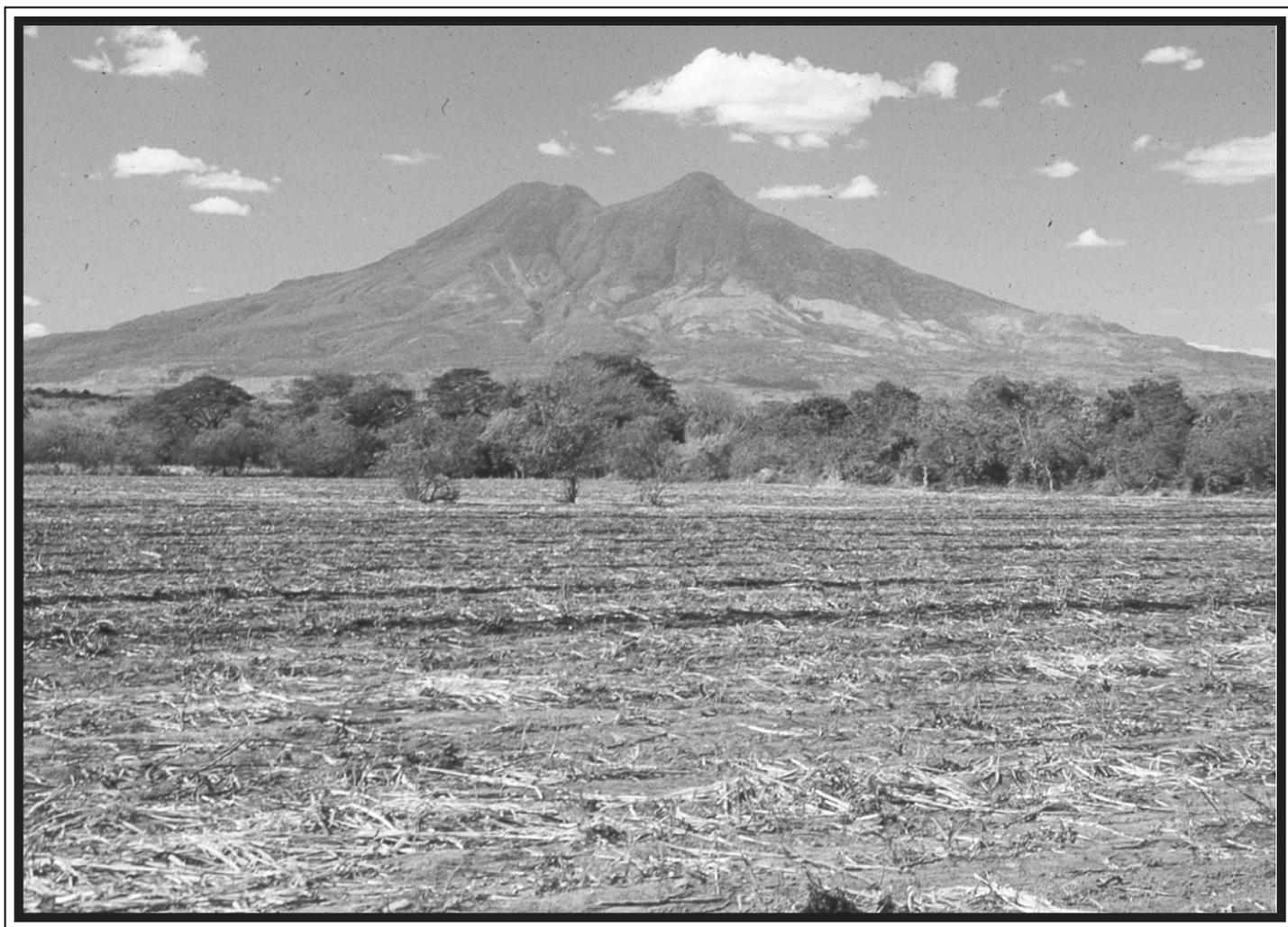


Determinación de zonas de riesgo volcánico para el volcán San Vicente, El Salvador



Reporte de archivo abierto 01–367

Fotografía de la portada

Vista del volcán San Vicente desde el sureste. Nótese los conos dobles del volcán. El complejo La Carbonera se localiza al oeste del volcán y el cono más joven a la derecha, esto indica que el foco de la actividad volcánica ha migrado en cierta medida hacia el este con el paso del tiempo *(Fotografía de J.J. Major)*.

Determinación de Zonas de Riesgo Volcánico para el Volcán San Vicente, El Salvador

Por J.J. Major, S.P. Schilling, C.R. Pullinger, C.D. Escobar y M.M. Howell

**Investigación geológica de los Estados Unidos
Reporte de archive abierto 01-367**

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
El fenómeno volcánico	2
Flujo piroclástico y oleada piroclástica	4
Flujos de lava y domos de lava	4
Tefra	5
Gases volcánicos	6
Avalancha de escombros, desprendimientos de tierra y lahar	7
Eventos anteriores en el volcán San Vicente	8
Actividad futura en el volcán San Vicente	10
Eventos en otros volcanes que pueden afectar la región de San Vicente	11
Mapa de zonas de riesgo volcánico	12
Zona de riesgo volcánico proximal	12
Zonas de riesgo lahar	13
Advertencias y pronósticos de riesgo	14
Protección a las comunidades y ciudadanos en contra de los riesgos relacionados al volcán	15
Referencias	15
Lecturas adicionales sugeridas	16
Notas finales	16

ILUSTRACIONES [en el bolsillo]

- I. Determinación de zonas de riesgo volcánico para el volcán San Vicente, El Salvador.

FIGURAS

1. Ubicación de las principales ciudades y volcanes cuaternarios significativos en El Salvador. 2
2. Esquema simplificado que muestra los eventos de riesgo asociados con un volcán como el San Vicente

Determinación de Zonas de Riesgo Volcánico para el Volcán San Vicente, El Salvador

By J.J. Major, S.P. Schilling, C.R Pullinger¹, C.D. Escobar¹, M.M. Howell

INTRODUCCIÓN

El volcán San Vicente, también conocido como Chichontepec, es uno de los muchos volcanes a lo largo del arco volcánico en El Salvador (figura 1). Este volcán compuesto, ubicado a unos 50 kilómetros al este de la capital San Salvador, con un volumen de aproximadamente 130 kilómetros cúbicos, se eleva a una altitud de aproximadamente 2180 metros, y se encuentra por encima de varias comunidades importantes, como San Vicente, Guadalupe, Zacatecoluca y Tecoluca. 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 de que varias rutas de comunicación y transporte se ubican en los flancos más bajos al sur del volcán. La densidad de población y su proximidad alrededor del volcán San Vicente, así como la proximidad a rutas de transporte importantes, aumenta el riesgo de que incluso los desprendimientos de tierra más pequeños o erupciones, que pudiesen ocurrir de nuevo, podrían tener consecuencias sociales serias.

La historia eruptiva del volcán San Vicente no se conoce bien, además de que no existe un

registro histórico de la actividad eruptiva definitivo [1] (los números entre paréntesis se refieren a las notas finales del reporte). La erupción significativa más reciente ocurrió hace más de 1700 años, ocurriendo quizás antes de la habitación humana permanente del área. Sin embargo, este volcán tiene una historia muy larga de erupciones repetidas y en ocasiones violentas, además de que al menos en una ocasión una sección importante del volcán se colapsó en un desprendimiento de tierra masivo. Las rocas más antiguas asociadas con el centro volcánico en San Vicente tienen más de 2 millones de años. El volcán está compuesto de remanentes de múltiples centros eruptivos que han migrado en cierta medida hacia el este con el paso del tiempo. Las futuras erupciones de este volcán representarán un riesgo sustancial para las comunidades circundantes.

Las erupciones volcánicas no son los únicos eventos que ponen en riesgo a las comunidades locales. Otra preocupación se refiere a los desprendimientos de tierra y a los flujos de escombros asociados (un flujo acuoso de lodo, rocas y escombros también conocido como lahar) el cual es un fenómeno que podría presentarse durante los periodos sin actividad volcánica. Un

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

evento de este tipo ocurrió en 1998 en el volcán Casita en Nicaragua cuando 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. En el volcán de San Vicente existen desprendimientos de tierra históricos, de volúmenes de hasta unos cientos de miles de metros cúbicos, debido a lluvias torrenciales y temblores, algunos de los cuales se han transformado en flujos de escombros que han inundado áreas pobladas aguas abajo [1]. Por ejemplo, un flujo de escombros en 1934 al lado norte de San Vicente destruyó el pueblo de Tepetitan. Los desprendimientos de tierra destructivos debidos a lluvias o temblores así como los flujos de escombros en o en las cercanías del volcán San Salvador, al oeste de San Vicente, en septiembre de 1982 y enero de 2001

demuestran que dichos movimientos masivos en El Salvador también han sido letales.

