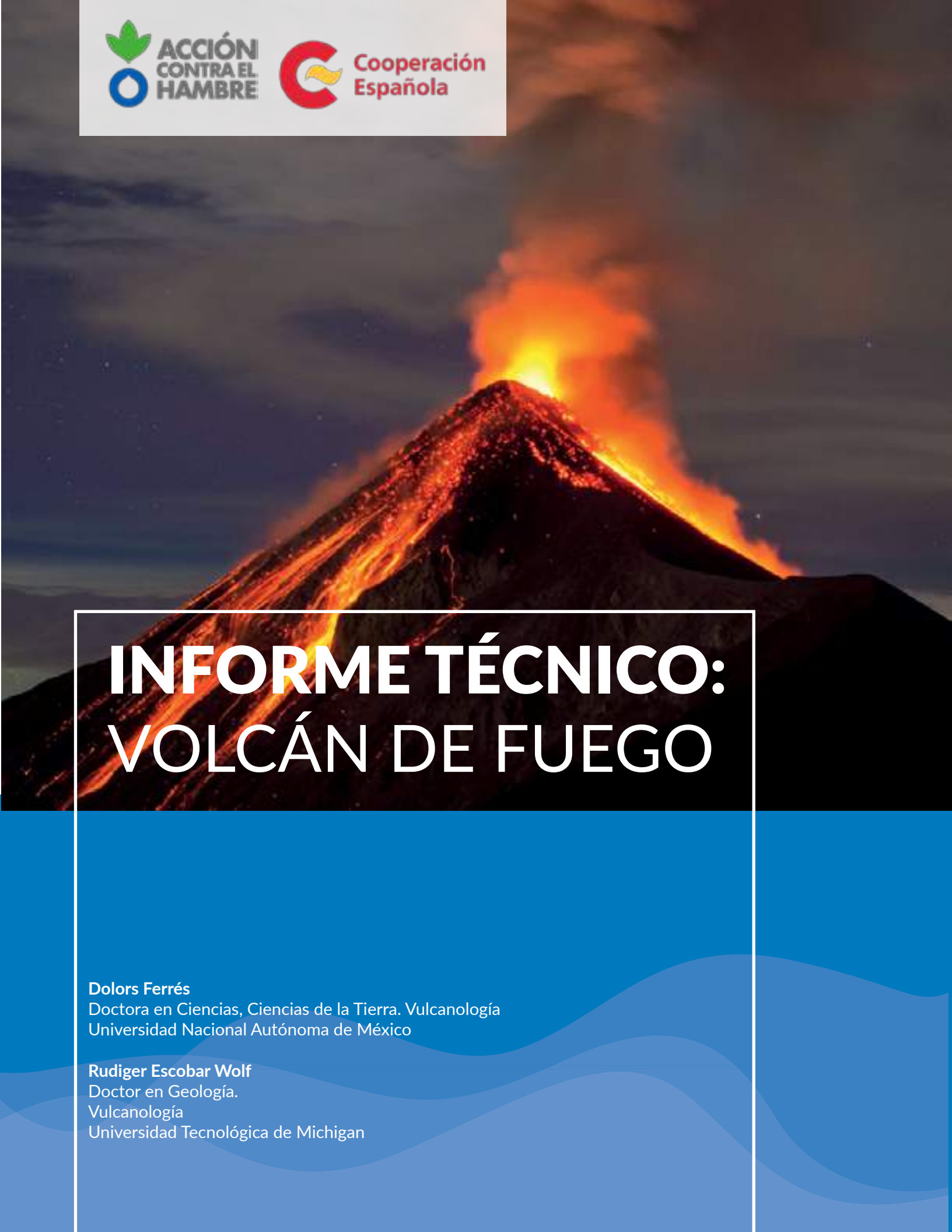




INFORME TÉCNICO: VOLCÁN DE FUEGO

Dolors Ferrés

Doctora en Ciencias, Ciencias de la Tierra. Vulcanología
Universidad Nacional Autónoma de México

Rudiger Escobar Wolf

Doctor en Geología.
Vulcanología
Universidad Tecnológica de Michigan

Este estudio se ha llevado a cabo con el apoyo de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), y forma parte de las actividades de respuesta humanitaria proporcionadas a los damnificados por la erupción del Volcán de Fuego en el Departamento de Escuintla (Guatemala), en el marco del Convenio AECID 14-CO1-216.

El contenido de este informe técnico está sustentado principalmente en información proporcionada por la Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y por el Dr. Rudiger Escobar, de la Universidad Tecnológica de Michigan, coordinador del grupo internacional de expertos vulcanólogos, para apoyo a Guatemala durante la crisis del 3 de junio de 2018 y meses posteriores.

Estudio realizado entre los meses de agosto y septiembre de 2018

ÍNDICE

I. Riesgos asociados a la actividad del volcán de Fuego	3
El volcán de Fuego: un enfoque de cuenca	5
Historia eruptiva (geológica e histórica)	13
Erupciones prehistóricas	16
Registro histórico de erupciones	18
Actividad eruptiva del s. XX	19
Actividad reciente: Ciclo eruptivo actual (1999-presente)	23
La erupción del 3 de junio de 2018	27
Amenazas volcánicas: características y efectos de los fenómenos volcánicos	37
Flujos de lava	39
Emisión de fragmentos balísticos	41
Caída de piroclastos y cenizas	43
Flujos piroclásticos (Corrientes de Densidad piroclástica)	47
Lahares	53
Escenarios de amenaza por actividad volcánica	61
Escenarios de amenaza por lahares. Zonas críticas	67
Volúmenes de material volcánico emplazados el 3 de junio 2018	70
Precipitaciones en el volcán de Fuego	74
Escenario A de amenaza por lahares (lluvias moderadas)	79
Escenario B de amenaza por lahares (lluvias intensas)	83
Zonas críticas por cambios de morfología de los cauces	85
Mapas de escenarios de amenaza por flujos piroclásticos y lahares	99
Exposición y vulnerabilidad de la población, infraestructura, bienes y servicios	111
Zonificación preliminar de riesgo	127
II. La gestión de riesgo de desastres en el volcán de Fuego	133
Conocimiento del riesgo	138
Monitoreo de la actividad volcánica y difusión de alertas	154
Comunicación	161
Capacidad de respuesta instalada en el territorio	163
Referencias	165
Recursos en línea	169



I

RIESGOS ASOCIADOS A LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN DE FUEGO

El volcán de Fuego: un enfoque de cuenca

Historia eruptiva (geológica e histórica)

La erupción del 3 de junio de 2018

Amenazas volcánicas: características y efectos
de los fenómenos volcánicos y de los lahares

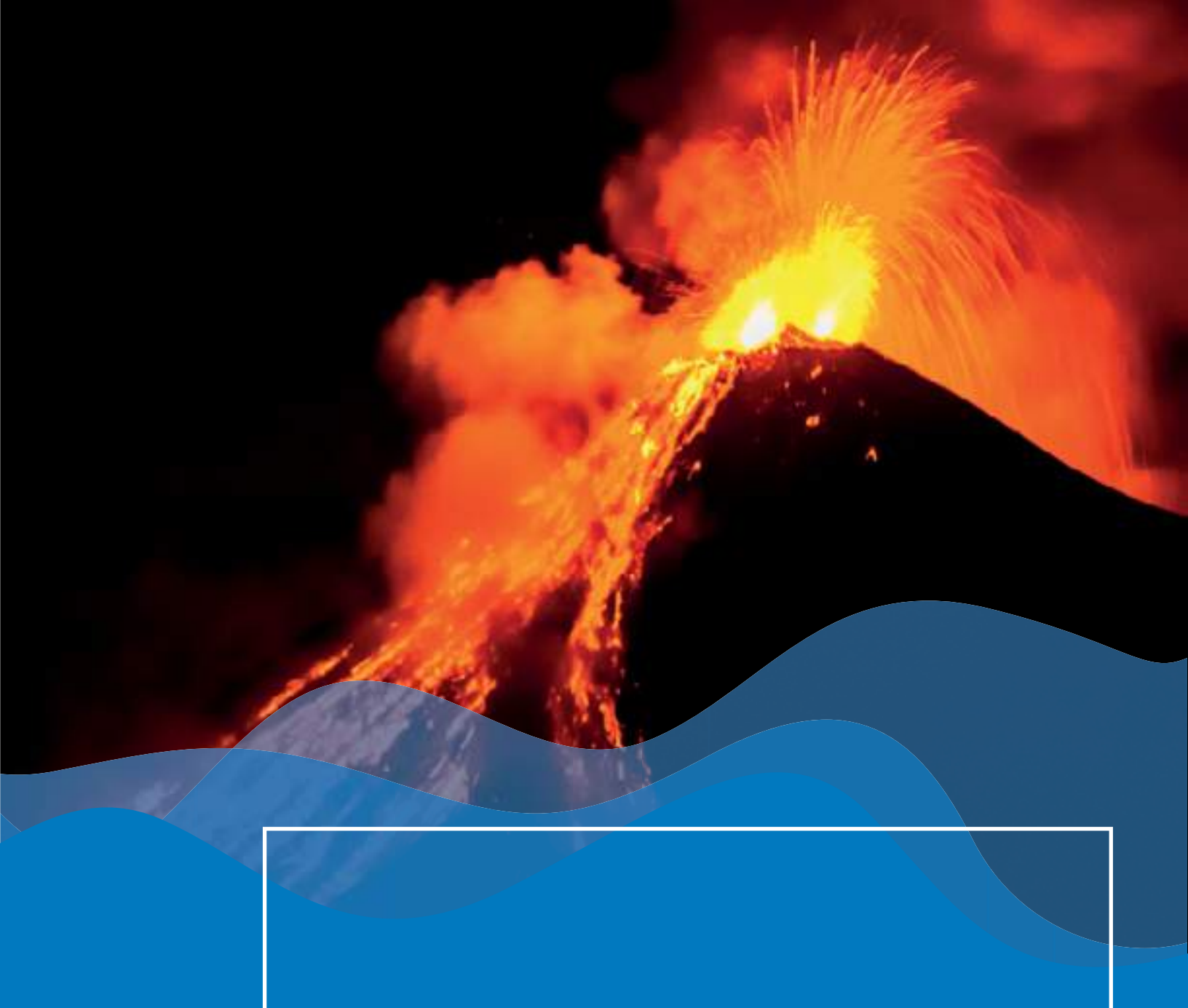
Escenarios de amenaza por actividad volcánica

Escenarios de amenaza por lahares. Zonas
críticas

Mapas de escenarios de amenaza por flujos
piroclásticos y lahares

Exposición y vulnerabilidad de la población,
infraestructura, bienes y servicios.

