	20:12	19.0344	98.4712	8.3	1.8	0.493	1.2	1.2
88	20-jul	20:57	19.0096	98.3691	3.5	1.8	0.217	0.2	0.2
89	23-jul	06:10	19.0053	98.394	9	1.4	0.428	0	0
90	23-jul	06:57	19.0123	98.3699	5	2.9	0.435	0.4	0.9
91	26-jul	00:45			8.1	1.3			
92	26-jul	0:59			3.5	1.2			
93	26-jul	01:04	18.5987	98.3789	6	1.7	0.498	0.7	0.8
94	26-jul	21:40	19.0038	98.3925	4.9	1.8	0.499	0.4	0.4
95	27-jul	00:02			4.6	1.2			
96	29-jul	00:11			3.8	1.5			
97	29-jul	16:21	19.0104	98.3988	3.2	1.5	0.652	0.7	0.6
98	30-jul	11:41	19.0272	98.3811	4	1.7	0.611	0.4	0.2
99	30-jul	16:36	19.0092	98.397	2.1	1.6	0.462	0.6	0.7
100	01-ago	04:30	19.008	98.3694	4.3	1.4	0.422	0.2	0.6

101	02-ago	00:32			6	1.5			
102	03-ago	02:12	19.0247	98.3619	4	1.4	0.422	0.5	0.3
103	08-ago	03:20	19.0075	98.4064	1.6	1.9	0.99	0.4	1.6
104	08-ago	03:24	19.0113	98.3997	2.8	1.7	0.659	0.6	0.5
105	08-ago	03:25	18.572	98.4204	9	1.5	0.368	0.6	2.3
106	09-ago	08:47			2.3	1.6			
107	15-ago					1			
108	15-ago					1			
109	16-ago	06:38	18.5952	98.3457	2.2	1.7	0.305	0.4	1
110	26-ago	00:54			3.3	1.7			
111	26-ago	01:02	18.5847	98.3745	10	1.5	0.575	0	0
112	27-ago	00:29			2.6	1.8			
113	31-ago					1			
114	04-sep	20:34	1859.76	9835.02	6.2	2.0		0.1	0.4
115	05-sep	14:16	1901.57	9839.23	4	1.1		1	0.8
116	05-sep	16:57	1900.68	9837.53	4	1.7		0.3	0.2
117	05-sep	17:10	1859.35	9836.67	4.3	1.5		0.2	0.2
118	05-sep	18:10	1900.74	9837.16	5.5	1.6		0.2	0.2
119	05-sep	18:13	1901.15	9837	5	1.5		0.1	0.1
120	05-sep	18:16	1859.62	9838.54	2.9	1.4		0.2	0.2
121	08-sep	11:18	1900.1	9837.16	4	1.5		0.2	0.4
122	10-sep					1			
123	17-sep	15:36	1859.78	9838.69	10	1.5		1.6	1.4
124	24-sep	16:54	1902.58	9838.36	6.60	1.6		0.2	0.1
125	30-sep	18:52				1.1			
126	30-sep	19:56				1.1			
127	01-oct	18:54				1.5			
128	04-oct					1.3			
129	07-oct	22:32	19° 00.88'	98° 37.25'	5	1.6		0.2	0.4
130	10-oct					1			
131	20-oct					1			
132	21-oct					1			
133	22-oct					1.6			
134	22-oct					1.6			
135	22-oct					1.6			
136	22-oct					1.6			
137	22-oct					1.6			
138	22-oct					1.6			
139	28-oct					1			
140	29-oct	00:06	19° .01.36'	98° 37.17'	3.7	1.8		0.3	0.2
141	31-oct	13:11	19° 01.41'	98° 36.81'	4.2	1.8		0.2	0.4
142	01-nov					1			
143	11-nov	10:03	19° 01.19'	98° 37.24'	3.6	1.4		0.1	0.3
144	07-dic	06:10	19° 01.18'	98° 40.01'	10	1.4		1.7	1.5
145	09-dic	07:24	19° 01.15'	98° 37.39'	2.1	1.7		0.3	0.1
146	23-dic					1			
147	27-dic	05:41	19° 00.99'	98° 37.18'	3.2	1.2		0	0.1
148	29-dic					1			
149	31-dic					1			

ÁRBOL DE EVENTOS DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL



Anexo 2 Árbol de eventos probables para el volcán Popocatepetl (versión 20 de junio de 2012)