Este reporte describe los tipos de eventos de riesgo que ocurren en los volcanes en general y los tipos de eventos geológicos de riesgo que han ocurrido en el volcán San Vicente en el pasado. El mapa incluido de las distintas zonas de riesgo volcánico muestra las áreas en que el peligro es más probable si dichos eventos de riesgo ocurriesen de nuevo.

EL FENÓMENO VOLCÁNICO

Los volcanes poseen una variedad de riesgos geológicos tanto durante las erupciones como en ausencia de la actividad eruptiva (figura 2). Aunque han pasado mucho años desde la última erupción significativa del volcán San Vicente, muchos de los eventos de riesgo descritos en la figura 2 han ocurrido en San Vicente en el pasado y es muy probable que se presenten de nuevo. La

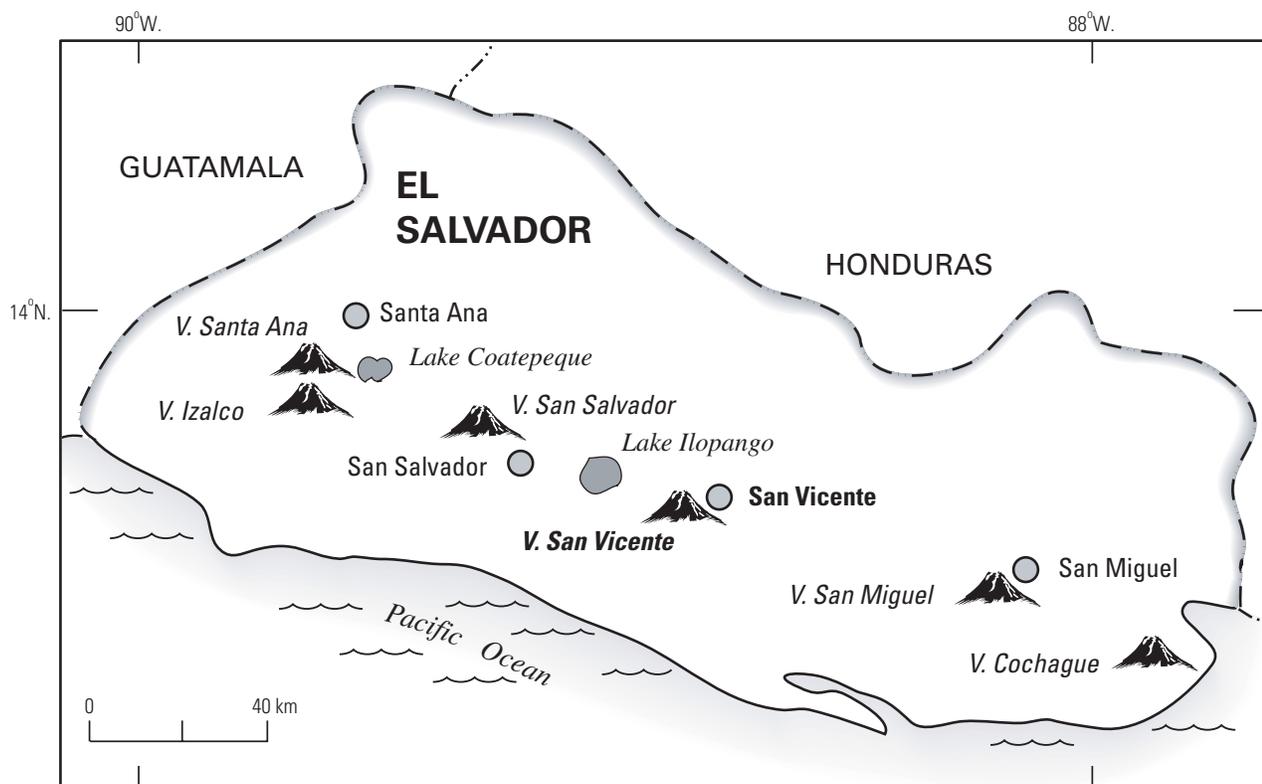


Figure 1. Location of major cities and significant Quaternary volcanoes in El Salvador. Circles indicate major cities, triangles indicate major volcanoes. Lake Coatepeque and Lake Ilopango are large silicic calderas.

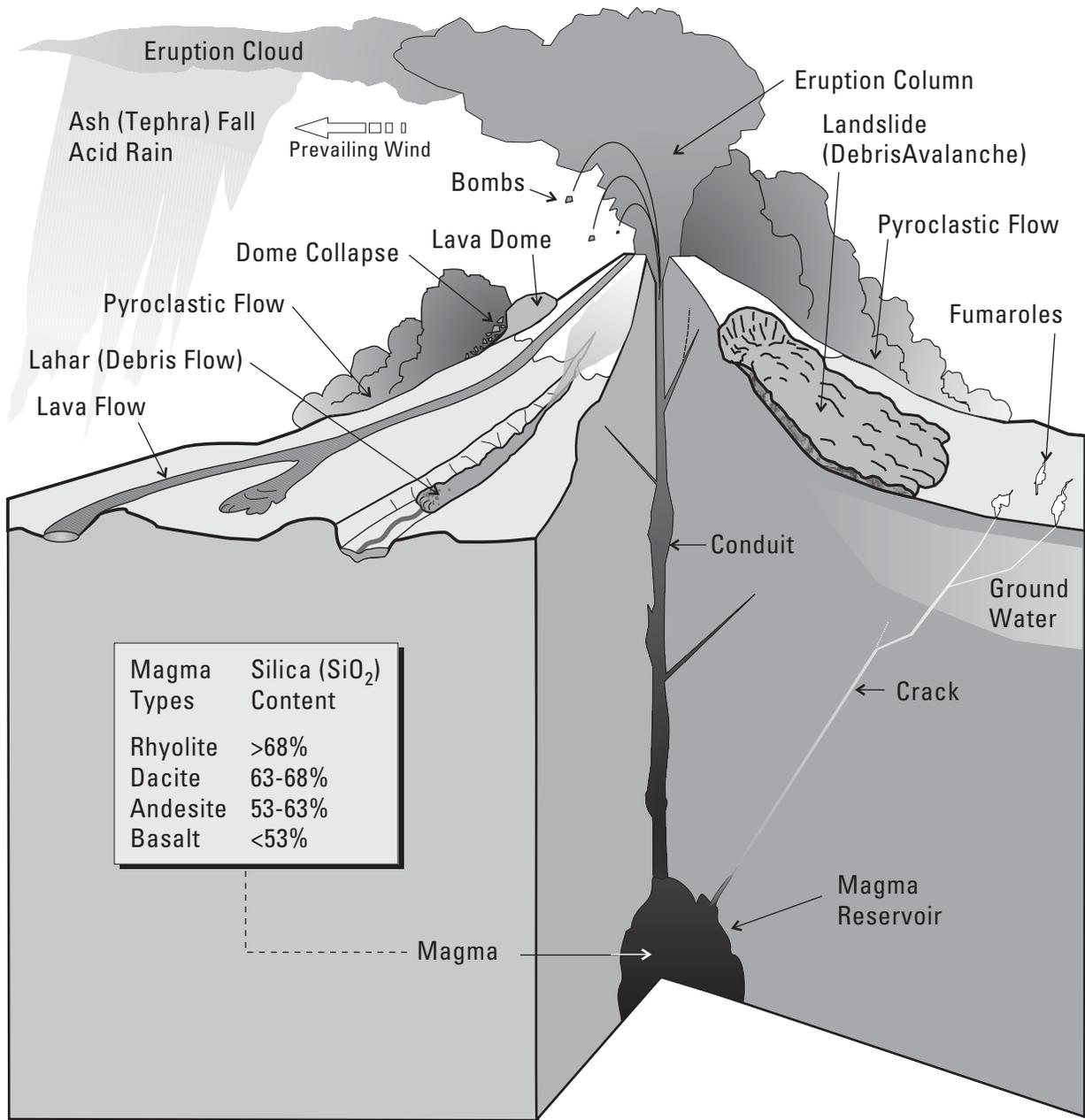


Figure 2. Simplified sketch showing hazardous events associated with volcanoes like San Salvador. Events such as lahars and landslides (debris avalanches) can occur even when the volcano is not erupting. Inset box shows classification of magma types on the basis of silica content. Illustration by Bobbie Meyers, modified from USGS Fact Sheet 002-97.

mayoría de estos eventos son causados por la erupción de roca fundida, o **magma**, pero algunos otros, como las avalanchas de escombros (desprendimientos de tierra) y lahares, pueden ocurrir sin actividad eruptiva. La naturaleza y escala de la actividad eruptiva depende en parte del tamaño y el tipo de volcán, la composición del magma y de las interacciones entre el magma y el agua.