Zonificación preliminar de riesgo



EL VOLCÁN DE FUEGO

UN ENFOQUE DE CUENCA



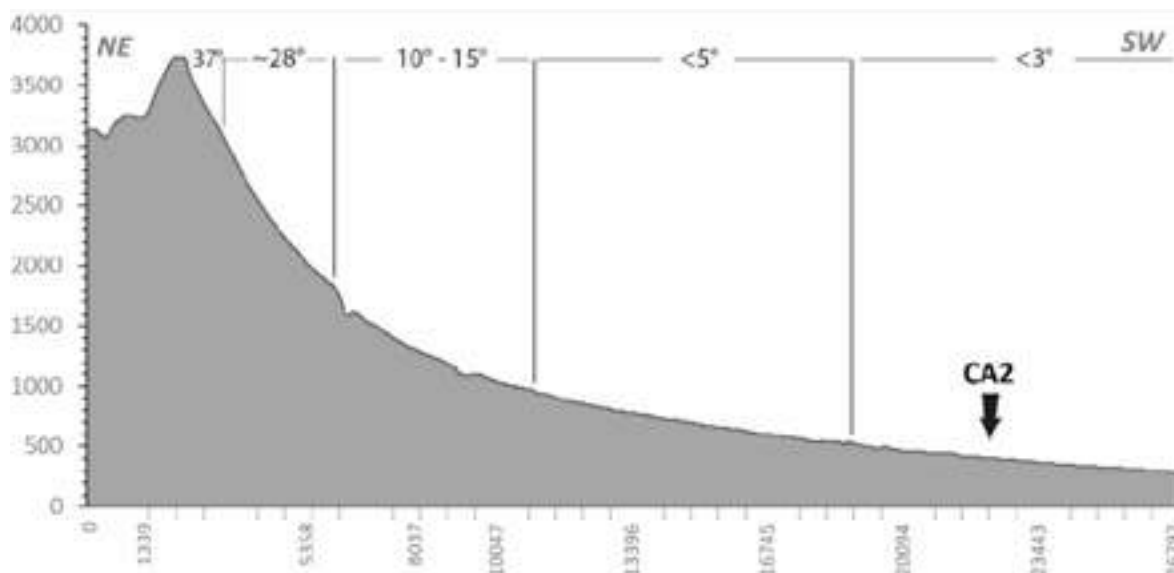
El volcán de Fuego es, junto al volcán Pacaya y al volcán Santiaguito, uno de los estratovolcanes más activos de Guatemala y del mundo. Es el volcán más joven (<8,500 años) y activo del macizo volcánico que forma junto al volcán Acatenango, que también presentó actividad eruptiva en el siglo XX y a otros edificios volcánicos ya inactivos (de norte a sur: Acatenango Antiguo, Yepocapa y la Meseta). Estos volcanes forman parte del sector norte del Cinturón Volcánico de América Central, producto de la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe (Vallance et al., 2001; INSIVUMEH, 2012).

Se localiza en las coordenadas 14°28'54" de latitud N y 90°52'54" de longitud W, en el sector centro-oriental de la cordillera volcánica en Guatemala; 40 km al suroeste de la Ciudad capital, 18 km al oeste-suroeste de Antigua Guatemala y 20 km al NW de la cabecera municipal de Escuintla.

El volcán tiene forma cónica y una altura de 3,763 msnm, con laderas muy inclinadas que descienden uniformemente hasta su base, entre las cotas 750 msnm (sur) y 1000 msnm (oeste y este); con excepción de la ladera norte, donde en la cota 3,300 msnm se une a la vertiente sur del volcán Acatenango, en la elevación denominada "La Meseta". La pendiente en el flanco sur del volcán varía desde los 37°, en la parte más alta de sus laderas, hasta 1 km de la cima aproximadamente (cota ~3,100 msnm), cambia a 28° en el cono, hasta 5.5 km del cráter (~1,500 msnm) y se suaviza posteriormente (10-14°) hasta los 11 km de radio (cota 700-750 msnm; Figura 1). Las llanuras aluviales que lo circundan tienen una pendiente mucho menor, inferior a los 5°. Casi en su totalidad, el volcán está cubierto por plantaciones de café y por una densa vegetación, hasta la cota 3,000 msnm, por encima de la cual ha sido removida por la erosión y la actividad eruptiva de las últimas décadas. En la cima del volcán se ubica el cráter semicircular, de 500 x 250 m de diámetro, con su borde más elevado al noroeste y su parte más baja en el borde noreste, donde existe una brecha por donde han fluido la mayor parte de flujos de lava del actual ciclo eruptivo.

FIGURA 1

Perfil topográfico NE – SW del volcán de Fuego y las llanuras aluviales circundantes. El cono volcánico tiene una pendiente cercana a los 30° hasta aproximadamente 5.5 km del cráter, después la pendiente se suaviza (10°-14°) hasta los 11 km de radio. Las llanuras aluviales tienen pendientes entre 2° y 5°.

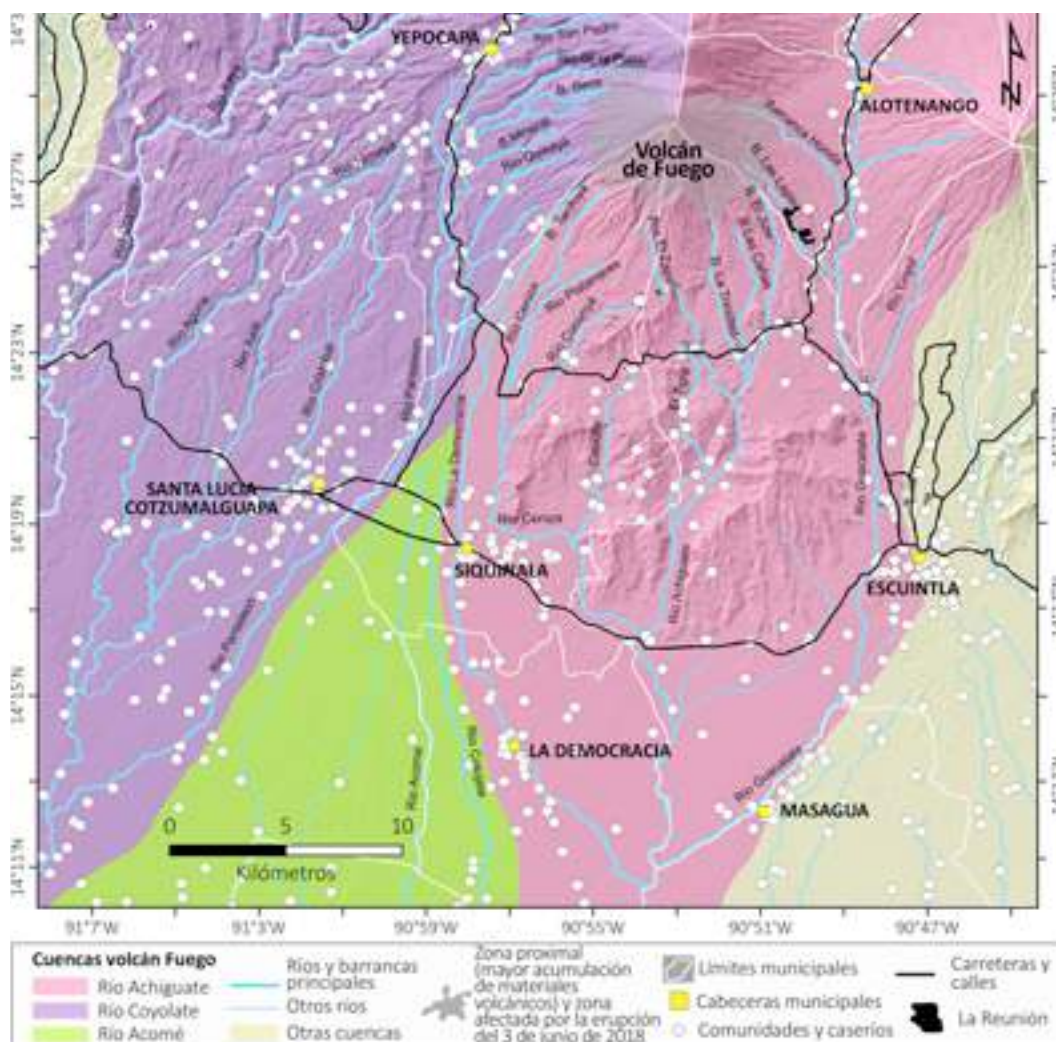


Las zonas (franjas más o menos concéntricas al cráter del volcán) donde se producen estos cambios de pendiente son puntos críticos en la dinámica fluvial y de los lahares. En las zonas de mayor pendiente los ríos y también los lahares tienen un régimen principalmente erosivo, acarreando material de la base y paredes de los canales, mientras que donde se produce un quiebre importante en la pendiente ("break in slope", por su término en inglés), el lahar inicia un proceso de descarga/deposición.

Fisiográficamente, el volcán Fuego se ubica en el frente del altiplano guatemalteco, respecto al cual se eleva unos 2,000 m y limita con la planicie costera, que se extiende al sur entre 60 y 70 km hasta el océano Pacífico y sobre la cual tiene una diferencia de elevación promedio de 3,500 m. Constituye, junto a las demás edificaciones volcánicas del macizo la zona más elevada del parteaguas entre las dos principales cuencas hídricas en este sector, las del río Coyolate, al oeste y suroeste y del río Achiguate, al sur, sureste y este, ambas con una orientación norte-sur (Figura2).

FIGURA 2

Mapa de cuencas de la zona del volcán de Fuego. Las numerosas barrancas que drenan las laderas del volcán conforman las microcuencas que alimentan al este, sureste y sur las subcuencas los ríos Guacalate y Achiguate y al suroeste, oeste y noroeste, a las subcuencas de los ríos Pantaleón y Cristóbal, afluentes del río Coyolate. Se indican en el mapa los municipios con territorio en el volcán y se muestran las cabeceras municipales, así como la localización de las comunidades, caseríos, aldeas y fincas en las que está distribuida la población entorno al volcán.



Cada una de estas cuencas, además de sus propias áreas de captación, recogen las aguas de diversas subcuencas: las de los ríos Guacalate, La Democracia y Barranca Ceniza para el caso del río Achiguate y las subcuencas de los ríos Xaya, Cristóbal y Pantaleón para el caso del río Coyolate (Figura 2). Estas subcuencas reúnen a su vez las aguas de numerosas barrancas, las cuales drenan las laderas del volcán Fuego y Acatenango y cuyas cabeceras se encuentran en las partes más altas de estos dos volcanes, por arriba de la cota 2,000 msnm.

En el pasado, siete de estas barrancas han sido tradicionalmente las más activas en el transporte y deposición de flujos piroclásticos y de lahares de diversa magnitud (Escobar, 2013). Estas barrancas fluyen en todas las laderas del volcán de Fuego y de este a oeste son: barranca Honda (noreste) y barranca Las Lajas (este) de la subcuenca del río Guacalate con el que confluyen en las cotas 1,000 y 850 msnm respectivamente; la barranca El Jute (sureste) y la barranca la Trinidad (sur) que confluyen directamente con el río Achiguate en la cota 630 msnm aproximadamente; la barranca Ceniza (sur-suroeste) que confluye con el río Achiguate en la cota 140 msnm, al sur de las estribaciones de materiales antiguos (rocas volcánicas y metamórficas del Terciario); las barrancas Tlaniluyá (suroeste) y Seca-Santa Teresa (oeste), que confluyen con el río Pantaleón en las cotas 575 y 1,000 msnm, respectivamente.

Otras barrancas y ríos, como Las Cañas (entre la barranca Trinidad y el Jute), las cabeceras del río Democracia y Platanares, al oeste y este respectivamente del río Cenizas y el río Mineral, afluente del Pantaleón, también han sido activas en la generación y transporte de lahares.

