

evaluación de la actividad del **POPOCATÉPETL** y de su sistema de monitoreo

Servando de la Cruz Reyna



El volcán Popocatepetl está localizado en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano y es, con 5,432 metros sobre el nivel del mar, la segunda montaña más alta del país, después del volcán Pico de Orizaba. El Popocatepetl es un volcán maduro, que ha experimentado grandes cambios a lo largo del tiempo geológico. El volcán en su forma actual existe desde hace unos 23,000 años, cuando el edificio volcánico anterior se derrumbó durante una erupción excepcionalmente violenta, devastando un área cercana a los 1,000 km² al sur del volcán. Desde ese evento, el Popocatepetl ha producido numerosas erupciones de distintos tipos, y la acumulación de los productos emitidos ha contribuido a construir el edificio volcánico actual.

Las erupciones pasadas del Popocatepetl han variado desde actividad moderada, como la que se desarrolla en la actualidad, hasta la explosiva, que ha producido grandes flujos de ceniza caliente y de lodo.

Actualmente, arqueólogos de varias instituciones descubren con mayor frecuencia ruinas cubiertas por los depósitos de la erupción explosiva más reciente, ocurrida hace aproximadamente 1,000 años. Eventos de esa magnitud se han repetido tres veces en los últimos 5,000 años.

Desde la fundación de Tenochtitlán primero, y la Conquista después, hemos contado con una serie de reportes, algunos de ellos sumamente detallados, de trece episodios de actividad, de intensidad similar a la que se desarrolla en la actualidad. El episodio previo al actual se inicia en 1919 y termina hacia 1927. Tiene un desarrollo y características tan similares, que las descripciones y fotografías de esa época podrían aplicarse al presente. Se presentaron las fumarolas, las emisiones de ceniza, la formación de un

domo de lava en el fondo del cráter y la destrucción parcial de éste por explosiones subsiguientes.

El episodio actual de actividad del Popocatepetl se inicia en 1993, con un incremento en las fumarolas y un moderado aumento en la sismicidad del volcán. En octubre de 1994 se presenta un incremento mayor en la sismicidad y el 21 de diciembre de 1994 el volcán emite ceniza volcánica por primera vez en setenta y cinco años. La actividad de emisión de ceniza aumenta después del día 21 y la sismicidad incluye tremores armónicos, que son señales consideradas como peligrosas, pues pueden indicar desplazamientos de magma. La actividad llega a un máximo y se estabiliza. Posteriormente, durante las primeras semanas de 1995, las emisiones de ceniza se hacen esporádicas dándoseles el nombre de "exhalaciones".

Esta situación estacionaria persiste por varios meses y luego tiende a declinar hacia la segunda mitad de 1995 y los primeros meses de 1996. En marzo de 1996 se presenta una situación similar a la de diciembre de 1994. Considerables emisiones de ceniza volcánica van acompañadas de sismicidad y tremores de intensidad creciente. La actividad se estabiliza nuevamente durante las primeras semanas de marzo de 1996, y para la tercera semana de ese mes se detecta la presencia de un cuerpo creciente de lava en el interior del cráter del Popocatepetl.

La tendencia de la lava a cerrar temporalmente las bocas de salida del volcán y su presencia misma producen algunos eventos o exhalaciones de carácter moderadamente explosivo, el mayor de los cuales ocurre el 30 de abril de 1996, causando cinco víctimas entre excursionistas que intentaban filmar el interior del cráter. Estos eventos lanzan suficiente ceniza para producir leves lluvias de la misma en poblaciones localizadas a lo largo de la pluma o penacho, y lluvias de piedras (de 1 a 5 cm) sobre poblaciones en las inmediaciones del volcán. A lo largo de 1996, las exhalaciones se hacen más espaciadas pero, hacia finales de ese año, muestran una tendencia a volverse más explosivas.

Esa fase del proceso continuó durante la primera parte de 1997. La velocidad de emisión de la lava tiene un carácter fluctuante, dentro de ciertos límites. Esto es, la velocidad de la lava fue máxima al inicio del proceso en marzo de 1996. Esta velocidad disminuyó lentamente y, posteriormente, en marzo y en diciembre de 1997 vuelve a aumentar.