Flujo piroclástico y oleada piroclástica

Las erupciones explosivas pueden producir mezclas de gases calientes y partículas de roca volcánica que son más densas que el aire. Dichas mezclas se comportan como un fluido, permanecen sobre el suelo y fluyen pendiente abajo lejos del volcán. Si la mezcla se compone principalmente de partículas de roca, entonces ésta tiene una densidad elevada y su trayectoria se confinará a las áreas topográficamente bajas, en la medida en que la topografía controle el flujo de agua. Este tipo de flujo denso se denomina **flujo piroclástico**. Sin embargo, si la mezcla se compone principalmente de gas con una pequeña proporción de fragmentos de roca, entonces tendrá una menor densidad y su trayectoria estará menos controlada por la topografía. Este tipo de mezcla rica en gas se denomina **oleada piroclástica**. Los flujos y las oleadas piroclásticas también producen nubes de ceniza que pueden elevarse a miles de metros dentro del aire, arrastrarse a favor del viento y transportar la ceniza a decenas de kilómetros o a una distancia mayor lejos del volcán.

Los flujos y las oleadas piroclásticas con frecuencia se producen al mismo tiempo, siendo ambos fenómenos altamente riesgosos. Se pueden mover a velocidades muy rápidas, de 50 a 150 kilómetros por hora, por lo que el tratar de escapar de su trayectoria es muy difícil o imposible. Las temperaturas en los flujos y oleadas piroclásticas comúnmente son de varios cientos de grados centígrados o incluso más. Debido a su elevada densidad, su enorme velocidad y alta temperatura, los flujos piroclásticos pueden destruir todas las estructuras y matar a todos los seres vivos en su trayectoria debido a los impactos, por incineración o sepultados. Aunque las oleadas piroclásticas son

más diluidas y menos densas que los flujos piroclásticos, las oleadas pueden afectar áreas extensas y aún ser muy destructivas y letales. Las personas y los animales atrapados por las oleadas piroclásticas pueden morir directamente por traumas, quemaduras severas o sofocación.

Los flujos y oleadas piroclásticas han ocurrido a lo largo de toda la historia eruptiva de San Vicente. Los mayores y más extensos flujos piroclásticos se han asociado con erupciones explosivas que ocurrieron antes de la construcción del edificio moderno, quizás hace muchas decenas a cientos de miles de años. Los flujos y oleadas piroclásticas menores han ocurrido en asociación con el flujo de lava y las erupciones del domo de lava. Se han encontrado algunos depósitos de flujo piroclástico a distancias de hasta 15 kilómetros de la cumbre actual del volcán, pero su relación con la historia eruptiva del volcán no es clara.

Flujos de lava y domos de lava

La **lava** es el magma líquido que emana a la superficie de la tierra sin explosiones. Dependiendo de la viscosidad y de la velocidad de la descarga, la lava formará un **domo de lava** en forma de bulbo sobre un escape o un **flujo de lava** que puede viajar varios kilómetros o más pendiente abajo desde la zona de escape. Los flujos de lava comúnmente se mueven pendiente abajo como corrientes de roca fundida con un grosor que va de unos cuantos a decenas de metros. La velocidad a la cual fluye la lava depende principalmente de su composición química. Entre más sílice contenga la lava, más viscosa será y se moverá más lentamente (véase la figura 2). Las lavas basálticas (con un contenido menor al 53% de sílice), del tipo observado en Hawai, pueden moverse rápidamente, unas decenas de metros por minuto, mientras que las lavas andesíticas (con contenidos de sílice que van de aproximadamente el 54 al 61%) del tipo comúnmente encontrado en las erupciones de los volcanes compuestos en San Salvador son más lentas y se mueven unas cuantas decenas de metros por hora. Aunque los flujos de lava pueden ser extremadamente destructivos, típicamente no representan ninguna amenaza para la vida. Las

personas y los animales normalmente pueden caminar fuera de la trayectoria del avance del flujo. Sin embargo, los frentes de los flujos de lava lentos que se mueven a través de pendientes empinadas pueden colapsarse en ocasiones y generar bloques de escombros calientes que caen entonces en cascada pendiente abajo, rompiéndose en partes y formando flujos u oleadas piroclásticas peligrosas y con movimiento rápido.

Los domos de lava pueden representar un riesgo mayor que los flujos de lava. Los domos de lava se forman a partir de lava que es más viscosa que la de los flujos de lava, como resultado de esto pueden aumentar sus dimensiones sobre las pendientes empinadas o hacer formaciones de tierra con flancos empinados. A medida que un domo de lava crece en dimensiones, se vuelve inestable y se colapsa en numerosas ocasiones, además también genera bloques de escombros calientes que caen en cascada pendiente abajo, rompiéndose en partes y formando flujos u oleadas piroclásticas peligrosas y con movimiento rápido.

Los flujos de lava se extienden hacia abajo de todos los flancos de San Vicente, pero no han viajado a más de 7 kilómetros de la cumbre. Los flujos de lava futuros probablemente se confinarán a distancias similares y representarán un riesgo importante para las estructuras desarrolladas y los cultivos agrícolas, pero debido a que se mueven tan lentamente representarán un riesgo menor para la vida humana, a menos que un frente de flujo se colapse y genere una oleada o flujo piroclástico. La ubicación del siguiente flujo de lava en el volcán San Vicente estará determinada por la ubicación y geometría del escape de la erupción en ese momento.

En el volcán San Vicente no se reconocen domos de lava prominentes. Sin embargo, los depósitos de flujo piroclástico con bloques, similares a los asociados con el colapso de los domos de lava en otros volcanes como San Vicente, se encuentran formando capas alternas con los flujos de lava alrededor del volcán, lo cual indica que los domos de lava podrían haberse formado y colapsado durante las erupciones del volcán. Los flujos piroclásticos relacionados a los colapsos de los domos de lava y flujos de lava han viajado al menos 5 kilómetros desde la cumbre del volcán; las oleadas piroclásticas relacionadas al

flujo de lava o colapsos del domo probablemente han viajado más lejos. Los flujos piroclásticos formados por los colapsos del domo o flujos de lava en el volcán San Vicente probablemente produjeron nubes de ceniza que fueron arrastradas a muchos kilómetros lejos del volcán.

Tefra

A medida que el magma emerge de la superficie del volcán, se liberan los gases disueltos en el magma. Si el gas se libera rápidamente entonces el magma puede romperse explosivamente en fragmentos más pequeños y dispersarse en la atmósfera. Los fragmentos provenientes de dichas erupciones, con un intervalo que va desde ceniza microscópica hasta bloques de varios metros, se denominan en conjunto como **tefra**. Las tefras forman depósitos que cubren áreas extensas, a favor del viento, desde un volcán. El grosor y tamaño de partículas de un depósito generalmente disminuye entre mayor sea la distancia desde la zona de escape, sin embargo, un depósito puede cubrir áreas extensas de decenas a cientos de kilómetros desde su fuente. Los fragmentos más grandes, denominados **proyectiles balísticos**, caen a tierra a distancias de unos cuantos kilómetros de la zona de escape.

Las caídas de tefra raras veces amenazan directamente a la vida, excepto dentro de unos cuantos kilómetros desde un escape. Los fragmentos balísticos más grandes son capaces de causar la muerte o daños por impacto. Los proyectiles más grandes también pueden permanecer calientes cuando aterrizan e iniciar incendios si caen sobre materiales combustibles. La mayoría de los daños y fatalidades provenientes de las caídas de tefra ocurren cuando las acumulaciones de tefra son considerables o están saturadas por la lluvia, y por ello tienen el peso suficiente como para colapsar los techos de las construcciones. La tefra fina suspendida en el aire puede causar irritación en los ojos y en el sistema respiratorio además de exacerbar los problemas pulmonares, especialmente en los ancianos y los niños.

