

Determinación de Zonas de Riesgo por Lahar para el Volcán San Miguel, El Salvador



Reporte de archivo abierto 01–395

Fotografía de la portada:

Vista del volcán San Miguel desde el sur. (*Fotografía de J.J. Major, U.S. Geological Survey*).

Determinación de zonas de riesgo por lahar para el volcán San Miguel, El Salvador

Por J.J. Major, S.P. Schilling, C.R Pullinger, C.D. Escobar, C.A. Chesner,
and M.M. Howell

**Investigación geológica de los Estados Unidos
Reporte de archive abierto 01-395**

Departamento del Interior de los Estados Unidos
Gale Norton, *Secretario*

Investigación geológica de los Estados Unidos
Charles G. Groat, *Director*

Este es un reporte preliminar y no se ha revisado su cumplimiento con los estándares editoriales de la U.S. Geological Survey. Cualquier uso de los nombres comerciales, de productos o de empresas sólo tiene finalidades de descripción y no implica patrocinio por parte del gobierno de los Estados Unidos.

Para comprar las publicaciones de la USGS póngase en contacto con:

U.S. Geological Survey
Information Services
P.O. Box 25286
Denver, CO 80225
(303) 202-4210

Este reporte también se encuentra disponible de manera digital en la Internet.

URL: <http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/ElSalvador>

CONTENIDO

Introducción	1
Avalanchas de escombros, desprendimientos de tierra y lahar	3
Futuros lahares y desprendimientos de tierra en el volcán San Miguel	4
Mapa de zonas de riesgo por lahar	5
Advertencias y pronósticos de riesgo por lahar	6
Protección a las comunidades y ciudadanos en contra de los riesgos de lahar	7
Referencias	7
Lecturas adicionales sugeridas	8
Notas finales	8

ILUSTRACIONES [en el bolsillo]

- I. Determinación de zonas de riesgo por lahar para el volcán San Miguel, El Salvador

FIGURAS

1. Ubicación de las principales ciudades y volcanes cuaternarios significativos en El Salvador..... 2

Determinación de zonas de riesgo por lahar para el volcán San Miguel, El Salvador

Por J.J. Major, S.P. Schilling, C.R Pullinger¹, C.D. Escobar¹, C.A. Chesner² y M.M. Howell

INTRODUCCIÓN

El volcán San Miguel, también conocido como Chaparrastique, es uno de los muchos volcanes a lo largo del arco volcánico en El Salvador (figura 1). El volcán, ubicado en la parte este del país, se eleva a una altitud de aproximadamente 2130 metros y se encuentra por encima de las comunidades de San Miguel, El Tránsito, San Rafael Oriente y San Jorge. Además de las comunidades más grandes que rodean el volcán, varias comunidades pequeñas y plantaciones de café se ubican sobre o en los alrededores de los flancos del volcán, además, la carretera Panamericana y la autopista costera cruzan los flancos más bajos del norte y sur del volcán. La densidad de la población alrededor del volcán San Miguel junto con la proximidad de las rutas principales de transporte aumenta el riesgo de que incluso los eventos más pequeños relacionados con el volcán, como las erupciones y los desprendimientos de tierra, podrían tener un impacto importante sobre la gente y la infraestructura.

El volcán San Miguel es uno de los volcanes más activos en El Salvador, el cual ha tenido erupciones en al menos 29 ocasiones desde 1699

[1] (los números entre paréntesis cuadrados se refieren a las notas finales en el reporte). Las erupciones históricas del volcán constan principalmente de emplazamientos relativamente tranquilos de flujos de lava o explosiones menores que generaron caídas modestas de **tefra** (fragmentos eruptivos de ceniza microscópica hasta bloques de un metro, que se dispersan en la atmósfera y cae a la tierra). Sin embargo, se sabe muy poco acerca de las erupciones prehistóricas del volcán. Los análisis químicos de los flujos de lava prehistóricos y las caídas de tefra delgadas del volcán San Miguel indican que el volcán está compuesto predominantemente de **basalto** (roca con un contenido de sílice menor al 53%), similar a la lava de los volcanes Hawaianos. La composición química de los productos eruptivos y la falta de evidencia de erupciones con cataclismos de grandes dimensiones sugieren que las erupciones prehistóricas probablemente fueron de naturaleza similar a las erupciones históricas. A diferencia de los volcanes San Salvador y San Vicente, el volcán San Miguel no parece tener una historia de erupciones explosivas violentas.