El edificio volcánico de Fuego es compartido por cuatro municipalidades pertenecientes a tres Departamentos: al este el municipio de Alotenango del Departamento de Sacatepéquez, al sur los municipios de Escuintla y Siquinalá del Departamento de Escuintla y al W el municipio de Yepocapa del Departamento de Chimaltenango (Figura 2). Santa Lucia Cotzumalguapa tiene parte del territorio de su municipio en las laderas del flanco SW del volcán y Alotenango al norte y San Miguel Dueñas al noreste, han sentido frecuentemente los efectos de la caída de cenizas producto de la actividad eruptiva del volcán. Las cabeceras municipales de Alotenango y Yepocapa se encuentran a ~8 km del cráter, al este y oeste respectivamente, mientras que las cabeceras de los municipios de Escuintla, Siquinalá y Sta. Lucia Cotzumalguapa, se encuentran a 20-22 km al suroeste, sur y sureste respectivamente, sobre la carretera CA2 (paralela a las cotas 300-400 msnm). La población de los municipios en el volcán suma un total de 220,000 personas (proyecciones del 2010 del Censo Nacional de Población 2002 del Instituto Nacional de Estadística (Segeplan, 2018) y se encuentra distribuida entre las cabeceras municipales y numerosas comunidades, caseríos, aldeas y fincas, muchas de ellas sobre el edificio volcánico, con poblaciones entre 30 y 8,000 habitantes.





Según datos de la misma fuente, en el radio de 10 km del cráter se estima que viven más de 68,000 personas en 122 comunidades. Además de la cabecera municipal de Yepocapa, las comunidades más cercanas al cráter del volcán, en un radio de 7 km son: comunidad La Normal y Finca La Reunión (al este y sureste, en Alotenango), La Rochela (al sur, en Escuintla), comunidad Agraria Ceilán (al sur, en Siquinalá), Panimaché I y II y San Francisco Panimaché (al suroeste, en Yepocapa) y las comunidades El Niagara, Sangre de Cristo, San Gabriel y La Conchita (al oeste, en Yepocapa). El resto, hasta las 122 comunidades se encuentran en el radio de 8 a 10 km, principalmente sobre la calle de terracería (núm. 6) que circunda el volcán, paralela a las cotas 1400 msnm al oeste y 700-800 msnm al sur y sobre la Ruta Nacional 14 (RN14) que une Escuintla con Antigua Guatemala.

Esta población se encuentra expuesta a los diversos fenómenos volcánicos directamente asociados a la actividad eruptiva: caída de cenizas, flujos de lava, flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas, que pueden impactar de forma severa sus condiciones y medios de vida, la infraestructura y el ambiente (ver apartado de exposición para mayor detalle). Además, se generan lahares, durante las erupciones (syn-eruptivos), inmediatamente después de su ocurrencia (post-eruptivos) o en años posteriores (intra-eruptivos), por la removilización del material volcánico durante las épocas de lluvia anuales o por eventos hidrometeorológicos extremos. Los lahares, además de modificar la morfología de los cauces, producen cambios en la dinámica fluvial aguas abajo, aportando mayor carga de sedimento a los cursos de agua. El emplazamiento de materiales volcánicos en la parte alta de la cuenca y el azolvamiento de las barrancas con depósitos de flujo piroclástico y lahares reduce considerablemente la capacidad de infiltración en esa zona y produce por tanto un incremento en los caudales y de su capacidad erosiva, en zonas de la cuenca media y baja (donde normalmente sedimenta), especialmente en zonas de meandro y en el cruce con carreteras (puentes) y calles de terracería.

Los efectos de la actividad eruptiva, especialmente la caída de cenizas, han sido sentidos hasta cientos de kilómetros del volcán en varias direcciones, pero principalmente al noroeste, norte y noreste y han afectado a otros municipios como Pochuta, Acatenango, San Miguel Dueñas, Ciudad Vieja y Antigua Guatemala, por citar a los más cercanos, así como a la Ciudad de Guatemala. Al sur, ya en la planicie costera, donde se encuentran las plantaciones de caña de azúcar de los principales ingenios del país, los municipios de Santa Lucía Cotzumalguapa, La Democracia y Masagua han sentido también los efectos de la actividad volcánica, por caída de ceniza, pero principalmente por la modificación de la dinámica fluvial (infiltración y escorrentía) producto de la acumulación de material volcánico en las partes altas de Fuego y la generación de lahares. Considerando esta área extendida, desde las cabeceras de las subcuencas de los ríos Pantaleón, Cristóbal, Guacalate y el área de captación del Achiguate en el volcán de Fuego y hasta sus confluencias con los ríos principales (Coyolate y Achiguate) al sur de la CA2 (~22 km del cráter de Fuego) se han contabilizado un total de 419 centros de población, donde residen ~284,000 personas.

El Geoportal de la Coordinadora Nacional para la Reducción de desastres (CONRED) (<https://conred.maps.arcgis.com/home/index.html>), donde se despliegan los datos del censo en forma dinámica, indica también que son más de 17,000 las edificaciones en el radio de 20 km de la cima del volcán, aunque para este rubro muestra únicamente información de los Departamentos de Escuintla y Sacatepéquez.

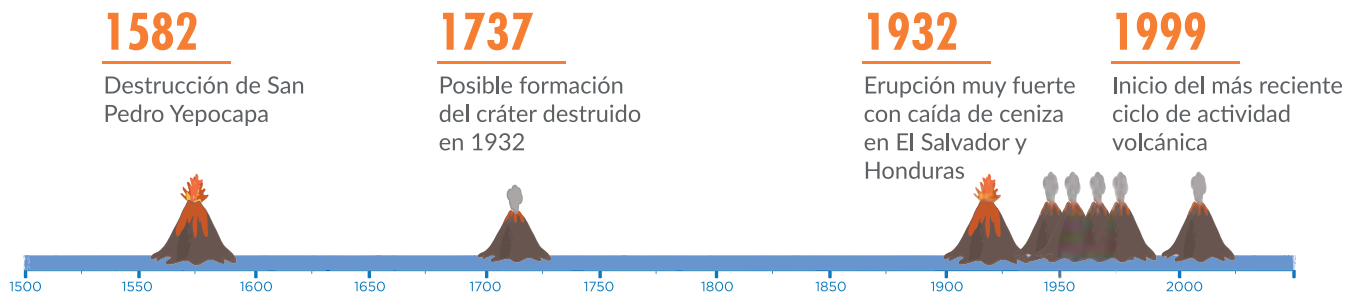
Cabe mencionar que los datos del Censo 2002 están desactualizados e incompletos. Por otra parte, la CONRED y específicamente su Unidad de Prevención de Volcanes (UPV) dispone de datos de mayor detalle para algunos de los asentamientos en el radio de 10 km del volcán de Fuego, a los cuales no se ha podido tener acceso, pero estos no están organizados para generar capas de información para un sistema de información geográfico. En la sección de exposición y vulnerabilidad se amplían estos aspectos.

En resumen, debe considerarse al volcán de Fuego como la parte alta de un sistema de cuencas. El edificio volcánico constituye una parte importante de las cabeceras de las subcuencas de los ríos Pantaleón, Cristóbal, La Democracia, Achiguate y Guacalate que drenan hacia el sur, cruzando la CA2 (cuenca media), hacia la planicie costera (cuenca baja). El aporte de material volcánico por la actividad eruptiva en la cuenca alta, en forma de piroclastos sueltos o de depósitos de flujo piroclástico y la subsecuente formación de lahares en las laderas altas del volcán, afecta los procesos de la dinámica fluvial (infiltración, escorrentía, transporte y sedimentación) y por tanto produce impactos de diversa naturaleza en las cuencas media y baja. Este sistema tiene una configuración multiamenaza y multirriesgo, por los diversos procesos volcánicos e hidrometeorológicos que tienen lugar y que de forma individual o combinada pueden afectar con impactos de diversa naturaleza a las casi 300,000 personas que lo habitan.



HISTORIA ERUPTIVA (*GEOLÓGICA E HISTÓRICA*)

Gráfica de las principales erupciones del volcán de Fuego desde el Siglo XVI
(Fuente INSIVUMEH, 2012)

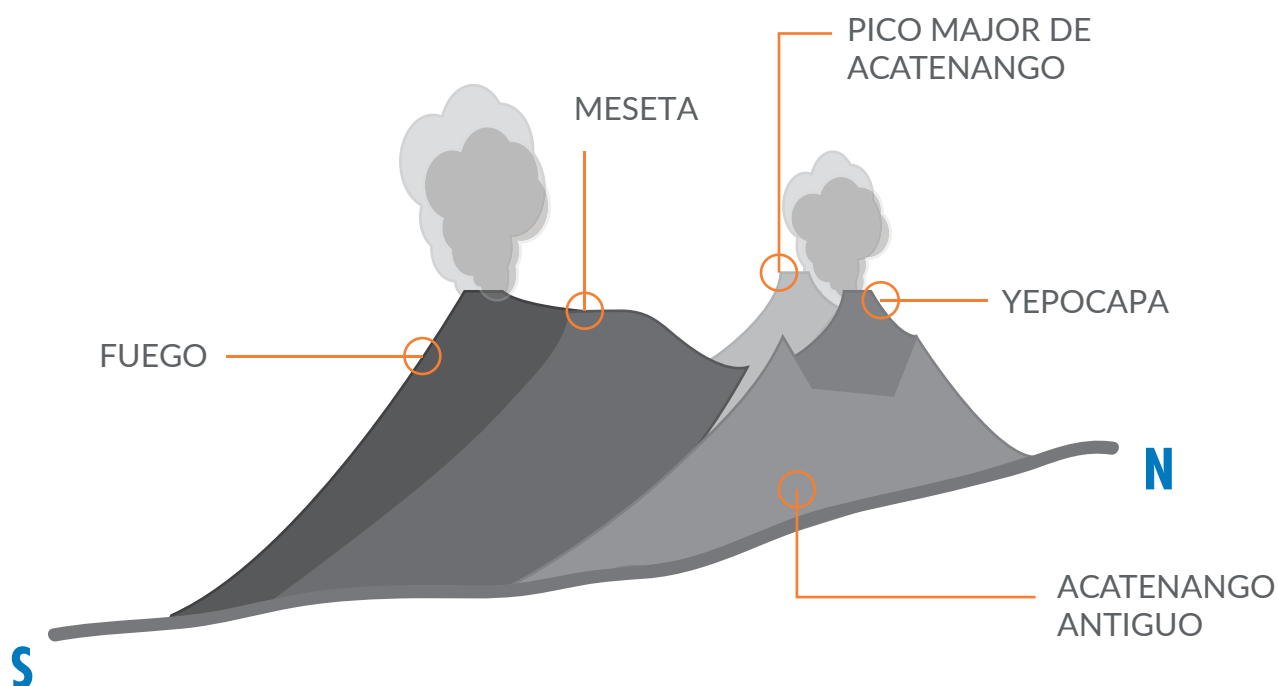


El volcán de Fuego constituye el centro eruptivo más joven del complejo volcánico conformado por los restos de otros cuatro centros eruptivos, que de norte a sur son: Acatenango Antiguo, Yepocapa, Pico Mayor de Acatenango y la Meseta (Figura 3). El complejo volcánico ha estado activo durante los últimos 230,000 años y se han reconocido los depósitos de numerosas erupciones durante los últimos 84,000 años antes del presente (A.P.). Estos volcanes se construyeron por el apilamiento de flujos de lava y depósitos de materiales piroclásticos producto de sucesivas erupciones efusivas y explosivas. Aunque varios de ellos estuvieron activos contemporáneamente se observa una tendencia general de actividad volcánica más joven de norte a sur. Una vez alcanzada una altura crítica, los centros eruptivos antiguos colapsaron periódicamente, formando enormes avalanchas de escombros, que viajaron decenas de kilómetros y cubrieron extensas áreas hacia el sur, hacia la planicie costera. Sobre la ladera colapsada de un volcán se construyó el nuevo edificio volcánico más joven (Vallance et al., 2001; INSIVUMEH, 2012).