El 24 y 27 de junio de 1997, la red de monitoreo del Popocatepetl detectó señales de tremor sísmico de baja frecuencia y de duración creciente. Asimismo, los inclinómetros detectaron defor-

maciones significativas (deflaciones), especialmente en las zonas altas del volcán. El 30 de junio de 1997 ocurrió el evento explosivo de mayor intensidad del actual episodio eruptivo del Popocatepetl. Esta exhalación explosiva estuvo precedida por una serie de siete temblores de magnitudes entre 2 y 2.7, que fueron detectados en un intervalo de trece minutos. La exhalación explosiva tuvo dos pulsos principales. El primero se inició a las 18:11 y duró 135 minutos. La fase de mayor intensidad duró 35 minutos. El segundo se inició a las 19:26 y duró noventa minutos. Una señal muy intensa de tremor acompañó a estos pulsos. El radar Doppler del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) mostró fuertes señales reflejadas por una columna densa de ceniza sobre el volcán. La erupción del 30 de junio generó una importante pluma de ceniza que se elevó 13 km sobre el nivel del mar en pocos minutos. En las siguientes dos a tres horas se reportaron lluvias de ceniza en muchas poblaciones, incluidas Cuernavaca y la Ciudad de México. El Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México tuvo que ser cerrado por varias horas, y posteriormente se presentaron dificultades importantes para despejar la ceniza depositada en las pistas.

Fragmentos de pómez de hasta 10 cm cayeron en un radio de unos 10 km a la redonda del volcán, principalmente hacia el sector norte. Grandes fragmentos de roca de hasta varias decenas de centímetros cayeron sobre los flancos del volcán sin que, afortunadamente, se dañara ninguno de los dispositivos de monitoreo.

El cuerpo de lava que crecía en el fondo del cráter desde marzo de 1996 fue parcialmente destruido por la explosión del 30 de junio de 1997, formando una depresión en forma de cráter en su parte central. Posteriormente, el 4 de julio de 1997, se pudo observar que se emplazaba un nuevo cuerpo de lava sobre los restos del anterior. Este nuevo cuerpo de lava cordada era similar al domo formado en marzo de 1996. En forma paralela, la actividad sísmica y las manifestaciones externas de actividad del volcán decrecieron significativamente. Sin embargo, entre el 13 y el 19 de agosto de 1997, se detectaron nuevamente señales de tremor sísmico. Vuelos realizados en agosto de 1997, y el análisis de fotos aéreas del interior del cráter del Popocatepetl, obtenidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, revelaron la presencia de un pequeño domo de lava creciendo nuevamente en el interior de la depresión producida por la explosión del 30 de junio. El crecimiento de ese domo se detuvo por un tiempo y se reinició con mayor velocidad del 2 al 6 de diciembre de 1997. Posteriormente se registraron dos explosiones relativamente importantes, el 24 de diciembre de 1997 y el 1° de enero de 1998.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN

El proceso actual presenta varias características importantes:

a) Tiene un componente magmático que involucra un cierto nivel de riesgo, dado que esto lo hace potencialmente capaz de generar erupciones piroclásticas, esto es erupciones explosivas, que pueden producir flujos de ceniza caliente y todo de alto poder destructivo. La ocurrencia de eventos de este tipo en tiempos históricos y prehistóricos indica que este escenario es posible, aunque poco probable.

b) La presencia del componente magmático no necesariamente lleva a una fase paroxismal. La actividad actual, en forma similar a la del episodio 1919-1927, involucra el crecimiento del cuerpo de lava en el fondo del cráter (actividad efusiva) y exhalaciones esporádicas, o emisiones de ceniza de poder explosivo bajo a moderado.

La diferencia entre las dos modalidades eruptivas (explosiva y efusiva) depende de varios factores, principalmente de la composición de la lava y los gases que la acompañan, y de la velocidad con que estos productos son emitidos por el volcán. En ambos casos, el monitoreo continuo y permanente permite detectar cambios significativos en estos parámetros y con ello anticipar un cambio en el estado interno del volcán que pudiera llevar a una situación de mayor peligro.

VIGILANCIA

El diagnóstico técnico del volcán Popocatepetl se basa en una importante infraestructura de equipo de monitoreo y en el trabajo de más de veinte investigadores de diversas especialidades que integran el Comité Científico Asesor del Volcán, y que pertenecen a las más importantes instituciones académicas del país, principalmente a la Universidad Nacional Autónoma de México. Los trabajos del Comité reciben una aportación significativa por la participación de vulcanólogos internacionales del más alto nivel, especialmente los que pertenecen al Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (USGS). Recíprocamente, vulcanólogos de éste y otros centros del extranjero reconocen el nivel de los científicos mexicanos.