Los efectos indirectos de las caídas de tefra pueden quizás ser más dañinos que los efectos directos ocasionados por las mismas. Incluso las acumulaciones más delgadas de las caídas de tefra pueden afectar de manera significativa las actividades sociales y económicas en regiones extensas. Los penachos de tefra pueden crear oscuridad durante varias decenas de minutos o incluso más tiempo, aún en días soleados, además las caídas de tefra pueden reducir la visibilidad y la maniobrabilidad en las carreteras. La tefra que ingresa a los motores de los vehículos puede bloquear los filtros y aumentar el desgaste. Los depósitos de tefra pueden ocasionar cortos circuitos o cortes eléctricos en los transformadores y líneas de potencia, especialmente si la tefra se encuentra húmeda, pegajosa y pesada. La tefra puede contaminar los suministros de agua potable superficial, puede bloquear los sistemas de drenaje sanitarios y para aguas de lluvia, además de obstruir los canales de irrigación. Incluso las acumulaciones de tefra delgadas pueden arruinar los cultivos sensibles. Un peligro serio potencial de la tefra proviene de la amenaza de que incluso las nubes de tefra más diluidas y con las partículas más pequeñas pueden obstruir el sistema propulsor de las naves aéreas cuando éstas vuelan dentro de dichas nubes. El ingreso de incluso pequeñas cantidades de tefra de pequeñas dimensiones dentro de los motores de propulsión puede causar en ellos un mal funcionamiento y la pérdida de potencia.

Las lecciones aprendidas de la erupción, en 1980, del Monte Santa Helena en los Estados Unidos pueden ayudar a los gobiernos, empresas y ciudadanos a prepararse para futuras caídas de tefra. Las comunidades a favor del viento del Monte Santa Helena experimentaron daños significativos en el transporte, la actividad comercial y en los servicios con caídas de tefra de únicamente 5 milímetros. Entre mayor sea la cantidad de la caída de tefra, más tiempo le tomará a las comunidades recuperarse. Tal como lo percibieron los residentes, las caídas de tefra de menos de 5 milímetros fueron las que presentaron inconvenientes importantes, mientras que las de más de 150 mm constituyeron un desastre. No obstante, todas las comunidades a favor del viento afectadas por el Monte Santa Elena recuperaron

sus actividades normales dos semanas después del evento.

El complejo del volcán San Vicente, produjo en una ocasión depósitos voluminosos y amplios de caídas de tefra en su historia eruptiva. Estos depósitos de caída de tefra se asocian con una serie de erupciones explosivas importantes que ocurrieron hace menos de un millón de años, pero antes de la construcción del edificio moderno. Desde entonces, el volcán San Vicente no ha tenido erupciones amplias de tefra. Por lo contrario, se han producido cantidades modestas de tefra durante las erupciones del domo de lava y flujo de lava. La mayoría de las caídas de tefra alrededor del volcán han provenido de nubes de arena y partículas del tamaño de limo provenientes de los flujos piroclásticos en movimiento producidos quizás por el colapso del domo de lava. Dichas nubes de tefra probablemente alcancen varios miles de metros en el aire y sean arrastradas en dirección del viento. Dependiendo de las direcciones del viento al momento de una erupción, los futuros flujos de lava y erupciones del domo de lava en San Vicente podrían producir nubes de tefra que afectarían a las comunidades de San Vicente, Tepetitán, Tecoluca y Zacatecoluca, entre otras. Sin embargo, las caídas de tefra provenientes de estos tipos de erupciones representan una amenaza menor para la vida o estructuras en las comunidades cercanas.

Gases volcánicos

Todos los magmas contienen gases que se liberan durante y entre erupciones. Los gases volcánicos constan principalmente de vapor pero también contienen dióxido de carbono y compuestos de azufre y cloro, además de cantidades menores de otros gases diversos.

Generalmente, los gases volcánicos se diluyen rápidamente a favor del viento desde el escape, pero dentro de unos cuantos kilómetros de un escape pueden poner en peligro la vida y la salud si las concentraciones son elevadas y la exposición es prolongada. Los ojos y los pulmones de las personas y los animales pueden verse dañados por los ácidos, amoníaco y otros compuestos. Las personas y los animales pueden sofocarse en los

gases más densos que el aire como los de dióxido de carbono, que quedan atrapados y se acumulan en las depresiones cerradas.

Los mayores riesgos provienen directamente de los gases emitidos por el volcán San Vicente probablemente queden confinados al cráter de la cumbre y así ser motivo de preocupación para aquellos que trabajan o se recrean dentro del cráter. Fuera del cráter de la cumbre, los riesgos directos provenientes de los gases volcánicos probablemente sean menores.

Un riesgo más amplio, pero indirecto, proveniente de los gases volcánicos emitidos por el volcán San Vicente involucra la formación de lluvia ácida. Los compuestos de azufre son uno de los principales gases emitidos por los volcanes, por lo que una acidificación excesiva de la lluvia puede ocurrir cuando los compuestos de azufre se combinan con las gotas y el vapor de agua para formar ácido sulfúrico el cual se deposita durante las tormentas. Si dicho ácido se encuentra lo suficientemente concentrado puede dañar los cultivos, reducir la productividad de la tierra y contaminar el agua superficial. En El Salvador, la lluvia ácida resultante de la emisión de los gases volcánicos ha dañado localmente los cultivos de café, particularmente alrededor del volcán Santa Ana [2].

Avalancha de escombros, desprendimientos de tierra y lahar

Las pendientes de un volcán podrían volverse inestables y caer catastróficamente, generando un **desprendimiento de tierra** que se mueve rápidamente, denominado **avalancha de escombros**. La inestabilidad de la pendiente en los volcanes puede estar provocada por numerosos factores. El magma que se eleva hacia arriba a través de un volcán puede empujar a la roca volcánica anterior y deformar 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 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. Las pendientes de un volcán también pueden caer sin

una acción directa del magma. Los temblores inesperados, las lluvias torrenciales o las explosiones de vapor pueden provocar fallas en la pendiente, sin embargo estas fallas comúnmente son de menor volumen que las de la intrusión magmática. 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. Las avalanchas de escombros de volúmenes pequeños viajan típicamente solo unos cuantos kilómetros desde su fuente, sin embargo las avalanchas de escombros de gran volumen pueden viajar decenas de kilómetros desde el volcán. Las avalanchas de escombros destruyen todo lo que encuentran en su trayectoria y dejan depósitos con grosores que van de los 10 metros y hasta más de 100 metros en la superficie de los valles.

Los depósitos de al menos una avalancha de escombros de grandes dimensiones se han reconocido al sureste de San Vicente, en la vecindad de Tecoluca, lo cual sugiere que un gran segmento del volcán se colapsó al menos en una ocasión en un desprendimiento de tierra masivo prehistórico. La extensión total de esta avalancha y su lahar asociado no se conoce con precisión, pero parece haber alcanzado el Río Lempa, a 25 kilómetros del volcán.

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. Éstos se producen cuando el agua mueve grandes volúmenes de lodo, roca y escombros volcánicos flojos. Comúnmente los desprendimientos de tierra y las avalanchas de escombros se convierten en lahares a medida que se mueven valle abajo. 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. Los lahares siguen los valles de los ríos y dejan un depósito de arena lodosa y cascajo que puede alcanzar grosores que van de unos cuantos metros a decenas de metros. Los lahares son particularmente riesgosos debido a que viajan

mucho más lejos de un volcán que cualquier otro fenómeno de riesgo con excepción de la tefra, además de que afectan los valles principales en donde los asentamientos humanos son más grandes. En algunos casos los desprendimientos de tierra y los lahares pueden obstruir un canal o bloquear un canal tributario y embalsar un lago detrás del bloqueo. Comúnmente, el agua embalsada puede derramarse sobre el bloqueo, cortando rápidamente un canal, drenando de manera catastrófica el lago y generando una inundación que se mueve valle abajo poniendo en peligro a las personas y sus propiedades. El rompimiento del bloqueo puede ocurrir en unas horas o meses después del embalsado.

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 en periodos de tiempo de centurias o milenios. La dimensión de los lahares está controlada tanto por la cantidad de agua como del sedimento flojo o 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. Las avalanchas de escombros o erupciones de pequeñas dimensiones producen lahares también pequeños. Se han encontrado depósitos de lahares antiguos en varios canales alrededor del volcán San Vicente, lahares y desprendimientos de tierra históricos, con volúmenes de más de 100,000 metros cúbicos, han caído desde las pendientes superiores más empinadas del volcán viajando más de 6 kilómetros desde sus fuentes [1].

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 rápida 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. En general, la gente que vive en las áreas bajas a lo largo de los valles del río es más susceptible a estas afectaciones secundarias provenientes de los desprendimientos de tierra y lahares, sin embargo en las tierras más elevadas adyacentes a los canales del río, aparentemente a salvo de inundaciones, pueden encontrarse amenazadas 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 [3].