Las erupciones volcánicas no son los únicos eventos geológicos que representen un riesgo para las comunidades locales. Los desprendimientos de

¹ Servicio Nacional de Estudios Terrestres, Ave. Roosevelt y 55 Ave. Norte, Torre El Salvador (IPSFA)

² Department of Geology/Geography, Eastern Illinois University, Charleston, IL 61920

tierra y flujos de escombros asociados (flujos acuosos de lodo, roca y escombros — también conocidos como **lahares** cuando ocurren en un volcán) que pueden ocurrir durante periodos sin actividad volcánica también son una preocupación. En 1998, en el volcán Casita en Nicaragua, una lluvia extremadamente torrencial proveniente del huracán Mitch ocasionó un desprendimiento de tierra que se movió pendiente abajo y se transformó en un flujo de escombros en rápido movimiento que destruyó dos poblaciones además de ocasionar la muerte de más de 2000 personas. Las lluvias torrenciales en el volcán San Miguel en 1988, 1994, 1999 y 2000 ocasionaron flujos de escombros (lahares) sobre las pendientes noroeste del volcán los cuales viajaron pendiente abajo y dañaron la vía principal que conduce a San Jorge. Aunque los modernos desprendimientos de tierra y lahares en San Miguel han causado sólo pérdidas menores sobre las propiedades y han sido principalmente inconveniencias a corto plazo, los

desprendimientos de tierra y flujos de escombros ocasionados por temblores y lluvias destructivas sobre o en las cercanías del volcán San Salvador (figura 1) en Septiembre de 1982 y Enero de 2001, además del volcán san Vicente en Septiembre de 2001, demuestran que dichos movimientos masivos en El Salvador también pueden ser letales.

Este reporte describe los riesgos de los desprendimientos de tierra y lahares en general, además de discutir en particular los riesgos potenciales de futuros desprendimientos de tierra y lahares en el volcán san Miguel. El reporte también muestra, en el mapa adjunto de determinación de zonas de riesgo por lahar, en cuáles áreas es más probable que se presente un riesgo debido a los desprendimientos de tierra y lahares en San Miguel. Un reporte de Chesner (2000) se enfoca en una evaluación más amplia de los riesgos volcánicos del volcán.

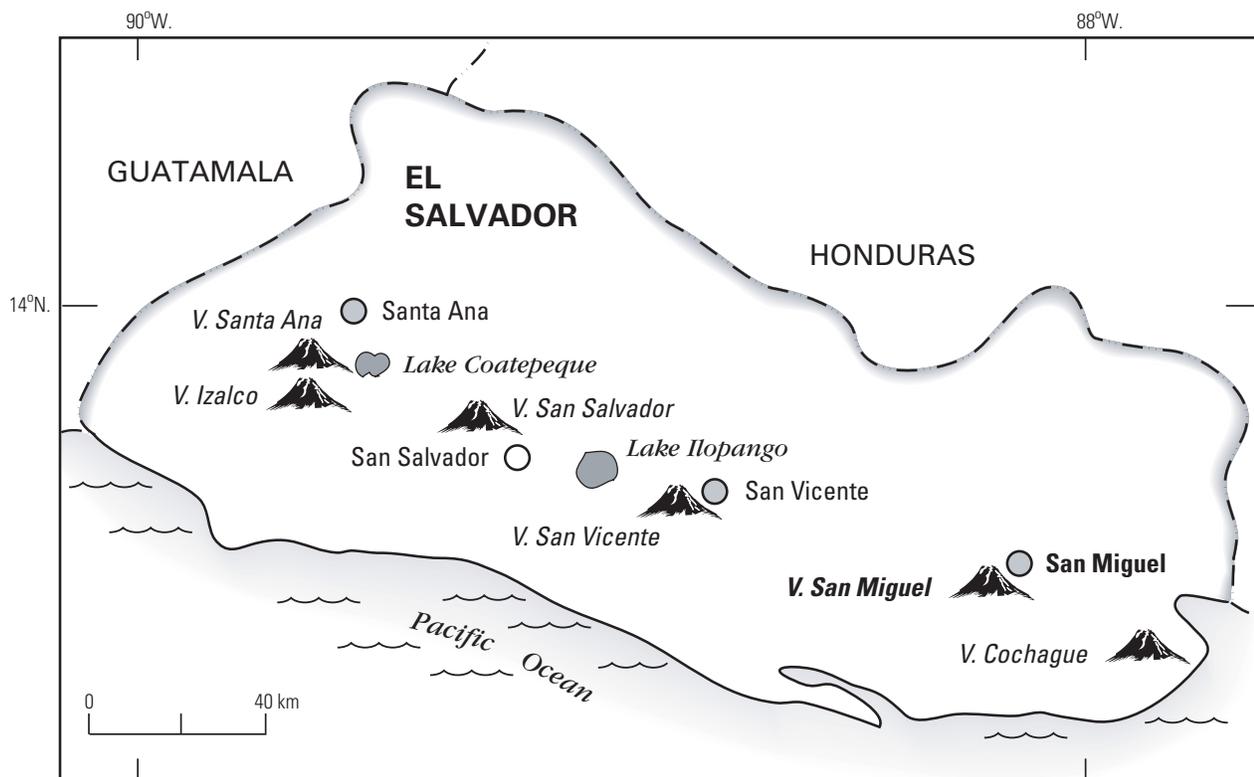


Figura 1. Ubicación de las principales ciudades y volcanes cuaternarios significativos en El Salvador. Los círculos indican las ciudades principales, los triángulos indican a los volcanes más importantes. El lago Coatepeque y el lago Ilopango son calderas de sílice de grandes dimensiones.