El Pico Mayor de Acatenango, activo desde 20,000 años A.P., ha presentado actividad en época histórica (1661) y en el siglo XX (1924-27 y 1972), por lo que no puede descartarse una futura reactivación. Sin embargo, el volcán de Fuego es el centro eruptivo en construcción más activo del complejo, cuyo origen, según el registro geológico, es posterior a los 30,000 años A.P., aunque con base en el volumen total de sus depósitos se considera que pudo haberse construido solamente en los últimos 8,500 años A.P.

FIGURA 3

Ilustración esquemática del macizo volcánico Fuego-Acatenango mostrando los 5 centros eruptivos que lo conforman. Ha presentado actividad volcánica desde los últimos 84,000 años, con una tendencia general norte-sur. Las fumarolas indican los volcanes que han tenido actividad en época histórica (*adaptado de Basset, 1996 en Vallance et al., 2001*).



La historia eruptiva del volcán de Fuego puede resumirse en cuatro períodos principales, sobre los cuales hay diferentes grados de conocimiento, en función de la información disponible (en campo y en documentos) para analizar la dinámica de las erupciones, su evolución e impactos. Los cuatro períodos son de más antiguo a más reciente: 1) Actividad eruptiva geológica o prehistórica (últimos 8,500 años), conocida a través del estudio y datación de los depósitos volcánicos distribuidos a su alrededor; 2) Actividad eruptiva histórica (últimos 500 años), conocida principalmente a través de documentos y reseñas de la época de la colonia; 3) Actividad eruptiva del s. XX, documentada por diferentes observadores e investigadores y 4) el ciclo eruptivo actual (desde 1999), el mejor estudiado y documentado a través del análisis sistemático del INSIVUMEH y de trabajos de investigación vulcanológica de detalle. Son diversos los autores que han trabajado en el estudio del volcán de Fuego, sin embargo, el presente resumen se basa en los trabajos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Vallance et al., 2001), traducido al español y en la tesis doctoral de Rudiger Escobar (2013), en inglés, de la Universidad Tecnológica de Michigan (MTU, por sus siglas en inglés). Ambos trabajos compilan la mayor parte de datos conocidos sobre la historia eruptiva y amenazas asociadas del volcán de Fuego y deben constituir las fuentes fundamentales para futuras publicaciones técnicas y divulgativas.

1

ERUPCIONES PREHISTÓRICAS

Este episodio de actividad comprende el conjunto de erupciones del volcán Fuego que han podido reconocerse a través del registro geológico, ocurridas antes del inicio de la época colonial (1524) y de la disponibilidad de documentos escritos con reportes de actividad volcánica.

Algunos de los depósitos de material volcánico fragmentado (piroclásticos) producto de las erupciones prehistóricas del volcán Fuego se distribuyen ampliamente a su alrededor principalmente en el sector este, donde aparecen intercalados con depósitos piroclásticos de los volcanes Acatenango y Agua. La mayor parte de estos depósitos (capas de tefra y ceniza de caída y depósitos de flujos piroclástico) se encuentra por debajo de una capa-marcador, de entre 15-20 cm de ceniza fina, de color blanco, atribuida a la caída de cenizas de la erupción de tipo pliniano Tierra Blanca Joven de la caldera de Ilopango en El Salvador, que tuvo efectos

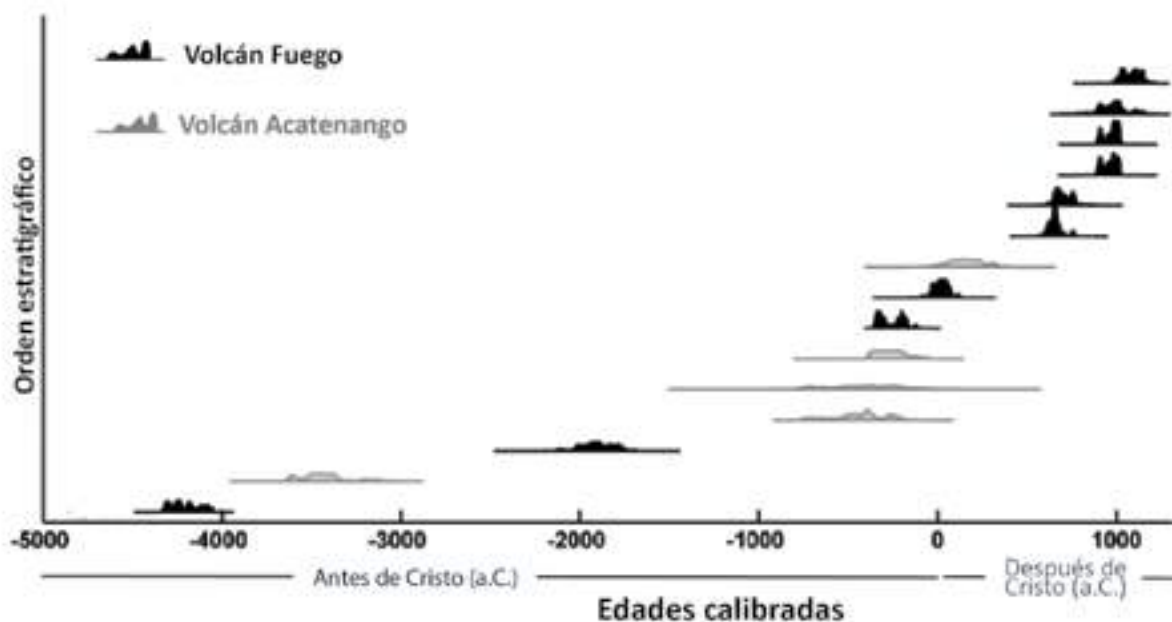
globales y cuya edad se determinó en 536 años después de Cristo (d.C.). Por tanto, todos los depósitos piroclásticos por debajo de esta capa son más antiguos y por encima de ella más recientes.

Vallance et al. (2001) y Escobar (2013) fecharon catorce de los depósitos de caída y de flujo piroclástico prehistóricos por el método de radiocarbono (o carbono 14), debido a que en el momento de su emplazamiento estos depósitos, todavía calientes, carbonizaron restos vegetales. De esta forma se han podido determinar las edades de al menos 10 erupciones que ocurrieron hace $5,370 \pm 50$ A.P., 3560 ± 70 A.P., 2170 ± 30 A.P., 1980 ± 40 A.P., 1375 ± 45 A.P., 1330 ± 60 A.P., 1070 ± 40 A.P., 1060 ± 40 A.P., 1050 ± 70 A.P. y 980 ± 50 A.P. (Figura 4).

FIGURA 4

Erupciones prehistóricas con fechamientos de los volcanes Fuego (en negro) y Acatenango (en gris). La longitud de las barras indica el nivel de error posible en las determinaciones de edad (modificado de Escobar, 2013).

Es importante señalar que los depósitos que se preservan corresponden normalmente a erupciones de una gran magnitud, que probablemente ocurrieron intercaladas con otras de pequeña y moderada magnitud, cuyos productos se emplazaban a menor distancia, sobre el cono volcánico y que o bien se han erosionado o bien se encuentran cubiertos por los productos de la actividad más reciente.



2

REGISTRO HISTÓRICO DE ERUPCIONES

La actividad eruptiva de Fuego ha sido documentada, desde principios del s. XVI, en varias fuentes de información históricas y compilada en diferentes catálogos, de los cuales el más usado es el del Programa de Volcanismo Global (GVP, por sus siglas en inglés del Smithsonian Institution; <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=342090>).

Este catálogo reporta al menos 36 erupciones confirmadas (además de 17 inciertas) entre los siglos XVI al XIX, a la mayoría de las cuales se asignó un Índice de Explosividad Volcánica (VEI por sus siglas en inglés) de 2 (en una escala de 0 a 8); similares a la mayoría de las erupciones observadas en el volcán de Fuego durante las últimas décadas.

Sin embargo, a algunas de estas erupciones se asignaron VEI's superiores, con base en la descripción de alguna de sus características e impacto de los productos que emitieron, indicando que fueron más energéticas y de mayor magnitud. Así, las erupciones de diciembre de 1581 (VEI=4), de 1617 (VEI=3), de agosto de 1737 (VEI=4) y de junio de 1880 (VEI=4), tuvieron con probabilidad columnas eruptivas superiores a los 10 km de altura sobre el cráter y distribuyeron sus cenizas hasta cientos de kilómetros de distancia, en ocasiones llegando incluso a Honduras y El Salvador.

3

ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL SIGLO XX

El mismo catálogo reporta la ocurrencia de 20 erupciones durante el s. XX, incluyendo la del 21 de mayo de 1999 que da inicio al actual ciclo de actividad (ver apartado siguiente). Aunque las erupciones se distribuyen durante todo el siglo, parecen existir períodos con una mayor frecuencia de erupciones (años 40's-50's y años 70's) de moderada y gran magnitud.

La primera erupción de gran magnitud del siglo XX ocurre el 21 de enero de 1932 y es clasificada como sub-pliniana, con VEI=4, en el rango de las erupciones ocurridas los años 1971 y 1974, para las cuales existe documentación gráfica. Esta erupción emitió grandes volúmenes de tefra y cenizas que se depositaron principalmente al este y noreste, alcanzando territorio de Honduras y El Salvador. Esta erupción fue responsable de la modificación de la morfología previa, casi perfectamente cónica del volcán Fuego, derrumbando la cúspide del cono volcánico y disminuyendo su altura en casi 80 m. Se formó un cráter más amplio, semicircular, con una cresta dentada y aguda en la mayor parte de su contorno, con excepción del sector noreste donde se excavó una brecha que ha canalizado algunos de los flujos de la lava de posteriores erupciones.

Durante la década de 1940 y de 1950 se producen varias erupciones con *“fuertes lluvias de ceniza que oscurecían los alrededores”*, en los años 1944, 1947, 1949, 1953, 1955 y 1957, la mayoría de ellas clasificadas con un VEI=2. Solamente a la erupción del 19 al 21 de febrero de 1957, donde la ceniza se desplazó por más de 100 km alcanzando territorio de El Salvador, se le asignó un VEI = 3.

Durante los años 60's también ocurrieron diversas erupciones de moderada a gran

magnitud, varias de ellas con VEI= 3: el 9 de noviembre de 1962 (produjo la dispersión de cenizas hasta Huehuetenango, a más de 100 km del volcán), del 28 de septiembre al 1 de octubre de 1963 (los depósitos de tefra y cenizas se acumularon en los techos de Antigua y Alotenango, a 8 y 18 km del cráter al noreste, lo que requirió limpieza inmediata para evitar el colapso de los techos), otras dos erupciones en 1966 y la del 3 de mayo de 1967, que generó extensos daños en las fincas Los Tarros y La Unión, a más de 15 km de distancia del cráter (Escobar, 2013).

La erupción de 1963 es la única de este período para la que se tiene un reporte de lahares que ocurrieron en la Barranca Honda. Los depósitos de lahar rellenaron el canal y sobrepasaron sus márgenes, destruyendo áreas cultivadas y boscosas, y acercándose a la carretera entre Alotenango y Escuintla (actual RN14). También existe el reporte del fallecimiento de siete personas.