EVENTOS ANTERIORES EN EL VOLCÁN SAN VICENTE

Se conocen muy poco los detalles de la historia eruptiva del volcán San Vicente. La erupción significativa más reciente ocurrió hace más de 1700 años, ocurriendo quizás antes de la habitación humana permanente del área (~2000 A.C.). No obstante, sabemos que un complejo volcánico en San Vicente tiene una historia que se extiende más de dos millones de años, además de que ha exhibido erupciones altamente explosivas así como el emplazamiento de los flujos de lava y domos de lava.

Los estudios previos reconocen la existencia de al menos tres etapas de la evolución del volcán San Vicente [1]. Las rocas más antiguas en San Vicente tienen entre uno a dos millones de años y se encuentran asociadas con una serie de colinas pronunciadas que descansan inmediatamente al oeste-noroeste del volcán. Estas colinas delinean el límite de una característica anular que se piensa son remanentes de un centro volcánico antiguo, conocido como La Carbonera. Los flujos de lava extruídos a lo largo de cientos de miles de años construyeron el complejo de La Carbonera.

En algún momento hace aproximadamente un millón de años, un emplazamiento relativamente tranquilo de lavas andesíticas y basálticas en el ancestral centro volcánico de La Carbonera se vio interrumpido por una fase de actividad explosiva importante. La fase eruptiva explosiva produjo flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas y caídas de tefra de gran grosor. Los depósitos de esta fase explosiva de la actividad, son ricos en **pómez** dacita, un fragmento ligero y esponjoso de la explosión de magma que tiene un contenido de sílice de entre 63 al 68%, lo cual indica que el magma rico en gas provocó una intrusión dentro del volcán e hizo erupción de manera violenta. Los primeros depósitos de esta fase de actividad están separados de los depósitos posteriores por un **paleosol** de gran grosor y bien desarrollado, que es un horizonte de arena enterrado, lo cual indica que la fase explosiva se extendió por muchos miles de años. Las composiciones, texturas y distribuciones de algunos depósitos de oleadas y tefra sin pómez dentro de la secuencia de los depósitos relacionados con esta fase explosiva de la actividad indican que algunas explosiones fueron **freatomagnéticas** e involucraron interacciones de magma y agua. La duración de esta fase explosiva de la actividad se desconoce. El desarrollo de un par de paleosoles bien desarrollados y de gran grosor dentro de esta secuencia de depósitos, así como la construcción del moderno volcán San Vicente después de que terminó esta fase eruptiva explosiva, sugieren que este periodo de actividad explosiva ocurrió hace muchas decenas a cientos de miles de años atrás.

El moderno volcán San Vicente se construyó después de la fase de actividad explosiva. Su edificio consiste de dos conos prominentes compuestos principalmente de flujos de lava de andesita. Con base en su morfología, el cono más al este parece ser el más joven, lo cual sugiere que el foco de actividad volcánica en este centro ha migrado del este al noreste con el paso del tiempo. Los depósitos locales de flujos piroclásticos sin pómez formaron capas alternas con los flujos de lava, lo cual sugiere que la construcción del moderno edificio incluyó el crecimiento y colapso de los domos de lava de volúmenes más pequeños.

Los movimientos máxicos del sedimento proveniente del volcán debido a desprendimientos de tierra, lahares y flujos piroclásticos, además de

la remoción del sedimento debido al flujo de la corriente, han formado una falda de escombros que se ha acumulado en la base del volcán. De particular importancia es un depósito extenso semejante a un lahar al sureste del volcán, el cual contiene muchas colinas pequeñas, compuestas de roca volcánica y escombros, conocidos como montículos. El depósito, que se encuentra en las cercanías y al sureste de Tecoluca, se extiende al menos a distancias tan lejanas como el Río Lempa, a 25 kilómetros del volcán, además de que representa una avalancha de escombros y el lahar asociado resultado del colapso de un segmento masivo del volcán.

La mayoría de los depósitos en la placa de escombros acumulada en la base del volcán probablemente tengan muchos miles de años. Estos se encuentran comúnmente erosionados y cubiertos por un horizonte de tierra bien desarrollado, además de que están cubiertos por el depósito Tierra Blanca Joven (TBJ), el depósito de tefra más reciente proviene de una erupción de la caldera Ilopango. El depósito TBJ tiene más de 1700 años [4].

Aunque no existió actividad eruptiva histórica en el volcán San Vicente, han ocurrido en varias ocasiones eventos letales o potencialmente letales ocasionados por el volcán. Se sabe que ocurrieron desprendimientos de tierra y lahares provocados por temblores y lluvias torrenciales en 1774, 1934, 1996 y 2001 [1]. Podrían haber ocurrido otros en el periodo histórico, pero éstos no se encuentran registrados. El lahar de 1774 ocurrió en el flanco nordeste del volcán y afectó al pueblo de San Vicente. El lahar de 1934 ocurrió en el flanco norte del volcán y destruyó el pueblo de Tepetitán, a más de 6 kilómetros de la cumbre del volcán. Los desprendimientos de tierra y lahares sobre el flanco sur del volcán en 1996 dañaron la carretera principal entre Tecoluca y Zacatecoluca. Los desprendimientos de tierra provocados por un temblor en Febrero del 2001 ocurrieron en los flancos norte y noroeste del volcán, pero no se transformaron en lahares que fluyeran hacia valle abajo. Sin embargo, estos desprendimientos de tierra descargaron más de 200,000 metros cúbicos de sedimento dentro de los canales que drenan al volcán, además, la potencial remoción de este sedimento representa un riesgo creciente

proveniente de las inundaciones destructivas y lahares para las comunidades aguas abajo de Guadalupe y Tepetitán. En Septiembre de 2001, un lahar ocasionado por una lluvia torrencial se formó en el flanco noroeste del volcán, el cual se formó posiblemente del material removido por el temblor de Febrero de 2001, el cual dañó el pueblo de Guadalupe.

ACTIVIDAD FUTURA EN EL VOLCÁN SAN VICENTE

Aunque el volcán San Vicente carece de una actividad eruptiva histórica y se conoce muy poco su historia eruptiva, los vigorosos brotes de agua caliente y el desarrollo geotérmico ubicado al lado norte del volcán sugieren que las erupciones pasadas son tan recientes que el sistema volcánico mantiene el calor residual de las fuentes magmáticas. Como resultado, el volcán debe considerarse como activo y probablemente hará erupción nuevamente.

Considerando la actividad eruptiva del pasado, la actividad eruptiva a futuro en el volcán San Vicente es más probable que involucre el emplazamiento de flujos de lava, y el crecimiento y colapso de domos de lava de volumen pequeño. El colapso de los domos de lava generará flujos y oleadas piroclásticas pequeñas que pueden viajar varios kilómetros más allá de la base del volcán. La caída de tefra asociada con dichos eventos eruptivos podría viajar a 10 kilómetros o más del volcán. Sin embargo el volcán ha hecho erupción violentamente en el pasado y podría hacerlo de nuevo en el futuro. Las erupciones explosivas son más peligrosas que aquellas que emplazan flujos de lava o domos de lava. Las erupciones explosivas pueden producir flujos y oleadas piroclásticas de grandes dimensiones que afectan simultáneamente múltiples sectores del volcán, así como producir caídas de tefra y lahares que podrían afectar áreas de más de 10 kilómetros desde el volcán. Los desprendimientos de tierra y lahares, iniciados por alguno de los diversos mecanismos, pueden ocurrir sobre cualquier flanco del volcán.

Aunque el volcán ha hecho erupción violentamente en el pasado, aparentemente no lo

ha hecho nuevamente desde que se construyó el presente cono. Debido a que han transcurrido miles de años desde la última erupción significativa, es difícil hacer un pronóstico del tipo de las erupciones futuras. Si la actividad volcánica precursora, como el incremento de la actividad sísmica dentro del cono, el aumento en la emisión de gas y la deformación del edificio, se detectan en el volcán San Vicente podría ser prudente anticipar la actividad explosiva al inicio de una erupción.

Los eventos de mayor magnitud que es posible que se presenten en el volcán San Vicente tienen probabilidades anuales muy bajas, pero si ocurren tendrán consecuencias bastante serias. Aunque no se garantiza la preparación para estos eventos raros, no obstante es prudente la comprensión de los escenarios en estos casos potencialmente extremos. Como lo demostró la erupción catastrófica en 1980 de Monte Santa Helena en los Estados Unidos, pueden ocurrir dos tipos de eventos de riesgo a gran escala en volcanes semejantes al San Vicente – un lahar o desprendimiento de tierra de grandes dimensiones y un derribe mayor dirigido (un tipo de flujo piroclástico bastante móvil). Las zonas de riesgo para dichos eventos catastróficos se muestran en el mapa de zonas de riesgo adjunto (ilustración 1).