AVALANCHA DE ESCOMBROS, DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA Y LAHAR

Las pendientes de un volcán pueden llegar a ser inestables, caer catastróficamente y generar un **desprendimiento de tierra**. Un desprendimiento de tierra grande y en movimiento en un volcán se denomina comúnmente **avalancha de escombros**. La inestabilidad de la pendiente en los volcanes puede estar provocada por numerosos factores. Los temblores grandes, las lluvias torrenciales o las explosiones de vapor pueden iniciar desprendimientos de tierra quizás de hasta 10 millones de metros cúbicos o más. Los desprendimientos de tierra iniciados por estos mecanismos usualmente son relativamente superficiales, hasta varias decenas de metros de profundidad. Por lo contrario, el magma que se eleva hacia arriba a través de un volcán puede empujar a la roca volcánica anterior y estratificar los flancos de un volcán, o el agua caliente y ácida del interior puede circular a través de las grietas y zonas porosas profundas dentro de un volcán, alterar la roca más fuerte para aflojar la arcilla resbaladiza y debilitar gradualmente el volcán de modo que sea susceptible a las avalanchas de escombros de grandes dimensiones. Las avalanchas iniciadas por estos mecanismos pueden encontrarse dentro del orden de los 100 millones o más de metros cúbicos, además de que comúnmente erosionan profundamente y retiran fragmentos grandes de un volcán. Las avalanchas de escombros pueden alcanzar velocidades que superan los 150 kilómetros por hora; generalmente entre mayor sea la avalancha el viaje de la misma es más rápido y alcanza distancias más lejanas. Los desprendimientos de tierra de volúmenes pequeños y superficiales viajan típicamente solo unos cuantos kilómetros desde su fuente, sin embargo las avalanchas de escombros de gran volumen pueden viajar decenas de kilómetros desde un volcán. Las avalanchas de escombros y desprendimientos de tierra más pequeños destruyen todo a su paso y pueden dejar depósitos de decenas de metros de grosor sobre los pisos de los valles.

En numerosos volcanes alrededor del mundo se han podido encontrar depósitos de las

avalanchas de escombros, incluyendo los volcanes en El Salvador. En el volcán San Miguel todavía no se han podido reconocer depósitos de avalanchas de escombros de grandes dimensiones, lo cual sugiere que gran parte del volcán no se ha colapsado catastróficamente. Sin embargo, el volcán de San Miguel es un volcán grande y con pendientes empinadas, por lo que la posibilidad de una futura avalancha de escombros grandes, aunque sea lejana, no debe desestimarse.

Los **lahares**, también denominados flujos de lodo y flujos de escombros, son masas fluidas de lodo, roca y agua con una apariencia semejante a la del concreto fluyendo rápidamente. Éstos se producen cuando el agua mueve grandes volúmenes de lodo, roca y escombros volcánicos. Comúnmente, los desprendimientos de tierra y las avalanchas de escombros se transformarán en lahares. Los lahares, como las inundaciones, cubren las planicies de inundación y sumergen las estructuras en las áreas más bajas. Éstos pueden viajar varias decenas de kilómetros a velocidades de decenas de kilómetros por hora. Los lahares pueden destruir o dañar todo lo que encuentran en su trayectoria, enterrándolo o impactándolo. Siguen los valles de los ríos y dejan depósitos de arena lodosa y grava que comúnmente tienen unos cuantos metros de grosor. Son particularmente riesgosos debido a que pueden viajar distancias grandes desde el volcán y afectar los valles de la corriente en donde usualmente son mayores los asentamientos humanos. En algunos casos los lahares pueden obstruir un canal o bloquear un canal tributario y embalsar un lago detrás del bloqueo. Comúnmente, el agua embalsada se derramará sobre el bloqueo y generará una inundación que se mueve hacia abajo al valle, poniendo en peligro a la gente y sus propiedades.

Como las inundaciones, la amplitud de los lahares varía enormemente en sus dimensiones. La recurrencia de los lahares más pequeños es más frecuente (quizás cada pocos años), mientras que la recurrencia de los de mayores dimensiones suceden típicamente en periodos de tiempo del orden de milenios a decenas de milenios. La dimensión de un lahar esta controlada tanto por la cantidad de agua como del sedimento flojo o los escombros volcánicos disponibles. Las avalanchas de escombros o erupciones pueden

verter de decenas a miles de millones de metros cúbicos de sedimento dentro de los canales y producir lahares de grandes dimensiones. Los desprendimientos de tierra o erupciones de pequeñas dimensiones producen lahares también pequeños.