Ya en la década de 1970, la actividad eruptiva incluyó erupciones continuadas de pequeña o muy pequeña magnitud y de forma intermitente erupciones de moderada y gran magnitud de VEI=3 y superiores. Las erupciones más grandes ocurrieron del 14 al 15 de septiembre de 1971; del 22 de febrero al 2 de marzo de 1973, el 22 y 23 de marzo de 1973 y del 14 al 23 de octubre de 1974. Esta última, con un VEI de 4 fue la de mayor magnitud ocurrida desde 1932 (Figura 5)

FIGURA 5

Imágenes de la columna eruptiva y los flujos piroclásticos generados durante la erupción de 1974, tomadas por diversos autores (*Fotografías de Sam Bonis; Smithsonian Institution, 2018: <https://volcano.si.edu/>*).



La erupción de 1974 produjo una columna eruptiva superior a 15 km de altura sobre el cráter, que generó la caída y dispersión de grandes volúmenes de tefra y ceniza hasta cientos de kilómetros de distancia del volcán, con un espesor de 20 cm a 50 cm hacia el suroeste. También produjo flujos piroclásticos en todas las barrancas con alcances de hasta 10 km. Estos depósitos se desbordaron en las barrancas Honda (al este) y Seca (al oeste). El colapso parcial de la columna eruptiva de gran altura parece ser el mecanismo más plausible para la generación de estos flujos. (La erupción de 1973, aún sin producir una columna eruptiva tan grande, también produjo flujos piroclásticos, que probablemente se generaron directamente desde el cráter (boiling-over), el mecanismo más frecuente observado en los últimos años). Asociados a los flujos piroclásticos de la erupción de 1974 también se observaron depósitos de oleadas piroclásticas, producto de las ondas de choque que acompañan la erupción y de la deposición de las nubes de cenizas que acompañan a los flujos piroclásticos.

Las lluvias posteriores removilizaron el material volcánico y generaron lahares que se desplazaron hasta 10 km más allá de los frentes de los flujos piroclásticos (hasta 20 km desde la cima). El impacto de los lahares ocurridos después de las erupciones de gran magnitud de los años 70, con base en las áreas afectadas, fue mucho mayor que la de los lahares generados durante el actual ciclo de actividad (1999-presente), incluyendo a los que se han producido por eventos de lluvia extremos y los que se han observado hasta el momento durante este año, producto de la erupción del 3 de junio.

Después de las erupciones de 1974, la intensidad de la actividad volcánica en Fuego disminuyó. Se registraron erupciones de menor magnitud desde 1977 hasta agosto de 1979 y posteriormente el volcán entró en un período de reposo hasta 1999. Un volumen significativo de material volcánico de las erupciones de la década de 1970 permanecía todavía en las laderas superiores más inclinadas del volcán al inicio del actual ciclo de actividad en 1999 y durante los años sucesivos hasta el presente.

En resumen, durante el siglo XX, ocurrieron diversas erupciones de moderada a gran magnitud, de VEI entre 2 y 4, que emitieron volúmenes de materiales volcánicos entre 1 millón y 100 millones de m³.

4

ACTIVIDAD RECIENTE: CICLO ERUPTIVO ACTUAL (1999- PRESENTE)

Después de 20 años de reposo, el volcán de Fuego se reactivó en 1999, dando inicio al actual ciclo eruptivo, en el que se han presentado una gran variedad de estilos de actividad volcánica (Vallance et al., 2001; Escobar, 2013).

El volcán Fuego ha presentado actividad de forma casi permanente (actividad continua o de fondo) con erupciones explosivas de pequeña o muy pequeña magnitud, de tipo estromboliano o vulcaniano, que en ocasiones han sucedido de 10 a 20 veces por día, o con erupciones puramente efusivas, emitiendo flujos de lava de corto recorrido con una baja tasa de emisión ($\sim 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Intercalándose con esta actividad de fondo, de forma intermitente y periódica han ocurrido al menos 41 erupciones de moderada magnitud, desde 1999 (INSIVUMEH, 2018). Estas erupciones han sido típicamente explosivas, de tipo vulcaniano, de corta duración (horas a algunos días) y con VEI's de 1 a <3 (en una escala de 0-8); generando columnas eruptivas generalmente inferiores a los 10 km de altura sobre el cráter y la emisión y dispersión moderada de tefra y cenizas, flujos piroclásticos con alcances de hasta 7

km y flujos de lava con alcances de pocos kilómetros. Hasta la erupción del 3 de junio de 2018, los depósitos de flujos piroclásticos y de flujos de lava generados por estas erupciones se habían emplazado en el interior de las barrancas que drenan el volcán; con excepción, de un flujo piroclástico generado en la erupción del 29 de junio de 2003 que desbordó los márgenes del canal e inundó el terreno interfluvial adyacente.

Las erupciones de mayor energía (VEI entre 2 y 3) del actual ciclo de actividad se habían registraron en 2002, 2003, 2007 y 2012 e incrementaron a partir de 2015. Entre enero y marzo de 2002 se produce un incremento de la actividad, principalmente de tipo estromboliano, que dio lugar al llenado del cráter por la emisión de lavas, las cuales se desbordaron hacia el flanco este (flujo de lava en la barranca Las Lajas). Este fenómeno vuelve a ocurrir en los años siguientes: en agosto de ese mismo año, en enero y junio de 2003 y en enero de 2004, pero desbordándose hacia el sur y suroeste, hacia las barrancas Taniluyá y Santa Teresa. En enero y junio de 2003 se producen dos erupciones moderadas, con emisión de flujos piroclásticos, los más grandes hacia la barranca Santa Teresa que rellenan completamente la barranca y sobrepasan su confinamiento, esparciéndose en una gran extensión y afectando la vegetación. Posteriormente, durante la época de lluvia, se generaron diversos lahares de magnitud variable. En el año 2007 tiene lugar 6 erupciones de moderada magnitud (25 de marzo, 29 de junio, 17 de julio, 11 de septiembre, 7 de diciembre y 16 de diciembre) que generaron gruesas columnas de ceniza, las cuales se dispersaron sobre las poblaciones del sector oeste (Yepocapa, Sangre de Cristo, Panimaché, Santa Sofía y Morelia).



Posteriormente se generaron lahares que descendieron por las barrancas Taniluyá, Santa Teresa, Ceniza, El Jute y las Lajas, en esta última causando destrucción de la infraestructura vial. El 13 de septiembre de 2012 se produce otra erupción intensa que generó flujos piroclásticos de hasta 7 km en la barranca Ceniza y una gruesa columna eruptiva que dispersó las cenizas en dirección suroeste, afectando a varias comunidades en este sector (Panimaché, Panimaché II, Morelia, El Porvenir y otras), obligando a la autoevacuación de 5000 personas hacia Santa Lucía Cotzumalguapa, lo que no ocurría desde 1974. A partir del año 2015 se intensifica la actividad volcánica, con erupciones más espaciadas en el tiempo, pero más explosivas. Los últimos eventos eruptivos registrados en el volcán de Fuego, antes de junio de 2018, fueron las 12 erupciones de 2017, la más importante en septiembre y la del 31 de enero-1 febrero de 2018.

En promedio, las erupciones del actual ciclo eruptivo emitieron individualmente volúmenes de material volcánico de 1 a 10 millones de m^3 , aunque algunas alcanzaron hasta 26 millones de m^3 y una cantidad significativa de ceniza sin cuantificar. Escobar (2013) reporta un volumen total de materiales volcánicos producidos entre 1999 y 2013 de 146 millones de m^3 , lo que implica una tasa de erupción promedio de $\sim 0.3 m^3/s$. Unos 2/3 de este volumen corresponde al generado por las erupciones más grandes (26 erupciones hasta 2013) y el tercio restante corresponde al volumen de materiales aportados por la actividad continua o de fondo, lo que implica que aún de pequeña magnitud, esta actividad realiza un aporte significativo de materiales en el largo plazo. Extrapolando estos datos hasta 2018, tendríamos un volumen total de materiales emitidos alrededor de los 190 millones de m^3 , sin contabilizar los aportados por la erupción del 3 de junio de 2018. Una buena parte de estos materiales estaba disponible para removilizarse en la parte alta de las laderas del volcán cuando ocurre la erupción del 3 de junio.

En general, la historia eruptiva del volcán de Fuego muestra evidencias de que la actividad de moderada y gran magnitud ocurre relativamente agrupada en períodos de años o décadas (1700 – 1717, 1850 – 1860, 1944 – 1979), espaciados por períodos de décadas o siglos con actividad continua, pero de pequeña magnitud. La actividad eruptiva anterior al episodio actual (prehistórica, histórica, s. XX) en el volcán de Fuego comparte muchas características con la actividad registrada desde 1999, pero la escala de algunas de las erupciones (p. ej. 1971, 1973 y 1974) excedía al menos en un orden de magnitud los eventos ocurridos durante el período 1999-2017, en términos del volumen de los flujos piroclásticos y los depósitos de tefra asociados.

La erupción del 3 de junio de 2018 es la primera erupción de este rango ocurrida durante el s. XXI (ver sección siguiente), pero de un orden de magnitud inferior a la erupción de 1974. Los estudios geológicos, así como el análisis de los eventos eruptivos históricos muestran que erupciones como la del 3 de junio del presente año, de mayor magnitud ($VEI \geq 3$) que las habitualmente conocidas, han ocurrido en el pasado y es posible que vuelvan a ocurrir en el futuro (Vallance et al., 2001; Siebert et al., 2010; Escobar, 2013).



LA ERUPCIÓN DEL 3 DE JUNIO DE 2018

El 3 de junio se produjo la segunda erupción del año 2018, considerada por el INSIVUMEH, la de mayor energía e intensidad de los últimos años. Inició durante la madrugada (antes de las 5:00 am) y tuvo una duración total de 16:30 h. Generó columnas eruptivas superiores a los 10 km sobre el nivel del cráter y numerosos flujos piroclásticos; de volúmenes variables que se emplazaron en todas las barrancas del volcán, inicialmente con alcances de 5 a 7 km. El flujo piroclástico de mayor magnitud se produjo en varios pulsos, entre las 12:55 h y las 14:30 h y se emplazó en la barranca Las Lajas, al sureste, alcanzando una longitud total de más de 11 km (Figura 6). En sus pulsos finales el flujo piroclástico se desbordó en varios de los tramos de la barranca, sepultando en su totalidad bajo más de 10 m de depósitos piroclásticos a la comunidad de San Miguel Los Lotes y parcialmente a las comunidades El Rodeo y La Reyna. Estos pulsos del flujo también alcanzaron la Ruta Nacional 14 (RN14), destruyendo parcialmente el puente sobre la barranca Las Lajas. Ese mismo día, en horas de la tarde se produjeron lahares en las barrancas Mineral, Santa Emilia, Taniluyá y Cenizas, al oeste y suroeste del volcán (INSIVUMEH, 2018).

Las características de esta erupción hacen pensar que tuvo un VEl ≥ 3 , superior al de las erupciones ocurridas desde 1999. La catalogación final de esta erupción se realizará una vez analizados en detalle los volúmenes, alcances y características de los depósitos que emitió, trabajos que están siendo realizados por el Dr. Rudiger Escobar (MTU) y personal de INSIVUMEH, durante este mes de agosto.

FIGURA 6

En la imagen de la izquierda se observa la nube de cenizas acompañante del flujo piroclástico emplazado en la barranca las Lajas, llegando a la Finca La Reunión, durante la erupción del 3 de junio de 2018. A la derecha, imagen panorámica de los depósitos de flujo piroclástico en la barranca las Lajas.