Los principales efectos de las futuras erupciones o desprendimientos de tierra en San Vicente probablemente se confinarán dentro de aproximadamente 10 kilómetros alrededor de la cumbre del volcán. Sin embargo, los lahares de grandes dimensiones podrían viajar a más de 10 kilómetros de la cumbre, además de que la caída de tefra podría arrastrarse a más de 10 kilómetros a favor del viento.

Los patrones de viento de nivel superior en Guatemala a altitudes de entre 3000 a 15,000 metros de altura dependen enormemente de las estaciones del año [5]. 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 [5]. Por lo tanto, todos los sectores alrededor del volcán San Vicente pueden verse afectados por las caídas de tefra, sin embargo es más probable que algunas áreas se vean más afectadas que otras dependiendo de la estación del año en la cual ocurre la erupción.

Los principales efectos de las erupciones y desprendimientos de tierra son serios, pero los efectos secundarios pueden ser asimismo severos, pueden afectar áreas más allá de la zona del impacto principal además de que pueden persistir por varios años. Dichos efectos secundarios, que se asocian principalmente con el sedimento depositado en los canales de los ríos por los desprendimientos de tierra y lahares, involucran la remoción y redistribución del sedimento, la erosión de la ribera, la pérdida de la capacidad del canal además de agudizar los riesgos de inundaciones en las áreas bajas. Los efectos secundarios que pueden ocurrir como secuelas de una erupción del volcán San Vicente o un desprendimiento de tierra apreciable pueden afectar áreas a muchas decenas de kilómetros aguas abajo del volcán.

EVENTOS EN OTROS VOLCANES QUE PUEDEN AFECTAR LA REGIÓN DE SAN VICENTE

El volcán San Vicente no es la única fuente de riesgos volcánicos en la región. Los eventos volcánicos más devastadores que han afectado a la región de San Vicente se relacionan a las erupciones explosivas de mayores dimensiones

provenientes de la caldera Ilopango, la cual se ubica al oeste de San Vicente (figura 1). Cuatro erupciones explosivas de esta caldera ocurridas en el pasado, hace unos 40,000 a 50,000 años [4] han dejado depósitos de caídas de tefra y flujos piroclásticos que tienen varios metros de grosor en la región de San Vicente. Los depósitos de las erupciones explosivas más recientes provenientes de Ilopango, la unidad regional Tierra Blanca Joven (TBJ), se fechan en el año 260 D.C. [4]; estos depósitos además se extienden varios kilómetros al este del volcán San Vicente hasta varios kilómetros al oeste del volcán San Salvador (figura 1). Dichas erupciones catastróficas de grandes dimensiones en Ilopango ocurrieron aproximadamente una vez cada 10,000 a 15,000 años durante los pasados 40,000 a 50,000 años, de tal modo que la probabilidad anual de otra erupción de esta magnitud en Ilopango es muy baja. Dependiendo de la estación del año y de las direcciones de los vientos prevalecientes, la tefra proveniente de las erupciones de otros volcanes, como el Santa Ana, San Salvador y San Miguel (figura 1), por ejemplo, podrían afectar la región de San Vicente.

El Cerro Ramírez es un volcán pequeño que se formó en el flanco nordeste más bajo del volcán San Vicente cerca del pueblo de San Vicente. Se sabe muy poco acerca del volcán, pero la actividad eruptiva futura en este sitio representarán un riesgo significativo para las poblaciones locales, particularmente para el pueblo de San Vicente.

Sobre el lado nor-nordeste del volcán San Vicente descansa el campo volcánico Apastepeque, una acumulación densa de aproximadamente 25 volcanes pequeños contenidos dentro de un área de aproximadamente 65 kilómetros cuadrados [1]. Estos volcanes consisten de domos pequeños, conos de ceniza volcánica y cráteres de explosión. Las erupciones de estos volcanes son similares a los de los volcanes monogenéticos pequeños que circundan al volcán San Salvador, e incluye la expulsión explosiva de tefra, flujos de lava y posiblemente flujos y oleadas piroclásticas. Las futuras erupciones del campo volcánico Apastepeque pueden producir caídas de tefra que se acumulen en capas delgadas sobre las comunidades, principalmente al norte del volcán San Vicente.

MAPA DE ZONAS DE RIESGO VOLCÁNICO

Debido a que se conocen muy poco los detalles de las erupciones del pasado en San Vicente, nos apoyamos en información acerca de los efectos y consecuencias de las erupciones provenientes de los volcanes alrededor del mundo similares al volcán San Vicente para obtener una idea de los posibles escenarios y riesgos de erupción. Este es un método razonable debido a que ocurren tipos similares de eventos en muchos volcanes, pero incluso aunque pudiesen ocurrir tipos exactos de estos eventos, sus dimensiones y frecuencias relativas variarán entre los diferentes centros volcánicos.

El mapa anexo de las zonas de riesgo del volcán (ilustración 1) muestra las áreas que podrían verse afectadas por futuros eventos geológicos de riesgo en el volcán Vicente. Los eventos individuales afectan típicamente sólo a una parte de la zona de riesgo. La ubicación y dimensiones de un área afectada dependerá de la localización de un escape eruptivo o un desprendimiento de tierra, el volumen de material involucrado y el carácter de una erupción, especialmente su grado de explosión.

Las áreas potencialmente peligrosas alrededor del volcán San Vicente se dividen en zonas de riesgo lahar y volcánico proximal dependiendo principalmente del tipo de riesgo. Las zonas de riesgo de lahar se subdividen a su vez con base en su grado de riesgo relativo en lahares de varios volúmenes. Los límites de la zona de riesgo se determinan con base en (1) la magnitud de los eventos pasados del volcán, tal como se han inferido a partir de los depósitos; (2) los modelos matemáticos que utilizan calibraciones de otros volcanes para predecir la magnitud más probable de los lahares y (3) nuestra experiencia y juicios derivados de las observaciones y comprensión de estos eventos en volcanes similares.

Aunque mostramos límites fijos para las zonas de riesgo, la frontera de las zonas de riesgo no termina repentinamente en estos límites. Más bien, el riesgo disminuye gradualmente a medida que aumenta la distancia al volcán; para los lahares 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 del riesgo pueden ubicarse únicamente de manera aproximada, especialmente en áreas de relieves bajos. La incertidumbre existente con respecto a la fuente, dimensiones y movilidad de los futuros eventos 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 de riesgo sujetas a desprendimientos de tierra y lahares provenientes del volcán San Vicente. El volcán presenta incisiones extensas por lo que los desprendimientos de tierra pueden ocurrir en cualquier drenado. Para este reporte hemos definido zonas de inundación a partir de lahares de varios volúmenes para los canales más importantes que se dirigen a las áreas pobladas. Otros canales para los cuales no hemos modelado la inundación por lahares no deben considerarse como áreas libres de riesgos. Los desprendimientos de tierra y lahares provenientes de otros canales no mostrados en el mapa podrían asimismo amenazar la vida y la propiedad de los pobladores.

Zona de riesgo volcánico proximal

La zona de riesgo volcánico proximal incluye áreas que rodean inmediatamente al volcán San Vicente, que se extiende alrededor de 8 a 10 kilómetros desde la cumbre dependiendo de la topografía local [6]. Esta zona delinea las áreas sujetas a los fenómenos volcánicos devastadores incluyendo flujos y oleadas piroclásticas, avalanchas de escombros, flujos de lava y balísticos. Debido a la elevada velocidad y capacidad de destrucción de muchos de estos fenómenos, poder escapar o sobrevivir a ellos es poco probable en la zona de riesgo proximal. Por ello la evacuación de estas zonas de riesgo durante los periodos de actividad del volcán es una solución realista y la única forma de proteger la vida de los pobladores. Es muy probable que las avalanchas de escombros y lahares que se originen en el área proximal, además de los depósitos provenientes de desprendimientos y flujos con volúmenes menores a unos 500,000 metros

cúbicos, se restrinjan a esta zona. Las avalanchas de escombros y lahares de grandes dimensiones viajarán más allá del volcán y fluirán sobre las tierras bajas adyacentes. La extensión de la inundación de los lahares de varios volúmenes es la base para la definición de las zonas de riesgo para los lahares.

Zonas de riesgo lahar

Las zonas de riesgo de lahar descansan principalmente a lo largo de los canales que drenan al volcán San Vicente. Dependiendo de la distancia al volcán, estas áreas 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.