Los lahares y desprendimientos de tierra pueden causar problemas prolongados después de que ha concluido el evento que les ha formado. Una vez que los lahares y desprendimientos de tierra llenan los canales de la corriente con sedimentos, las corrientes comienzan a erosionar nuevas trayectorias, además los nuevos canales de la corriente pueden ser altamente inestables y se bifurcan rápidamente a medida que el sedimento se erosiona y se mueve más adelante valle abajo. La bifurcación de la corriente puede provocar una erosión rápida y dramática de la ribera. Además, debido a que los canales de la corriente se encuentran obstruidos con sedimentos, tienen menos capacidad de transportar agua. Como resultado, inundaciones relativamente pequeñas, las cuales podrían haber pasado desapercibidas previamente, pueden representar amenazas potencialmente significativas para la gente que habita en las áreas bajas. La gente que vive en las áreas bajas a lo largo de los valles del río es más susceptible para estas afectaciones secundarias provenientes de los desprendimientos de tierra y lahares, sin embargo en las tierras más elevadas adyacentes a los canales del río pueden encontrarse amenazados por la erosión de la ribera. Los ejemplos obtenidos de muchos volcanes alrededor de todo el mundo muestran que los efectos del depósito de sedimentos debido a los desprendimientos de tierra y lahares en canales de corriente pueden persistir por varios años e incluso décadas [2].

Los depósitos de los lahares y los desprendimientos de tierra en el volcán San Miguel se encuentran únicamente de manera local. Además de los depósitos de los lahares iniciados por lluvias que ocurrieron durante los pasados veinte años provenientes de las pendientes cubiertas de tefra sobre el lado oeste del volcán, se encuentran unos cuantos depósitos de lahares prehistóricos (?) en el flanco oeste del volcán, a unos 4 km de la cumbre, y otros están expuestos de manera local en la base del volcán en sus otros

flancos. La distribución limitada de los lahares en San Miguel sugiere que las erupciones del volcán no han generado comúnmente desprendimientos de tierra y lahares, no se tienen lahares extensos formados durante los intervalos sin actividad eruptiva. Es más probable que las erupciones hayan cubierto las pendientes del volcán con tefra y las subsecuentes lluvias torrenciales hayan erosionado el sedimento o iniciado pequeños desprendimientos de tierra que se movieron hasta convertirse en lahares.

FUTUROS LAHARES Y DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA EN EL VOLCÁN SAN MIGUEL

Los desprendimientos de tierra y lahares, iniciados por alguno de los diversos mecanismos, pueden ocurrir sobre cualquier flanco del volcán. Los efectos directos de la mayoría de los desprendimientos de tierra y lahares en San Miguel probablemente se encuentren confinados dentro de unos 10 kilómetros de la cumbre del volcán, aunque en raras ocasiones los lahares de mayores dimensiones pueden viajar aún más. Dichos eventos de grandes dimensiones, involucrando quizás más de 10 millones de metros cúbicos de escombros, tienen una baja probabilidad de presentarse y requerirían una erupción sustancial productora de tefra o una avalancha de escombros que retirase una parte sustancial del volcán. Ambos escenarios requerirían generalmente que el magma emergiese a un nivel elevado dentro del volcán. Cuando el magma se eleva dentro de un volcán se acompaña por una actividad sísmica creciente, una deformación visible del volcán y otros signos que proporcionan señales de advertencia con respecto al comienzo de las condiciones de riesgo.

Es probable que los lahares futuros sean iniciados por la erosión o los desprendimientos de tierra en el manto de tefra que cubre las pendientes del volcán, y probablemente tendrán dimensiones menores a un millón de metros cúbicos (véase la discusión en la sección acerca del mapa para la determinación de las zonas de riesgo por lahar). Es probable que las futuras erupciones de San Miguel produzcan caídas de tefra menores que

sirvan de fuente de nuevos sedimentos para los lahares. En general, es más probable que el lado oeste del volcán se vea afectado por futuros lahares debido a la distribución de tefra. Aunque los vientos predominantes dependan de las estaciones del año, los vientos del este tienden a dominar [3], mientras que el grosor de la tefra generalmente aparece con mayores dimensiones sobre el flanco oeste del volcán con respecto al resto de los otros flancos.

Aunque es más probable que los efectos directos de los desprendimientos de tierra y lahares se encuentren confinados dentro de una distancia de 10 kilómetros desde el volcán, los efectos secundarios relacionados con la erosión de sedimentos y el transporte a lo largo de los canales puede afectar áreas lejanas al volcán y pueden permanecer durante varios años. Dichos efectos secundarios involucran la remoción y redistribución del sedimento, la erosión de la ribera, la reducción de la capacidad del canal y el aumento del riesgo de inundaciones en las áreas bajas.