Durante la mayor parte del día 3 de junio, la cima del volcán no fue observable por la nubosidad. La red de monitoreo al inicio de la erupción constaba de 2 estaciones sísmicas: FUEGO-3, instalada en La Reunión que transmitía en tiempo real y FUEGO-8, ubicada en el flanco suroeste, la cual grabó la actividad sísmica pero que no transmitía en tiempo real y 2 web-cam, de las cuales solamente la instalada en el flanco sureste funcionaba el día de la erupción. Los observatorios locales de INSIVUMEH en Panimaché (OVFUEGO-1) y en Sangre de Cristo (OVFUEGO-2) estuvieron en comunicación con INSIVUMEH y reportaron varios de los flujos piroclásticos en ese sector (INSIVUMEH, 2018). Otros observadores locales, con o sin estaciones de radio de la CONRED, reportaron a través de teléfono celular a su enlace de la Unidad de Prevención de Volcanes para el volcán de Fuego, explosiones fuertes, retumbos, vibración en el suelo y viviendas y la ocurrencia de algunos de los flujos piroclásticos (William Chigna, comunicación personal).

A continuación, se describe la línea de tiempo de los eventos de esta erupción y de los efectos y daños que provocó, con base en la información reportada por el INSIVUMEH en los 7 boletines especiales publicados en su página web durante la jornada de la erupción, así como a trabajos de investigación inéditos realizados por investigadores del MTU (Dr. Rudiger Escobar y Dr. Simon Carn), en contacto permanente con el INSIVUMEH.

5:00 AM

Se generan los primeros flujos piroclásticos (denominados también Corrientes piroclásticas de densidad, PDC por sus siglas en inglés) de tipo tipo “boiling-over”, es decir directamente desde el borde del cráter o desde muy poca altura en la columna eruptiva. Estos primeros flujos piroclásticos se emplazaron en el flanco oeste, concretamente en dirección a la barranca Seca-Santa Teresa.

6:00 AM

Primer boletín especial (BEVF No. 27). Se reporta el flujo piroclástico mencionado y la posibilidad de que se estén emplazando otros en la barranca Ceniza, acompañados de fuertes explosiones y columna eruptiva de 6,000 msnm (2-2.5 km sobre el cráter del volcán) dispersándose en dirección oeste-suroeste. Se menciona que la nube de cenizas acompañante de los flujos piroclásticos se desplaza hasta 40 km, afectando la aldea Sangre de Cristo y el pueblo de San Pedro Yepocapa.

10:00 AM

Segundo boletín especial (BEVF No. 28). La erupción continúa desarrollándose en el transcurso de la mañana, incrementado en energía, y produciendo otros flujos piroclásticos que se emplazan en las cabeceras de las principales barrancas en todos los flancos, especialmente en Barranca Seca y Ceniza. Los observatorios del volcán de Fuego reportan explosiones fuertes acompañadas de retumbos, generando ondas de choque que producen vibración en viviendas cercanas al volcán. La altura de la columna eruptiva se mantiene en 6,000 msnm, pero la dirección de dispersión ha cambiado a noroeste, norte y noreste.

11:30 AM

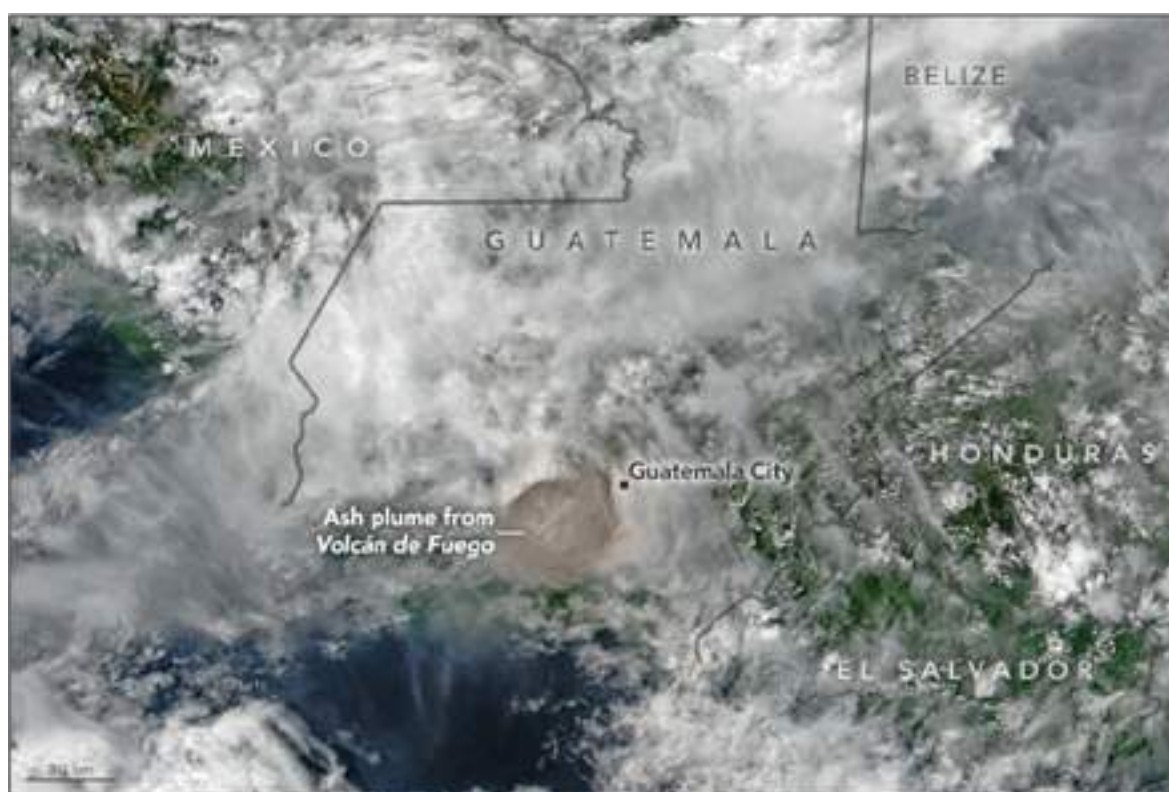
Hasta esta hora la magnitud e intensidad de la erupción se valoraba como similar a las erupciones de los últimos años. Sin embargo, a esa hora inicia la auto-evacuación del club de golf La Reunión, por decisión de su gerente, con base a la observación de la actividad volcánica y de considerarla “inusual” (Ada Gaytán, comunicación personal). Cabe mencionar, que este lugar ha sido evacuado al menos en siete ocasiones en el pasado.

12:45 PM

Desde las 11:30 la energía de la erupción continúa incrementándose y la columna eruptiva se eleva hasta más de 10 km sobre el cráter, dispersándose hacia el noroeste, norte y noreste. Las imágenes GOES muestran la nube eruptiva hasta una altura de 16,000 msnm, más de 12 km sobre el cráter (Escobar, 2018). El reporte del Centro de Alertamiento por Ceniza Volcánica de Washington (Washington Volcanic Ash Advisory Center, <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/messages.html>) estimó una altura de 15 km sobre el nivel del mar de la columna eruptiva (Figura 7).

FIGURA 7

Imagen satélite de las 13:00 h mostrando la zona de paraguas de la columna eruptiva (zona en gris oscuro) de la erupción del 3 de junio de 2018 del volcán Fuego. A partir de esta imagen se estimó una altura de columna de 15 km sobre el nivel del mar. La imagen, en la banda del infrarrojo visible (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, VIIRS) fue tomada por el sistema de satélites Suomi National Polar-orbiting Partnership, operados por la Administración para la Atmósfera y el Océano de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) y analizadas por el Observatorio de la Tierra de la NASA (<https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=92235>).



12:55 PM

La imagen de vídeo muestra la generación de una serie de pulsos de flujos piroclásticos, que se emplazaron en el flanco sureste, por la barranca Las Lajas y alcanzaron la zona del club La Reunión (figura inicial del capítulo), pero sin desbordarse. Posterior a este evento se pierde la señal de la cámara web.

13:40 PM

En el tercer boletín especial de la jornada (BEVFO N° 29), INSIVUMEH califica la erupción como la más intensa generada en los últimos años y menciona que se han generado flujos piroclásticos en varias direcciones alrededor del cráter que se emplazan en las barrancas Seca, Ceniza, Mineral, Taniluyá, Las Lajas y Honda. La nube de cenizas que acompaña los flujos piroclásticos se dispersa a más de 40 km en la dirección del viento. Se reporta caída de lapilli (fragmentos >2mm) y de ceniza hasta 25 km de distancia, en todas las direcciones desde el noroeste hasta el noreste del volcán (aldea La Soledad y municipios de Alotenango, San Miguel Dueñas y Antigua Guatemala, donde se reporta la caída de piroclastos de 15 mm). En la Ciudad de Guatemala se reportan partículas de 1 mm. Se continúan generando retumbos fuertes y ondas de choque, con vibración de techos y ventanas. INSIVUMEH recomienda subir el estado de alerta, la evacuación de la comunidad Sangre de Cristo y advierte a las autoridades de aeronavegación la llegada inminente de la ceniza a la Ciudad de Guatemala, lo que provocó el cierre del aeropuerto internacional “La Aurora”.

13:45 PM

Las imágenes GOES muestran que la columna eruptiva principal se despega del cráter (Escobar, 2018). Este momento podría considerarse como la finalización de la fase más intensa de la erupción.

13:55 PM

4° boletín especial del INSIVUMEH (BEVFGO N°30) confirma la ocurrencia de flujos piroclásticos fuertes en las barrancas Seca, Cenizas, Mineral, Taniluyá, Las Lajas y Honda, acompañadas de nubes de ceniza a una altura de 10,000 msnm. Recomendamos, además de lo mencionado en el anterior boletín monitorear los flancos sur, sureste y suroeste.

14:00-14:30 PM

Los pulsos de flujos piroclásticos en la barranca Las Lajas destruyen el puente de la carretera RN-14, provocando la muerte de diversas personas que se encontraban en la carretera. Existen diversas grabaciones de vídeo de este momento, pero no se ha podido localizar el tiempo exacto en que los pulsos de flujo piroclástico alcanzan el puente.

15:30 PM

Se observa una segunda columna eruptiva que, según las imágenes GOES alcanza los 13,000 msnm (8-9 km sobre el cráter). Esta columna se “despega” del cráter a las 15:45 pm.

15:00-16:00 PM

Los pulsos de flujo piroclástico desbordan la barranca Las Lajas en algunos tramos (hasta de 300 m), hacia La Reunión en la margen izquierda y en varios sectores en la margen derecha. El desborde principal hacia la margen derecha de la barranca alcanza la comunidad de San Miguel Los Lotes, al suroeste de Las Lajas que queda completamente destruida, soterrada por más de 10 m de materiales piroclásticos. Mueren la mayor parte de sus habitantes. Además de la parte concentrada de los flujos piroclásticos, la inmensa nube de cenizas acompañante se eleva por varios kilómetros. Los flujos piroclásticos alcanzan también parcialmente a la comunidad del Rodeo y La Reyna.

16:50 PM

5° boletín especial de INSIVUMEH (BEVFGO N° 31). Se mantiene la energía de la erupción y el emplazamiento de flujos piroclásticos en la mayoría de las barrancas. Se reporta la observación de los primeros lahares en el río Mineral (afluente del Pantaleón) y otros en la zona (sin especificar). CONRED ha evacuado las comunidades de Sangre de Cristo, Finca Palo Verde, Panimaché y otras hacia albergues.