Utilizamos una técnica matemática calibrada con datos provenientes de otros volcanes [7] para estimar las áreas potenciales de inundación por parte de los lahares de varios volúmenes. Para cada canal analizado, definimos cuatro zonas de riesgo anidadas que describen la inundación de manera anticipada por medio de un diseño hipotético de los lahares que tienen diferentes volúmenes. 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 Vicente [7]. También hemos definido una zona de riesgo que describe la inundación anticipada por lahares con volúmenes mayores a los 100 millones de metros cúbicos. Un lahar de estas dimensiones refleja nuestra estimación de la avalancha de escombros más grande que podría descender repentinamente del volcán San Vicente [7]. Una avalancha de escombros de este tamaño requiere de una falla catastrófica de una gran parte del volcán, seguida de una transformación completa de la avalancha en un lahar. Un evento de este tipo puede ocurrir junto con la actividad volcánica, como la intrusión de magma dentro del edificio, el cual podría detectarse por medio de la supervisión adecuada.

Sin embargo, la posibilidad de fallas prominentes en el flanco podría iniciarse por mecanismos distintos a la intrusión de magma, como el debilitamiento de la roca por la alteración hidrotérmica, los temblores fuertes o lluvias torrenciales, los cuales no pueden desestimarse. En general, los desprendimientos de tierra y lahares iniciados por mecanismos distintos a la actividad volcánica probablemente tengan volúmenes menores a un millón de metros cúbicos.

Los diseños de lahar intermedios (300,000 a 500,000 metros cúbicos) y los más pequeños (100,000 metros cúbicos) son volúmenes de lahar más típicos para una erupción de pequeña a moderada o para un desprendimiento de tierra que ocurre sin señales de advertencia. Los lahares de estos tamaños se han presentado históricamente en San Vicente, los lahares de estos tamaños y más pequeños son los que tienen mayor probabilidad de presentarse de nuevo.

El que se presenten lahares de grandes dimensiones es menos probable que los lahares más pequeños. Así, las zonas de riesgos de lahar anidadas muestran que la probabilidad de una inundación lahar disminuye a medida que aumenta la distancia al volcán y la elevación por encima del piso del valle. Es muy difícil estimar la probabilidad anual de los lahares de varios tamaños. Se desconocen las edades y extensión de los lahares que tienen volúmenes de un millón de metros cúbicos o más desde San Vicente, sin embargo los lahares de este tamaño probablemente tienen una probabilidad anual menor que 1 en 50,000 a 1 en 10,000 sobre la base del desarrollo de la tierra sobre dichos depósitos [8]. Los desprendimientos de tierra y lahares de menor tamaño iniciados por temblores de tierra o lluvias torrenciales son más probables pero únicamente inundarían partes de las zonas de riesgo, del diseño, adyacentes a los canales de la corriente. Los lahares de aproximadamente 500,000 metros cúbicos o menos podrían tener una probabilidad anual cercana a 1 en 50, o quizás tan grande como 1 en 10 [8].

En general, las zonas de riesgo lahar se encuentran dentro de los primeros 10 kilómetros desde el cráter de la cumbre y caen la mayor parte de las veces dentro de la zona de riesgo volcánico

proximal. La zona de riesgo para el diseño de lahar de mayor volumen, de 100 millones de metros cúbicos, representa una falla catastrófica y masiva en el flanco, que se extiende a distancias de hasta 25 kilómetros desde el cráter de la cumbre y cubre ampliamente el área que rodea el volcán. La topografía local juega un papel preponderante en el control del recorrido del lahares de menor tamaño. 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 aplanan 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 se asocian con los canales con incisiones profundas en los cuales los lahares quedan confinados, particularmente a lo largo de la mitad norte de la región de San Vicente. A pesar de sus relativamente cortas distancias de recorrido, incluso los lahares más pequeños podrían ser devastadores. Todas las comunidades importantes cercanas al volcán se ubican dentro del área de 10 kilómetros desde la cumbre. Nuestro resultado sugiere que las comunidades ubicadas generalmente del noroeste al noreste del volcán San Vicente presentan un gran riesgo derivado de las inundaciones por lahares. Sin embargo, varias comunidades pequeñas y plantaciones de café se ubican en los flancos bajos del volcán, además, las zonas de riesgo de incluso los lahares más pequeños se extienden bastante dentro de las áreas que ahora se utilizan para asentamientos humanos o para la agricultura.

ADVERTENCIAS Y PRONÓSTICOS DE RIESGO

Los científicos normalmente pueden reconocer y vigilar varios indicadores de erupciones volcánicas inminentes. El magma que emerge dentro del volcán antes de una erupción puede provocar cambios que usualmente son detectados por varios instrumentos geofísicos y por medio de observaciones visuales. Se generan grupos de pequeños temblores a medida que se rompe la roca para dejar espacio para el magma emergente o a

medida que el calentamiento de los fluidos incrementa la presión subterránea. El calor proveniente del magma puede aumentar la temperatura del agua interior y elevar la temperatura de los brotes de agua caliente y el vapor proveniente de las fumarolas; asimismo pueden generar explosiones de vapor de tamaño reducido. La composición y volumen de los gases emitidos por las fumarolas pueden cambiar a medida que el magma se acerca a la superficie, además que la inyección de magma dentro del volcán puede causar hinchamientos u otros tipos de deformación superficial.

El Salvador tiene una red sísmica nacional, de modo que un grupo significativo de temblores en el volcán San Vicente podría notarse rápidamente. En otros volcanes similares a San Vicente, ha ocurrido un aumento significativo en la actividad sísmica días o meses antes de las erupciones. Un aumento en la actividad sísmica cerca del volcán podría activar la colocación inmediata de sismómetros adicionales para ubicar mejor los temblores y estimular otros esfuerzos de vigilancia para examinar los signos de la actividad volcánica.

Los periodos de actividad volcánica producen tiempos de gran incertidumbre. Durante las pasadas décadas se han efectuado avances sustanciales en la supervisión del volcán y pronósticos de erupción, pero todavía los científicos sólo pueden realizar afirmaciones muy generales con respecto a la probabilidad, tipo y escala de una erupción inminente. La actividad precursora puede pasar por fases de aceleración y desaceleración y en ocasiones puede agotarse sin una erupción. Los funcionarios gubernamentales y la población deben estar consientes de las limitaciones en el pronóstico de las erupciones y deben estar preparados para enfrentar dicha incertidumbre.

A pesar de los avances en la supervisión del volcán y del pronóstico de las erupciones, todavía es difícil sino es que imposible, predecir de manera precisa que sucedan desprendimientos de tierra iniciados por temblores o lluvias torrenciales. Por ello, los funcionarios gubernamentales y la población necesitan identificar la ubicación de las zonas de riesgo de lahar y estar consientes de los eventos letales potenciales que pueden presentarse en estas zonas

de riesgo con pocas o ninguna señal de advertencia.

PROTECCIÓN A LAS COMUNIDADES Y CIUDADANOS EN CONTRA DE LOS RIESGOS RELACIONADOS AL VOLCÁN

Las comunidades, negocios y ciudadanos deben efectuar planes por adelantado para mitigar los efectos de futuras erupciones volcánicas, desprendimientos de tierra y lahares provenientes del volcán San Vicente. Los esfuerzos de mitigación a largo plazo deben incluir el uso de información acerca de los riesgos del volcán cuando se toman decisiones con respecto al uso del suelo y el establecimiento de las instalaciones críticas. 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.

Cuando los volcanes amenazan con hacer o hacen erupción, se necesita una respuesta rápida y perfectamente bien coordinada. Esta respuesta será más efectiva si los ciudadanos y funcionarios públicos tienen una comprensión básica de los riesgos del volcán y han planeado las acciones necesarias para proteger a las comunidades.

Debido a que una erupción volcánica puede ocurrir unos días o meses después de la primera actividad precursora y debido a que algunos eventos de riesgo, tales como lahares o desprendimientos de tierra, pueden ocurrir sin advertencias, se deben establecer por adelantado los planes de emergencia apropiados. Aunque han transcurrido más de 2000 años desde la última erupción significativa del volcán San Vicente y se desconoce cuando podría volver a hacer erupción, los funcionarios públicos necesitan considerar aspectos como la educación pública, la planeación del uso del suelo, las estrategias de advertencia y comunicación así como las evacuaciones como parte de su plan de respuesta. Los planes de emergencia ya desarrollados para las inundaciones pueden aplicarse en alguna medida, pero necesitan modificaciones para los riesgos derivados de los lahares. En el caso de

evacuaciones, 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 un volcán. 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. Todos los riesgos volcánicos descritos en este reporte son serios, además de que muchos y distintos fenómenos de riesgo podrían afectar un área que se extiende a una distancia de unos 10 kilómetros desde la cumbre del volcán San Vicente. Los lahares son la mayor amenaza para la gente que vive, trabaja o se recrea a lo largo de los canales que drenan al volcán San Vicente. 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 20 metros por encima del nivel del río. El volcán de San Vicente hará erupción de nuevo y la mejor manera de enfrentar las futuras erupciones 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.
- Brauer, J., Smith, J., and Wiles, V., 1995, On your own in El Salvador: On Your Own Publications, Portland, OR, 260 p.
- Hart, W.J.E., and Steen-McIntyre, V., 1983, Tierra Blanca Joven tephra from the A.D. 260 eruption of Ilopango caldera, in Sheets, P.D., ed., *Archaeology and Volcanism in Central America*: University of Texas Press, Austin, p. 14-34.