MAPA DE ZONAS DE RIESGO POR LAHAR

Debido a que se conocen muy poco los detalles de la historia eruptiva y de desprendimientos de tierra de San Miguel, nos apoyamos en los datos provenientes de los volcanes alrededor del mundo que son similares al San Miguel para obtener una idea general acerca de los posibles riesgos provenientes de los desprendimientos de tierra y lahares. Este es un método razonable debido a que en muchos volcanes ocurren tipos similares de desprendimientos de tierra y lahares, pero incluso los tipos exactos que ocurren, así como sus dimensiones y frecuencias relativas, variarán entre los diferentes centros volcánicos.

El mapa anexo de las zonas de riesgo por lahar (ilustración 1) muestra las áreas que podrían verse afectadas por futuros desprendimientos de tierra y lahares en San Miguel. La ubicación y dimensiones del área afectada dependerá de la localización de un desprendimiento de tierra o del área de erosión sustancial del flanco, el volumen y carácter del sedimento involucrado, la forma del

canal en el cual ocurre el lahar y si el proceso inicial clave fue o no la intrusión magmática.

Las áreas potenciales de inundación lahar a lo largo de los canales principales que drenan el volcán San Miguel se dividen en zonas anidadas sobre la base del tamaño de lahar y de su grado relativo de riesgo. Los límites de inundación se determinan sobre la base de modelos matemáticos que utilizan calibraciones provenientes de otros volcanes, los cuales predicen la probable extensión de los lahares, además de nuestro juicio y experiencia derivada de las observaciones y de la comprensión de los desprendimientos de tierra y lahares de volcanes similares.

Aunque mostramos límites fijos para las zonas de riesgo por lahar, la frontera de las zonas de riesgo no cambia o termina repentinamente en estos límites. Más bien, el riesgo disminuye gradualmente a medida que aumenta la distancia al volcán y disminuye rápidamente a medida que aumenta la elevación sobre los pisos del canal. Las áreas inmediatamente fuera de las zonas de riesgo no deben considerarse como libres de riesgo, debido a que los límites de riesgo por lahar sólo pueden ubicarse de manera aproximada, especialmente en áreas de relieves bajos. La incertidumbre existente con respecto a la fuente, dimensiones y movilidad de los futuros lahares impide la ubicación precisa de los límites para las zonas sin riesgo.

Los usuarios del mapa de riesgo en este reporte deberán estar consientes de que el mapa no muestra todas las áreas sujetas a los riesgos de desprendimientos de tierra y lahares provenientes del volcán San Miguel. Para este reporte hemos definido zonas de inundación a partir de lahares de varios volúmenes para los canales más importantes que se dirigen directamente a las áreas pobladas. Otros canales para los cuales no hemos modelado la inundación por lahares no deben considerarse como áreas libres de riesgos.

Utilizamos una técnica matemática calibrada con datos provenientes de otros volcanes [4] para estimar las áreas potenciales de inundación por parte de los lahares de varios volúmenes. Para cada canal analizado, definimos zonas de riesgo anidadas que describen la inundación de manera anticipada por medio de un diseño hipotético de

los lahares que tienen diferentes volúmenes. Nos enfocamos en la estimación de las áreas de inundación de los lahares que podrían iniciarse por medio de temblores o lluvias torrenciales, dado que estas son las causas más comunes para los lahares en el volcán San Miguel. No estimamos las áreas de inundación derivadas de las avalanchas de escombros de grandes dimensiones que podrían iniciarse debido a la intrusión magmática dentro del volcán. Los eventos de este tipo, en particular en los volcanes basálticos, son raros. El diseño de los lahares de mayores dimensiones iniciados dentro de un canal único, un millón de metros cúbicos, refleja nuestra estimación del posible lahar de mayores dimensiones que podría ser iniciado por temblores o lluvias torrenciales en San Miguel [4]. Los diseños de lahares intermedios (de 300,000 a 500,000 metros cúbicos) y más pequeños (100,000 metros cúbicos) son volúmenes más típicos que podrían resultar de los desprendimientos de tierra iniciados por dichos eventos. Los desprendimientos de tierra y lahares de estas dimensiones han ocurrido históricamente en el volcán San Miguel, así como en los volcanes San Salvador y San Vicente, además los lahares de hasta 500,000 metros cúbicos son los tamaños con mayor probabilidad de que se presenten de nuevo.

El que se presenten lahares de grandes dimensiones es menos probable que los lahares más pequeños. La probabilidad anual de lahares de varios tamaños es difícil de estimar, debido a que no se conocen las edades y extensión de los lahares prehistóricos en San Miguel. Con base en el examen de las probabilidades de ocurrencia de los desprendimientos de tierra y lahares de varios tamaños en otros volcanes principales dentro del país [5] es probable que los desprendimientos de tierra y lahares con dimensiones de un millón de metros cúbicos o más tengan una probabilidad anual de ocurrencia menor a 1 en 10,000. Es mucho más probable que ocurran desprendimientos de tierra y lahares mucho más pequeños, los lahares de aproximadamente 500,000 metros cúbicos o menos podrían tener una probabilidad anual de 1 en 100 o quizás hasta de 1 en 5 [6].