El CENAPRED coordina y apoya los trabajos del Comité y es el principal operador de la red de monitoreo; funge también como enlace entre los especialistas y las autoridades de Protección Civil.

Para evaluar la actividad del volcán, el Comité Científico y el CENAPRED se apoyan en el siguiente equipo de monitoreo:

- Once estaciones sísmicas distribuidas en el edificio volcánico.

Ocho de éstas transmiten sus señales las 24 horas del día al centro de registro ubicado en el CENAPRED.

- Cuatro estaciones inclinométricas para medir la deformación del edificio volcánico transmiten directamente sus registros al CENAPRED; además, se tiene distanciómetros para mediciones geodésicas, con los que se realizan mediciones directas sobre el volcán.

- Una cámara de video con antena de microondas que recibe la imagen del volcán en tiempo real durante las 24 horas del día en el CENAPRED.

- Un centro de adquisición, registro y procesamiento de datos localizado en el CENAPRED. Este centro cuenta con registradores en papel para graficar las señales sísmicas y una extensa red de computadoras que registran en forma continua la actividad del volcán.

- Un espectrógrafo de correlación (COSPEC), con el que se monitorea el dióxido de azufre; esta medición se realiza cuando menos una vez a la semana a través de sobrevuelos o por vía terrestre.

- Un radar Doppler para detectar emisión importante de ceniza.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes toma fotografías aéreas del interior del cráter, en promedio una vez cada dos semanas; realiza fotointerpretación y proporciona los resultados de los análisis sobre el crecimiento del domo de lava. Adicionalmente se realizan sobrevuelos en helicópteros proporcionados por la Procuraduría General de la República, para reconocer las condiciones del volcán.

- En coordinación con el Geological Survey de Estados Unidos se ha instalado, en fase experimental, un sistema de detectores de flujos de lodo en las cañadas de desagüe del glaciar.

- Se trabaja para reforzar el Sistema de Monitoreo y Vigilancia en la ladera sureste mediante un enlace satelital. Con este enlace satelital todas las señales de dicho sector del volcán se concentrarán y enviarán en forma directa del satélite Solidaridad I hacia el CENAPRED, sin la necesidad de repetidores susceptibles de fallas en nuestro sistema de comunicación.

Aunado a lo anterior, los miembros del Comité Científico Asesor realizan en el Instituto de Geofísica de la UNAM, diversas investigaciones en la zona del volcán, entre las que destacan:

- Monitoreo sísmico.
- Registro y análisis de los microsismos y tremores.
- Estudios geológicos para la estimación del riesgo en la zona del volcán.
- Actualización del mapa de peligros volcánicos.
- Monitoreo del glaciar del Popocatepetl.

- Estudio gravimétrico del volcán.
- Evaluación del riesgo por métodos geodesicos.
- Monitoreo químico de manantiales.
- Monitoreo de la distribución y la composición de las cenizas arrojadas por el volcán.

CALIDAD DEL MONITOREO Y PRONÓSTICO

EN EL POPOCATÉPETL.

ANÁLISIS COMPARATIVO CON OTROS VOLCANES

En términos generales, el nivel de vigilancia y la calidad del monitoreo que se mantienen en el Popocatepetl son similares a los de otros volcanes del mundo.

La Figura 1 muestra la distribución de trece estaciones sísmicas con que se monitorea el volcán Santa Elena. La Figura 2 muestra las siete estaciones utilizadas para monitorear al Pinatubo antes de la erupción de junio de 1991. Otros volcanes, principalmente en Japón utilizan las mismas tecnologías, aunque cuentan con mayor número de estaciones. Sin embargo, si bien con estos sistemas se han logrado pronósticos adecuados de los grandes eventos eruptivos, en ninguno de ellos se pronostican eventos repetitivos de baja intensidad. A este respecto, Newhall y Punongbayan (1996), los principales líderes científicos durante la erupción del Monte Pinatubo en 1991, señalan:

En principio, los riesgos volcánicos pueden ser sustancialmente mitigados. En la práctica, la mitigación de los riesgos volcánicos no es sencilla ni está garantizada. En ocasiones, el desastre impacta antes de que cualquier advertencia pueda ser emitida. En otros

casos, los pronósticos son correctos pero las advertencias no son efectivas, y el desastre se presenta. Y, a veces, aun los mejores pronósticos y advertencias fracasan en mover al escéptico, incluso hostil, público u oficial público.