Hayashi, J.N., and Self, S., 1992, A comparison of pyroclastic flow and debris avalanche mobility: *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 9063-9071.

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.

Malin, M.C., and Sheridan, M.F., 1982, Computer-assisted mapping of pyroclastic surges: *Science*, v. 217, p. 637-640.

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.

Romano, L., 1997, Catálogo de desastres, accidentes y ecología (1915-1990): Centro de Protección de Desastres.

Rose, W.I., Conway, F.M., Pullinger, C.R., Deino, A., and McIntosh, W.C., 1999, An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America: *Bulletin of Volcanology*, v. 61, p. 106-120.

Rotolo, S.G., Aiuppa, A., Pullinger, C.R., Parello, F., Tenorio-Mejica, J., 1998, An introduction to San Vicente (Chichontepec) volcano, El Salvador: *Revista Geológica de América Central*, v. 21, p. 25-36.

Rotolo, S.G., and Castorina, F., 1998, Transition from mildly-tholeiitic to calc-alkaline suite: the case of Chichontepec volcanic center, El Salvador, Central America: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 86, p. 117-136.

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.

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, D.C., 123 p.

NOTAS FINALES

[1] Los datos geológicos sobre los cuales se basa este reporte proviene principalmente de Rotolo et al. (1998); Rotolo y Castorina (1998), Williams y Meyer-Abich (1955); comunicaciones con el personal del Centro de Investigaciones Geotécnicas, San Salvador y nuestras propias investigaciones de reconocimiento. No existe un registro de la actividad eruptiva histórica del volcán San Vicente, aunque Williams y Meyer-Abich (1955) hicieron una referencia vaga a una erupción no confirmada en 1643. La información al respecto de los desprendimientos de tierra históricos y lahares proviene principalmente de entrevistas con los residentes de mayor edad de Tepetitán, comunicaciones con el personal del Centro de Investigaciones Geotécnicas y Geotérmicas Salvadoreño, Brauer et al. (1995), Romano (1997) y Baum et al. (2001).

[2] Diario de Hoy reportó emisiones de gas, lluvia ácida y daños a los cultivos en las plantaciones de café alrededor del volcán Santa Ana, en un artículo publicado el 19 de Enero de 2001.

[3] 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). Los canales de río altamente obstruidos con sedimentos típicamente son inestables. La deposición elevada de sedimentos causa que un río se desvíe a lo largo del piso del valle, lo cual puede iniciar una erosión significativa de la ribera que posteriormente se sumará a la carga de sedimentos del río.

- [4] Las edades de las erupciones provenientes de las calderas de sílice más grandes en Centroamérica las proporciona Rose et al. (1999). Hart y Steen-McIntyre (1983) proporcionan una discusión detallada de la tefra Tierra Blanca Joven (TBJ) proveniente de la caldera Ilopango.
- [5] Los patrones de viento de los niveles altos en Guatemala los proporciona Mercado et al. (1988). Porting (1976) proporciona los patrones de viento superficial y diurno en San Salvador.
- [6] La extensión máxima de la zona de riesgo volcánico proximal se estima a partir de la fórmula $H/L = 0.2$, en donde H es la diferencia de elevación entre el borde de la cumbre de San Vicente y la línea del límite de riesgo, mientras que L es la distancia horizontal desde el centro del cráter de la cumbre hasta la línea del límite de riesgo (véase por ejemplo Malin y Sheridan, 1982; Hayashi y Self, 1992; e Iverson et al. 1998). Este valor de 0.2 se seleccionó debido a que es consistente con la proporción H/L del fenómeno de riesgo proximal en muchos otros volcanes.
- [7] Las zonas de riesgo de lahar se construyeron por medio del modelado de volúmenes de lahar de 100,000; 300,000; 500,000, un millón y 100 millones 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 han existido al menos cuatro desprendimientos de tierra de grandes dimensiones en el volcán San Vicente en los últimos 225 años, los volúmenes de estos eventos están mal contenidos. Los desprendimientos de tierra en el volcán San Vicente iniciados por un temblor fuerte (M_w

6.6) en Febrero de 2001 permitieron estimar volúmenes con dimensiones de hasta 250,000 metros cúbicos (Baum et al., 2001). 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 decenas 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 Vicente por temblores o lluvias torrenciales.

Un volumen de 100 millones de metros cúbicos se considera como el mayor tamaño posible para una avalancha de escombros proveniente del volcán San Salvador, basándose en la siguiente analogía para la avalancha de escombros del Monte Santa Helena. La avalancha en 1980 del Monte Santa Helena removió aproximadamente 2300 millones de metros cúbicos del flanco norte del volcán, el cual tenía una inclinación promedio de cerca de 30 grados. Esta avalancha removió cerca del 25% del volumen total del cono por encima de la altura a la cual el plano de la falla cruzó el flanco norte inferior. De manera similar al Monte Santa Helena, el volcán San Vicente es un edificio masivo con pendientes pronunciadas, además de contar con incisiones extensas. Existen pendientes por encima de los 1600 metros con una altitud que iguala o excede los 30 grados, además el volumen del volcán San Vicente por encima de esta altitud es cercano a un mil millones de metros cúbicos. Sin embargo, este es el volumen combinado del edificio doble. Cada cono separado del volcán San Vicente tiene un volumen cercano a los 500

millones de metros cúbicos. Si consideramos que es más probable una intrusión del magma en un como en vez de en ambos simultáneamente y aplicamos el 25% del volumen de Monte Santa Helena a San Vicente, entonces el máximo volumen posible de una avalancha de escombros de grandes dimensiones y el lahar asociado es ligeramente mayor a los 100 millones de metros cúbicos. Para los fines del modelado hemos redondeado este volumen al valor inferior de 100 millones de metros cúbicos. El volcán San Vicente se ha colapsado en un desprendimiento de tierra masivo al menos en una ocasión en su historia; sin embargo, el volumen de dicho colapso y del lahar asociado se desconocen.

- [8] La probabilidad anual de un lahar que tenga un volumen que iguale o exceda un millón de metro cúbicos es probablemente menor a 1 en 10,000. Los depósitos de lahar alrededor del volcán San Vicente que tienen dichos volúmenes aproximados están cubiertos por horizontes de tierra bien desarrollados con grosores similares o más antiguos a los que cubren parte de los depósitos cuaternarios de tefra de las erupciones de la caldera Ilopango (las unidades TB2, TB3 y TB4), los depósitos provenientes de estas erupciones de la caldera se han estimado dentro del intervalo aproximado de 15,000 a 50,000 años de antigüedad (Rose et al., 1999; J. W. Vallance, U. S. Geological Survey, comunicación personal). Estimamos que las probabilidades anuales de los desprendimientos de tierra y lahares que tienen volúmenes cercanos a los 500,000 metros cúbicos o menos 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 Vicente, los desprendimientos de tierra y lahares iniciados por lluvias o temblores han ocurrido al menos en cuatro ocasiones en los pasados 225 años y al menos en tres ocasiones en los últimos 65 años, lo cual sugiere probabilidades anuales de ocurrencia de aproximadamente a 1 en 60 a 1 en 20. Estos lahares históricos han alcanzado a las comunidades de San Vicente, Guadalupe y Tepetitán así como a la autopista entre Tecoluca y Zacatecoluca (véase la ilustración 1). No se conocen los volúmenes de estos lahares, pero su extensión sugiere volúmenes del orden de 300,000 a 500,000 metros cúbicos. Aunque las probabilidades estimadas están muy generalizadas, concluimos que la probabilidad anual de los desprendimientos de tierra y lahar con dimensiones de 500,000 metros cúbicos en el volcán San Vicente es de aproximadamente 1 en 50 a quizás un valor tan alto como 1 en 10.

- [9] La extensión potencial de un derribe piroclástico devastador actualmente se estima a partir de la fórmula $H/L = 0.09$, similar al ocurrido en Monte Santa Helena en 1980. Aunque dicho evento podría impactar un área muy extensa, los eventos de este tipo tienen una frecuencia muy baja.