En general, las zonas de riesgo de lahar se encuentran dentro de los 10 kilómetros alrededor

del cráter de la cumbre. La topografía local juega un papel preponderante en el control del recorrido del lahar. Aunque un desprendimiento de tierra o lahar, se origina y fluye a lo largo de drenados profundamente cortados sobre los flancos del volcán, estos canales se hacen menos profundos de manera abrupta y la topografía se aplana cerca de la base del edificio. Como resultado, los lahares se derraman rápidamente fuera de los canales, se dispersan y se detienen. Las zonas de riesgo más distantes están asociadas con los canales con incisiones más profundas en los cuales los lahares permanecen confinados. A pesar de que sus distancias de recorrido son relativamente cortas, incluso los lahares más pequeños pueden causar fatalidades y daños a la infraestructura. Aunque la mayor parte de las comunidades cercanas al volcán se localizan a 10 kilómetros o más de la cumbre del volcán, existen comunidades más pequeñas, plantaciones de café e importantes rutas de comunicación y transporte sobre los flancos más bajos del volcán ubicados dentro de los 10 kilómetros desde la cumbre del volcán. Las zonas de riesgo de incluso los lahares más pequeños se extienden sobre áreas con asentamientos humanos actuales o tierras utilizadas para la agricultura.

ADVERTENCIAS Y PRONÓSTICOS DE RIESGO POR LAHAR

Es muy difícil, sino es que imposible, predecir la ocurrencia precisa de los desprendimientos de tierra y lahares iniciados por temblores o lluvias torrenciales. Sin embargo, generalmente pueden reconocerse las condiciones de riesgo que favorecen la formación de los desprendimientos de tierra y lahares. Las predicciones para las lluvias torrenciales, que comúnmente dan inicio a las advertencias de inundación, pueden servir como indicadores de condiciones favorables para los desprendimientos de tierra y lahares. Cuando el volcán San Miguel haga erupción de nuevo, es probable que se dispersen caídas de tefra sobre sus flancos. La erosión posterior de dicha tefra puede generar lahares similares a los que ocurrieron en los pasados 20 años. En este caso, la erupción del volcán puede servir como una advertencia acerca de que las condiciones son favorables para la

formación de un lahar y la distribución de la caída de tefra puede indicar cuáles flancos es más probable que se vean afectados. En el caso raro de que una avalancha de escombros de grandes dimensiones sea iniciada por la intrusión de magma dentro del volcán, la deformación del volcán servirá como una señal de advertencia de que las condiciones son riesgosas. Sin embargo, los funcionarios gubernamentales y el público necesitan estar consientes de que pueden ocurrir eventos potencialmente letales en las zonas de riesgo por lahar con pocas o ninguna señal de advertencia.

PROTECCIÓN A LAS COMUNIDADES Y CIUDADANOS EN CONTRA DE LOS RIESGOS DE LAHAR

Las comunidades y ciudadanos deben efectuar planes que vayan más allá de mitigar los efectos de futuros desprendimientos de tierra y lahares provenientes del volcán San Miguel. Los esfuerzos de mitigación a largo plazo deben incluir el uso de información acerca de los riesgos de los lahares y otros riesgos del volcán (véase Chesner, 2000) cuando se toman decisiones con respecto al uso del suelo y el establecimiento y desarrollo de los servicios críticos. Los desarrollos futuros deben evitar las áreas que se juzgue que tengan un riesgo altamente inaceptable o deberán planearse y diseñarse para reducir dicho nivel de riesgo.

Dependiendo de la distancia al volcán, las zonas de riesgo descritas en el mapa son áreas que se verán afectadas de unos cuantos minutos a una hora después del comienzo de un lahar. Más allá de 10 kilómetros de la cumbre del volcán, el escape podría ser posible si la gente recibe las alarmas suficientes. Dentro de los 10 kilómetros alrededor del volcán los lahares se producen demasiado rápido como para poder brindar señales de alarma efectivas. Por ello, los ciudadanos deben aprender a reconocer por sí mismos las condiciones de riesgo que favorecen la formación de desprendimientos de tierra y lahares.

Debido a que los desprendimientos de tierra pueden ocurrir sin señales de advertencia, se deberán establecer por adelantado planes de

emergencia adecuados para enfrentarlos. Aunque es incierto cuándo ocurrirán de nuevo los desprendimientos de tierra y lahares en el volcán San Miguel, los funcionarios públicos necesitan considerar diversos aspectos como por ejemplo la educación pública, las comunicaciones y las evacuaciones como parte del plan de respuesta. Los planes de emergencia ya desarrollados para las inundaciones pueden aplicarse en alguna medida, pero podrían necesitar modificaciones. Para las poblaciones en las áreas bajas también es útil un mapa que muestre la ruta más corta hacia las zonas más elevadas.