Primarios entre los problemas encontrados en los volcanes Santa Elena y Pinatubo fueron.

- El poco tiempo disponible para la instalación de monitoreo, el análisis de los datos y la emisión de advertencias.
- El escepticismo de muchos líderes de la comunidad y de la mayoría de los ciudadanos y la ineffectividad de argumentos puramente científicos contra ese escepticismo
- Expectativas fuera de la realidad sobre la capacidad de los vulcanólogos de predecir detalles de las erupciones y dificultades afines al describir situaciones complejas.
- Preocupación necesaria acerca del riesgo en áreas cercanas al volcán, a expensas de aquellos en riesgo lejos del mismo.
- Incomodidad y dificultad sobre el carácter forzoso con que los vulcanólogos debían recomendar medidas de mitigación.
- Insuficiente personal y financiamiento para el monitoreo y la respuesta a la crisis, hasta después de la gran erupción.

En forma análoga, McNutt (1996) señala:

En general, las erupciones grandes son relativamente más fáciles de pronosticar que las pequeñas. La cantidad de magma involucrado es grande y los temblores tienden a ser numerosos y distribuidos por grandes áreas y volúmenes. Otros precursores, como deformación y fumarolas, se manifiestan junto con los enjambres sísmicos. Recientes ejemplos incluyen al Monte Santa Elena, al Pinatubo y al Spurr en Alaska. En contraste, las erupciones pequeñas y la mayoría de las erupciones freáticas involucran cantidades mucho más pequeñas de magma, tienen precursores muy sutiles o se presentan sin precursores. Son por lo tanto mucho más difíciles de pronosticar. Ejemplos recientes incluyen Galeras, enero a junio de 1993; Arenal, agosto de 1993, y White Island, febrero de 1992.

En el caso del Popocatepetl el Comité Científico, utilizando la información del Sistema de Monitoreo del CENAPRED, ha logrado un alto grado de confiabilidad en sus pronósticos sobre las tendencias de la actividad volcánica. Pronósticos enviados a Protección Civil desde 1994 y 1995 siguen vigentes.

Sin embargo, la actividad explosiva de bajo nivel en muchos casos no presenta precursores reconocibles, o bien éstos se pre-

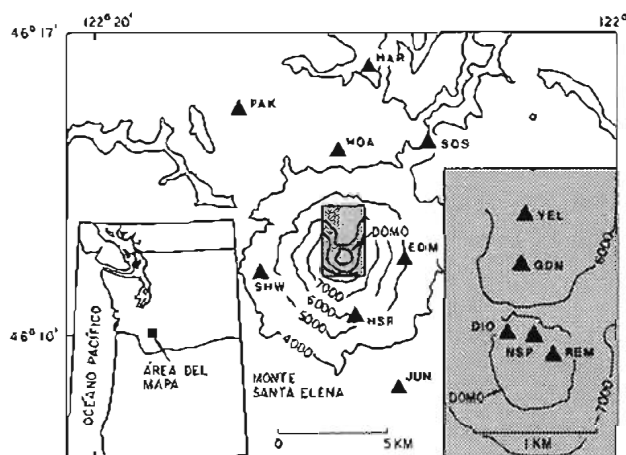


Figura 1. Distribución de las trece estaciones sísmicas con que se monitorea el volcán Santa Elena

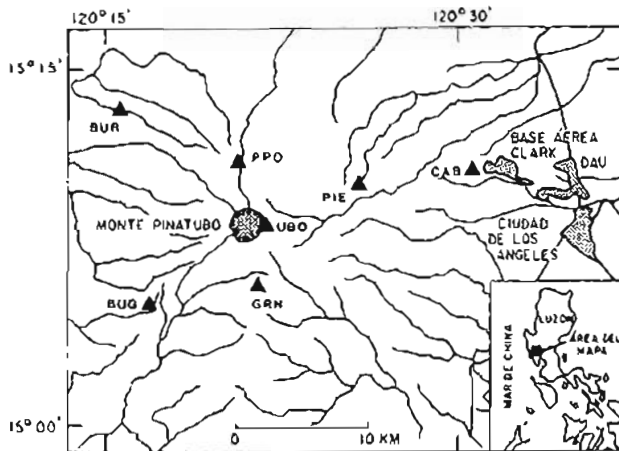


Figura 2. Distribución de las siete estaciones sísmicas utilizadas para monitorear al Pinatubo antes de la erupción de junio de 1991.