18:45 PM

Registro del último flujo piroclástico del día 3 de junio.

19:15 PM

6° boletín especial del INSIVUMEH (BEVFGO N°32). A partir de la observación de la señal sísmica se informa de un descenso en la energía de la erupción, que se mantiene con explosiones de moderadas a fuertes y con retumbos. En las últimas dos horas se han generado nuevos pulsos de flujo piroclástico (el último a las 18:45 h). Se advierte que pueden desplazarse a mayor distancia, debido a que la mayor parte de las barrancas han sido rellenadas por los flujos piroclásticos emplazados durante el transcurso del día. Se continúa reportando caída de ceniza en los flancos oeste, noroeste y norte, a partir de una columna de 2 a 2.5 km sobre el cráter. Se han generado lahares por los ríos Mineral y Santa Emilia, afluente del río Pantaleón y por las barrancas Taniluyá y Cenizas.



22:00 PM

En el último boletín especial (BEVFGO N°33) se da por finalizada la erupción, después de 16 h y media. Las explosiones que se han producido en las últimas horas son de débiles a moderadas, con abundante desgasificación e incandescencia en el cráter. La columna eruptiva conserva una altura de unos 700 m sobre el nivel del cráter. No se han producido retumbos ni ondas de choque. La caída de ceniza afectó zonas a más de 250 km de distancia. Se advierte de una posible reactivación y de la probable ocurrencia de lahares de gran magnitud en las próximas horas y días.

Durante la semana posterior a la erupción, continúan las condiciones de nubosidad en el volcán de Fuego. INSIVUMEH reportó la ocurrencia de explosiones durante toda la siguiente semana, hasta el día 9 de junio. Se producen nuevos flujos piroclásticos, el día 5 de junio, a las 14:10 h, de menor magnitud que los de la erupción del día 3, por las barrancas El Jute y Las Lajas, con una nube de cenizas acompañante de hasta 6 km de altura, que se dispersó hacia el oeste y noroeste (BEVFGO N° 36-2018) y que hizo necesario interrumpir las labores de rescate. También se producen flujos piroclásticos los días 7 y 8. Posteriormente las explosiones se espacian en el tiempo y ocurren el 12 y 22 junio, seguidas por varias semanas con un bajo nivel de actividad, con excepción del día 10 de julio en que se registra un ligero incremento de la explosividad.

Después de 6 semanas de relativa calma eruptiva, con actividad de desgasificación y pequeñas explosiones esporádicas, el 8 de agosto de 2018, INSIVUMEH reporta el inicio de una nueva etapa de actividad con una explosión fuerte (evento eruptivo de pequeña magnitud), registrada en la estación sísmica FUEGO-3 a las 21:10 h, con retumbos, onda de choque y avalanchas de materiales volcánicos en todo el entorno del volcán. La columna eruptiva que acompañó la explosión tuvo una altura de 1,000 m sobre el cráter y dispersó ceniza hacia el noroeste, hasta 12 km del volcán (*Boletín Especial del volcán Fuego N° 105-2018*). En los días posteriores, hasta la conclusión de este informe la actividad en el volcán es de débil a moderada, con fumarolas débiles de desgasificación de color blanco, explosiones

de débiles a moderadas, en lapsos de 1 a 4 minutos, que expulsan columnas de color gris de 500 a 900 m de altura y se dispersan hacia el norte y noroeste. Se reportaron caídas de ceniza en San Pedro Yepocapa, Panimaché I, Morelia, Santa Sofía, Finca Palo Verde, entre otras comunidades. Las explosiones expulsan también material piroclástico en la parte superior del volcán y se producen pequeñas avalanchas de estos materiales sueltos, que en algunas zonas alcanzan la vegetación (barrancas Taniluyá, Ceniza, Trinidad, Las Lajas y Honda).

El día 6 de junio inician las primeras precipitaciones habituales del período de lluvia y en los días siguientes (8 y 9 de junio) se registra la generación de los primeros lahares post-eruptivos, que continuarán produciéndose durante todo el mes. Los lahares del 10 y 11 de junio, en la barranca Las Lajas, son de moderada magnitud. Posteriormente, durante la mayor parte del mes de julio, la condición de canícula meteorológica reduce las precipitaciones en la mayor parte del país y no se registran lahares en el volcán de Fuego. Esta actividad se reinicia los primeros días de agosto, sigue de forma casi diaria y se prevé que continúe durante toda la época de lluvias (ver apartado siguiente).

La erupción del 3 de junio ilustra como los diversos fenómenos volcánicos que ocurren en el transcurso de la erupción se producen de forma simultánea o concatenada (caída de cenizas, emisión de bloques volcánicos, flujos piroclásticos, lahares sin-eruptivos y en ocasiones flujos de lava), pero también ocurren lahares de diversa magnitud durante los días, semanas y meses posteriores a la erupción, por la removilización del material acumulado en las laderas del volcán durante la época de lluvias.

Las erupciones volcánicas, independientemente de su magnitud, se desarrollan en diferentes fases eruptivas, donde los mecanismos de lanzamiento, transporte y deposición de los productos volcánicos es distinta y por tanto también es distinta la peligrosidad que representan para la población e infraestructura asentada en su área de influencia.



AMENAZAS VOLCÁNICAS: CARACTERÍSTICAS Y EFECTOS DE LOS FENÓMENOS VOLCÁNICOS

La actividad eruptiva en el volcán de Fuego ha mostrado que durante sus erupciones pueden producirse fases puramente efusivas, fases explosivas o ambas combinadas en el mismo evento eruptivo. En las fases efusivas, el magma ya desgasificado es emitido de forma relativamente tranquila como flujos de lava. En las fases explosivas, más energéticas según el contenido de gases de la erupción, el magma, las rocas del cráter y de las paredes del conducto volcánico son fragmentados y expulsados de forma violenta, a través de la columna eruptiva.



Los fragmentos resultantes se denominan genéricamente piroclastos (*piro* = fuego; *clasto* = fragmento). Pueden caer como material suelto cerca del cráter o hasta cientos de kilómetros de distancia dispersados por los vientos en función de su densidad y tamaño, o bien ser arrastrados por el colapso de la columna eruptiva y ser transportados en un flujo mezclados con gases. Las fases explosivas se clasifican en estrombolianas (baja o moderada explosividad) o vulcanianas (moderada a alta explosividad) en función del contenido de gases y de la tipología de la erupción.

Durante la erupción del 3 de junio de 2018 se produjeron varios de estos fenómenos, los cuales por sus características provocaron impactos severos de diversa naturaleza. A continuación, se describen brevemente todos los fenómenos que han registrado en la actividad eruptiva del volcán de Fuego, sus características generales durante el actual período de actividad eruptiva (1999-2018) y en específico para la erupción del 3 de junio de 2018, así como los impactos que generaron.

1

FLUJOS DE LAVA

Los flujos de lava son masas de roca fundida, ya desgasificada, que se desplazan a favor del pendiente como una unidad dinámicamente continua. Tienen altas temperaturas (800 °C-1,200 °C) y en el volcán de Fuego son de composición basáltica y basáltico-andesítica por lo que tienen baja viscosidad. Por la fricción con el terreno y el enfriamiento progresivo se desplazan a mucha menor velocidad que los flujos piroclásticos y se confinan en el interior de las barrancas. Son comunes durante los episodios de actividad continua de baja intensidad y generalmente tienen cortos recorridos de pocos cientos de metros, ya que por las altas pendientes en la parte alta del cono volcánico se disgregan en bloques. En erupciones de moderada magnitud han alcanzado entre 4 y 6 km (Figura 8).



FIGURA 8

Emisión de dos flujos de lava durante la erupción de volcán Fuego el 25 de junio de 2016 por las barrancas El Jute y las Lajas. Puede observarse como se desprenden bloques incandescentes de su perímetro al colapsar su frente (Fuente: INSIVUMEH, 2018).

Los impactos asociados a los flujos de lava son principalmente pérdida de suelo fértil y de la infraestructura que se encuentra a su paso, así como incendios, aunque en el volcán de Fuego difícilmente alcanzan las zonas con vegetación, debido a su corto alcance. Aunque no son una amenaza directa para la vida, es importante señalar que los frentes de flujos de lava emplazados sobre pendientes pronunciadas, como en el caso del volcán de Fuego y el volcán Pacaya, colapsan generando avalanchas de rocas y flujos piroclásticos que alimentan los abanicos de materiales sueltos de las partes altas del volcán con nuevos bloques y fragmentos volcánicos. Durante la erupción del 3 de junio de 2018 no se generaron flujos de lava.

2

EMISIÓN DE FRAGMENTOS BALÍSTICOS

Los piroclastos de mayor tamaño (>6.4 cm), producto de las erupciones explosivas se denominan balísticos (bombas o bloques de roca volcánica) y normalmente se acumulan entorno al cráter en un radio de pocos kilómetros (~ 2 km), aunque en algunas erupciones de gran magnitud pueden alcanzar distancias mayores (>5 km), asociados a depósitos de caída de piroclastos (Blong, 1984; Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2012). Su movimiento está gobernado fundamentalmente por la fuerza de gravedad, más que por la dinámica de la columna eruptiva y por tanto tienen una trayectoria parabólica antes de caer en la superficie. Esta trayectoria es modificada por la fuerza de arrastre con el aire, la cual disminuye considerablemente el alcance y provoca que la caída de los balísticos sea más vertical de la que sería en un movimiento parabólico.

El tamaño de los fragmentos que pueden ser expulsados como proyectiles balísticos depende de la magnitud de la erupción, pero típicamente van en un rango de 10 cm hasta algunos metros. Estos fragmentos representan una amenaza para la vida, las propiedades y la aeronavegación debido a las altas temperaturas y elevadas energías de impacto que alcanzan (Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2012).

Sus velocidades de impacto oscilan entre 100 y 500 km/h. Las personas pueden sobrevivir la caída de balísticos pequeños (de pocos cm) en refugios especiales, pero no al impacto de balísticos grandes, debido a que la fuerza de impacto de estos fragmentos puede ser superior a la fuerza de penetración de diversos materiales con los que se construyen los techos (Tilling, 1993). Por ejemplo, un balístico de 30 cm de diámetro de composición basáltica que cae a una velocidad de 500 km/hora tiene una fuerza de impacto que puede perforar materiales como la madera, el concreto y el acero (Blong, 1984).

En el volcán de Fuego estos fragmentos se depositan en las partes más altas, entorno al cráter, donde no hay asentamientos, aunque pueden alcanzar la zona de La Meseta en erupciones vulcanianas de moderada y gran explosividad. Por las altas pendientes en la cima del volcán y por la fuerza del impacto, normalmente los balísticos ruedan (Figura 9) y alcanzan zonas con vegetación, provocando incendios, ya que preservan altas temperaturas.

FIGURA 9

Emisión de fragmentos balísticos en el volcán Fuego durante la erupción de diciembre de 2015. El lanzamiento de este tipo de fragmentos está asociado principalmente a fases explosivas de tipo estromboliano (Fotografía de Tom Pfeiffer: www.volcanodiscovery.com)



Además de los balísticos, en la parte alta del volcán también se acumulan otros fragmentos piroclásticos de tamaños similares, pero que no tienen trayectorias tan largas como los proyectiles balísticos, sino que son depositados desde el cráter como porciones de lava (spatter), a partir del “borboteo” del magma el momento de la salida del conducto volcánico (fuentes de lava o jets de piroclastos). Como se mencionó, también se acumulan bloques desprendidos de los laterales y el frente de los flujos de lava de corto recorrido que se emiten durante las erupciones estrombolianas.