El conocimiento y la planeación por adelantado son los aspectos más importantes para enfrentar los riesgos de desprendimientos de tierra y lahares. Es especialmente importante contar con un plan de acción basado en el conocimiento de las áreas relativamente seguras alrededor de los hogares, escuelas y sitios de trabajo. Los lahares son la mayor amenaza para la gente que vive o se recrea a lo largo de los canales que drenan al volcán San Miguel. La mejor estrategia para evitar un lahar es moverse a las zonas más elevadas posibles. Una altura segura por encima de los canales de un río depende de muchos factores entre los que se incluyen el tamaño del lahar, la distancia desde el volcán y la forma del valle. Para las áreas alejadas a más de 8 kilómetros de la cumbre del volcán, todos los lahares, salvo los de mayores dimensiones, se elevarán a menos de 10 metros por encima del nivel del río. Los lahares y desprendimientos de tierra del volcán San Miguel ocurrirán de nuevo y la mejor manera de enfrentar estos eventos es a través de una planeación por adelantado con la finalidad de mitigar sus efectos.

REFERENCIAS

- Baum, R.L., Crone, A.J., Escobar, D., Harp, E.L., Major, J.J., Martinez, M., Pullinger, C.R., and Smith, M.E., 2001, Assessment of landslide hazards resulting from the February 13, 2001, El Salvador earthquake: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-119, 22 p.
- Chesner, C.A., 2000, A preliminary hazard assessment of San Miguel Volcano, El Salvador. Unpublished report, Eastern Illinois University,

- Department of Geology and Geography, 28 p.
- Escobar, C.D., Mendez, I., y Ramirez, O.R., 1993, Estudio geológico preliminar del Volcán de San Miguel: Peligrosidad eruptiva, estado erosivo, y sus consecuencias: Trabajo de Graduación, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Tecnológica, San Salvador, El Salvador, 176 p.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P., and Vallance, J.W., 1998, Objective delineation of lahar-hazard zones downstream from volcanoes: Geological Society of America Bulletin, v. 110, p. 972-984.
- Major, J.J., Pierson, T.C., Dinehart, R.L., and Costa, J.E., 2000, Sediment yield following severe volcanic disturbance—a two decade perspective from Mount St. Helens: Geology, v. 28, p. 819-822.
- Major, J.J., Schilling, S.P., Sofield, D.J., Escobar, C.D., and Pullinger, C.R., 2001a, Volcano hazards in the San Salvador Region, El Salvador: U.S. Geological Survey Open-file Report 01-366, 17 p.
- Major, J.J., Schilling, S.P., Pullinger, C.R., and Escobar, C.D., and Howell, M.M., 2001b, Volcano-hazard zonation for San Vicente Volcano, El Salvador: U.S. Geological Survey Open-file Report 01-367, 15 p.
- Mercado, R., Rose, W.I., Najera, L., Matías, O., and Girón, J., 1988, Volcanic ashfall hazards and upper wind patterns in Guatemala, preliminary report: Publication of Department of Geological Engineering and Sciences, Michigan Technological University: Houghton, MI, 34 p.
- Portig, W.H., 1976, The climate of Central America, in Schwerdtfeger, W., ed., World Survey of Climatology, Climates of Central and South America, v. 12: Elsevier, New York, p. 405-478.
- Rymer, M.J., and White, R.A., 1989, Hazards in El Salvador from earthquake-induced landslides, in Brabb, E.E., and Harrod, B.L., eds., Landslides: Extent and Economic Significance. Balkema, Rotterdam, p. 105-109.
- Simkin, T., and Siebert, L., 1994, Volcanoes of the World, 2nd edition. Geosciences Press, Inc., Tucson, 349 p.
- Williams, H., and Meyer-Abich, H., 1955, Volcanism in the southern part of El Salvador: University of California Publications in Geological Sciences, v. 32, 64 p.

LECTURAS ADICIONALES SUGERIDAS

- Blong, R.J., 1984, Volcanic hazards. Academic Press, Orlando, 424 p.
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H., and Stix, J., eds., 2000, Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, San Diego, CA., 1417 p.
- Tilling, R.I., ed., 1989, Volcanic hazards: Short course in geology, v. 1, American Geophysical Union, Washington,

NOTAS FINALES

- [1] La fecha geológica sobre la cual se basa este reporte proviene principalmente de Williams y Meyer-Abich (1955); Escobar et al. (1993); Simkin y Siebert (1994), Chesner (2000); comunicaciones con el personal del Centro de Investigaciones Geotécnicas, San Salvador y nuestras propias investigaciones de reconocimiento.
- [2] Los análisis de los datos limitados provenientes de los volcanes alrededor del mundo indican que los yacimientos de sedimentos provenientes de los canales de río llenos con escombros de una erupción pueden permanecer más altos que los niveles de fondo típicos para los años o décadas posteriores a una erupción. En algunos casos los yacimientos de sedimento pueden ser de 10 a 100 veces mayores a los niveles de fondo típicos por más de dos décadas (Major et al, 2000).
- [3] Los patrones de viento de nivel superior en Guatemala a altitudes de entre 3000 a 15,000 metros dependen enormemente de las estaciones del año (Mercado et al., 1988). En El Salvador se encuentran patrones de viento similares. De enero a marzo dominan los vientos del oeste. Abril y mayo son meses de transición en los cuales los vientos del oeste dan paso a los provenientes del norte y el este. El periodo de junio a octubre se caracteriza por los vientos del este, mientras que noviembre y diciembre son meses de transición durante los cuales los vientos del oeste gradualmente se vuelven predominante. La fuerte dependencia de las estaciones del año sobre estos vientos tendrá influencia en las áreas afectadas por las