sentan con una antelación demasiado corta para tomar alguna medida preventiva. Así lo prueban las 43 víctimas causadas por los flujos piroclásticos producidos por el colapso de parte del domo y explosión subsiguiente en el volcán Unzen, con un muy alto nivel de vigilancia y monitoreo. Este volcán se encontraba en actividad, y los pronósticos del grupo científico sobre las tendencias eruptivas del volcán fueron correctos: las 43 víctimas se encontraban en zona declarada de alto riesgo. Sin embargo, no fue posible pronosticar esa explosión individual en un volcán en estado de actividad.

En el caso del Popocatepetl, las cinco víctimas del 30 de abril de 1996, se encontraban en un área que había sido declarada de alto riesgo.

PRONÓSTICO PARA EL POPOCATÉPETL

El pronóstico a corto plazo de la actividad del volcán se puede hacer a dos niveles:

a) Si la actividad se mantiene en el rango actual, esto es, si no se presentan cambios mayores en la composición y la velocidad de salida de la lava.

En lo que respecta a los episodios de actividad dentro del rango observado hasta la fecha, el cuerpo de lava que crece en el interior del cráter ha incrementado en cierta medida su capacidad de cerrar temporal y parcialmente las bocas de salida que permiten el desahogo de presión del interior del volcán. Cuando se tapan las bocas de desfogeo aumenta la sismicidad y se incrementa el nivel y el número de las exhalaciones, alcanzando algunas de ellas intensidad de explosiones moderadas. Si las bocas de desfogeo se destapan, las exhalaciones y la sismicidad decrecen, pero aumentan la

emisión continua de gas y las fumarolas. Esto implica que se cuenta con una capacidad limitada de pronosticar exhalaciones o explosiones individuales leves.

Las emisiones de ceniza que se producen dentro del rango de intensidades de la actividad actual no se considera que pongan en peligro la seguridad de la población que habita alrededor del volcán. Pueden sin embargo involucrar un riesgo para la navegación aérea, ya que aun la relativamente baja cantidad de ceniza volcánica acarreada por la pluma, durante las exhalaciones, puede afectar seriamente los motores de aviones que la atraviesen.

La posibilidad de que esa lava se desborde no se considera como un riesgo significativo a mediano plazo, dado que a la velocidad actual de crecimiento del cuerpo de lava, tardaría varios años en llenar la capacidad del cráter.

La probabilidad de que la actividad se mantenga dentro del rango actual por algunos años y eventualmente desaparezca se estima mayor al noventa por ciento.

b) Si la actividad sale del rango actual, esto es, si se presentan cambios importantes en la composición y la velocidad de salida de la lava.

En este caso, se espera que se presenten manifestaciones precursoras que pueden ser detectadas por los sistemas de monitoreo, antes que se desarrolle una actividad altamente explosiva y con la anticipación suficiente para permitir a los sistemas de Protección Civil tomar medidas preventivas (días a semanas). La probabilidad de que se presente un escenario de esta naturaleza se estima menor al diez por ciento. Sin embargo, la alta vulnerabilidad de un amplio sector de la población que vive en el entorno del volcán, ante una actividad de este tipo, requiere tomar a este escenario en alta consideración.

Como puede percibirse, si la actividad se mantiene dentro de la modalidad observada hasta el momento, el pronóstico del comportamiento del volcán Popocatepetl sólo puede hacerse en forma genérica y no siempre es posible que se pronostiquen explosiones individuales.

Si el Popocatepetl evolucionara hacia una fase diferente que implicara el desarrollo de una actividad eruptiva de gran escala, los síntomas precursores pueden ser reconocidos con la anticipación suficiente para tomar medidas preventivas.

(Servando de la Cruz Reyna es investigador titular del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México y coordinador de investigación del Centro Nacional de Prevención de Desastres.)