caídas de tefra. Las tefras provenientes de las erupciones probablemente caigan al este del volcán de enero a marzo, cubriendo potencialmente regiones amplias al este, sur y oeste en abril y mayo, afectando las áreas del lado oeste del volcán de junio a octubre y posiblemente las áreas al oeste, norte y este del volcán en noviembre y diciembre. Los vientos superficiales podrían afectar también las distribuciones de tefra; además de depender de las estaciones del año sus patrones también son diurnos (Porting, 1976). Por ello, todos los sectores que rodean al volcán San Miguel pueden verse afectados por la caída de tefra, pero es más probable que se afecte el flanco oeste debido a una probabilidad ligeramente mayor de que se presenten vientos del este.

- [4] Las zonas de riesgo de lahar se construyeron por medio del modelado de volúmenes de lahar de 100,000; 300,000; 500,000 y un millón de metros cúbicos. Utilizando técnicas matemáticas y de cartografía digital (Iverson et al., 1998), estos volúmenes se utilizaron para calcular la extensión estimada de la inundación aguas abajo desde el área fuente. Aunque se han identificado depósitos lahar en el volcán San Miguel y cuatro lahares han descendido los flancos del volcán en los últimos 13 años, los volúmenes de estos eventos se conocen vagamente. Regionalmente, los desprendimientos de tierra y lahares iniciados por temblores y lluvias torrenciales han tenido volúmenes de hasta 10 millones de metros cúbicos, pero la mayoría han tenido volúmenes de unos cuantos de cientos a cientos de miles de metros cúbicos (Rymer y White, 1989; Baum et al., 2001; Harp y A. J. Crone, U. S. Geological Survey, comunicación personal). En el volcán Casita en Nicaragua, una lluvia extremadamente torrencial proveniente del huracán Mitch originó un desprendimiento con un volumen cercano a los 1.5 millones de metros cúbicos, sin embargo a medida que se movió pendiente abajo se transformó en un lahar que desgastó su canal con un volumen de más de 3 millones de metros cúbicos (K. M. Scott, U. S. Geological Survey, comunicación personal). Considerando estos datos, seleccionamos un desprendimiento de tierra y

un lahar asociado de un millón de metros cúbicos como el tamaño máximo más probable a producirse en cualquier canal en el volcán San Miguel por temblores o lluvias torrenciales.

- [5] Major et al. proporcionan las probabilidades de que ocurran lahares con volúmenes de un millón de metros cúbicos o más en los volcanes San Salvador y San Vicente. (2001a, b).
- [6] Estimamos que las probabilidades anuales de los desprendimientos de tierra y lahares que tienen volúmenes cercanos a los 500,000 metros cúbicos o menos en el volcán San Miguel son como se indica a continuación. Los desprendimientos de tierra históricos inducidos por temblores han ocurrido a través de El Salvador en al menos una docena de veces de 1857 al 2001 (Rymer y White, 1989; Baum et al., 2001). Los volúmenes de estos desprendimientos de tierra van de unos cuantos de cientos a más de 10 millones de metros cúbicos, pero la mayoría tienen volúmenes de menos de unos cuantos a decenas de miles de metros cúbicos. Así, los desprendimientos de tierra inducidos por temblores de volúmenes pequeños a moderados ocurren en El Salvador aproximadamente una vez cada 12 años. En el volcán San Miguel, se sabe que han ocurrido lahares y desprendimientos de tierra iniciados por las lluvias en cuatro ocasiones en los últimos 13 años, lo cual sugiere que la probabilidad anual de ocurrencia de estos eventos puede ser tan grande como 1 a 3. Estos lahares modernos no alcanzaron a la mayoría de las comunidades, pero dañaron la carretera Panamericana en dirección a San Jorge (véase la ilustración 1). No se conocen los volúmenes de estos lahares, pero su extensión sugiere volúmenes del orden de 100,000 metros cúbicos o más. Aunque las probabilidades estimadas que se han determinado anteriormente están enormemente generalizadas, sugerimos que la probabilidad anual de desprendimientos de tierra y lahares con dimensiones de 500,000 metros cúbicos en el volcán San Miguel es de aproximadamente 1 en 100 (comparable al volcán San Salvador; véase Major et al. 2001a) a quizás valores tan grandes como 1 en 5.



Printed on recycled paper