Todos estos fragmentos, producto de la actividad de baja y moderada magnitud en el volcán, se acumulan en su cima y son, junto con los productos de los flujos piroclásticos, susceptibles de ser removilizados.

3

CAÍDA DE PIROCLASTOS Y CENIZA

Los fragmentos de magma, de rocas del conducto volcánico y del cráter generados en erupciones explosivas se denominan lapilli cuando tienen tamaños entre 2 y 64 mm y ceniza volcánica cuando son menores a 2 mm. Estas partículas son arrastradas por la columna eruptiva y caen, en función de su tamaño y densidad, a diferentes distancias del cráter, hasta depositarse como lluvia de material volcánico (Figura 10). La ceniza por su pequeño tamaño puede ser dispersada y transportada a grandes distancias por los vientos dominantes. El espesor de los depósitos de lapilli y ceniza y el área afectada dependerán de la magnitud de la erupción (principalmente del volumen de magma involucrado y de la altura de la columna eruptiva) y de la dirección y fuerza del viento.

FIGURA 10

Explosión durante la actividad de diciembre 2015. Los gases, en forma de plumas o columnas eruptivas, arrastran la ceniza volcánica y conjuntamente son dispersados en la dirección predominante de los vientos (*Fotografía de Tom Pfeiffer: www.volcanodiscovery.com*)



Se denomina piroclastos de caída o “tefra” a los materiales volcánicos sueltos acumulados por este mecanismo de emplazamiento y es uno de los fenómenos más comunes asociados a la actividad volcánica.

Durante el actual ciclo de actividad (1999-presente) se habían registrado erupciones de pequeña y moderada magnitud que comúnmente producían columnas eruptivas de 1 hasta 10 km kilómetros de altura y que dispersaban las cenizas volcánicas en la dirección predominante de los vientos (variable según la época del año) hasta varios kilómetros del cráter (~100 km). La caída de ceniza ha afectado de forma habitual a todas las poblaciones en un radio de 15 a 25 km del cráter con espesores entre 10 y 20 cm e incluso la ceniza más final, a la Ciudad de Guatemala (40 km del NE).



Durante la erupción del 3 de junio, los piroclastos y ceniza arrastrados por la columna eruptiva (con máximos de 12 km sobre el cráter) produjeron caída de tefra (lapilli de 2 a 15 mm) hasta 25 km del cráter al noroeste y hasta 30 km al norte y noroeste, con un área de afectación aproximada de 700 km². La caída de ceniza (fragmentos menores a 2mm) se registró en el suroeste en horas de la mañana y en un radio de 50 km del noroeste al noreste, a medida que avanzaba el día y la dispersión de la columna fue cambiando de dirección por la variación en la dirección de los vientos. La caída de ceniza alcanzó poblaciones como Chichicastenango al norte y la Ciudad de Guatemala al noreste, con un área total de afectación cercana a los 2,000 km². INSIVUMEH elaboró un mapa de las zonas afectadas por caída de ceniza (Figura 11a), con base a datos de reportes de sus observadores locales y con la colaboración del Dr. Rudiger Escobar (MTU), que recopiló datos vía Twitter, con usuarios de esta red social en las poblaciones afectadas. El mapa no incluye datos sobre los espesores o el volumen total emitido. Sin embargo, con base en las áreas de afectación reportadas y considerando un espesor promedio muy conservador de 2 cm para el área con caída de lapilli y de 0.5 cm para el área afectada por ceniza se estima un volumen mínimo de 24 millones de m³, al menos el doble que el volumen de algunas caídas de ceniza reportadas durante las erupciones de pequeña y moderada magnitud ocurridas desde 1999.

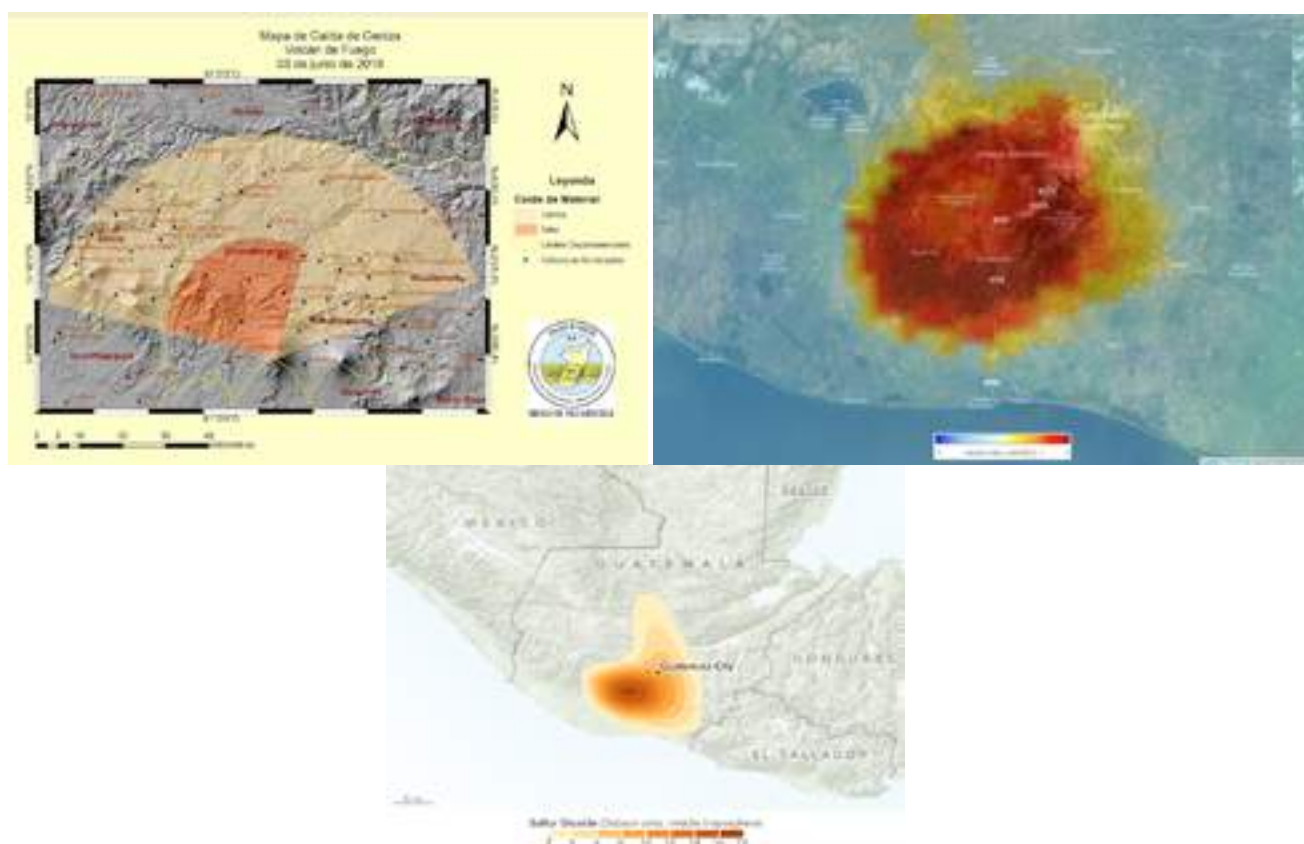
a) Mapa de caída de lapilli y ceniza producto de la erupción del 3 de junio de 2018 elaborado por INSIVUMEH el 4 de junio de 2018.

b) Distribución de aerosoles (ceniza muy fina) dispersada en la atmósfera, con base en datos del satélite Sentinel-2 (<http://www.copernicus.eu/news/copernicus-ems-rapid-mapping-activated-volcanic-eruption-guatemala>.)

c) Mapa de concentraciones de dióxido de azufre en la troposfera media a una altitud de 8 kilómetros detectadas por sensores satelitales, el 3 de junio de 2018 (<https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=92235>).

Además de los depósitos de caída de tefra y cenizas, los boletines de INSIVUMEH reportaron que la presencia de cenizas en el ambiente se percibió en un radio de hasta 250 km, como puede observarse en las imágenes del satélite OMI, disponibles en el repositorio del Observatorio de la Tierra de la NASA (Figura 11b). Además de la ceniza, la columna eruptiva inyecta a la atmósfera diversos gases, principalmente vapor de agua, pero también dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de carbono (CO_2), que se dispersan con relativa rapidez. La concentración de SO_2 durante la erupción del 3 de junio en el volcán Fuego fue medida por diversos sensores instalados en satélites, como el sensor AIRS en el satélite Aqua y OMI/OMPS operados por la Administración Nacional Espacial y de Aeronáutica de la NASA (Estados Unidos). A partir de estos datos, el Dr. Simon Carn, de la MTU valoró que las concentraciones medidas (Figura 11c), a una altura de 8 km (troposfera), parecían ser las más altas registradas en el volcán de Fuego, desde que se dispone, en las últimas décadas, de estos métodos de detección (Earth Observatory, NASA, 2018).

FIGURA 11



4

FLUJOS PIROCLÁSTICOS (CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICAS)

Las erupciones del volcán de Fuego han producido también de forma frecuente flujos piroclásticos, mezclas turbulentas de gases y material volcánico que se desplazan por las laderas del volcán a grandes velocidades (de decenas a cientos de km/h) y a altas temperatura ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $300\text{ }^{\circ}\text{C}$), que pueden tener alcances de varios kilómetros. Van acompañados de una nube de gases y cenizas (nube acompañante, nube de fénix o nube ardiente) que se levanta desde el frente y la parte más densa del cuerpo del flujo piroclástico y que puede alcanzar varios kilómetros de altura (Figura 12).

FIGURA 12

Flujo piroclástico del volcán de Fuego del 3 de junio de 2018, con la nube de cenizas acompañante, visto desde Alotenango (Fotografía de Orlando Estrada, Agencia France-Presse, <http://focus.afp.com>)



Los flujos piroclásticos, como trágicamente pudo constatarse durante la reciente erupción del 3 de junio de 2018, son los fenómenos volcánicos más letales y causan la pérdida total de la infraestructura que se encuentran a su paso y la muerte casi súbita de las personas y animales por la inhalación de gas tóxico caliente. Normalmente los flujos piroclásticos se producen en uno de los flancos del volcán durante cada erupción, pero no es posible determinar cuál de ellos resultará afectado cuando la erupción inicia, por lo que es necesario establecer áreas de restricción total alrededor del cráter en todas las direcciones y desarrollar campañas de concientización y planes de prevención y mitigación en las comunidades del área de influencia del volcán para una respuesta óptima de la población (evacuación) ante estos fenómenos.

Los flujos piroclásticos se generan principalmente por tres mecanismos, todos ellos observados en el volcán de Fuego. En primer lugar, el colapso y derrumbe de los frentes de flujo de lava y otros materiales calientes sueltos ubicados en las laderas inestables de la cima del volcán, lo que comúnmente se ha denominado “avalanchas de rocas” en los boletines de INSIVUMEH. Otro mecanismo de generación es el denominado “boiling-over”, que se refiere al colapso de la fuente eruptiva desde poca altura respecto al cráter (jets de piroclastos). En este caso es más común que los flujos piroclásticos se distribuyan en varias de las barrancas al mismo tiempo. La tercera forma de generación de flujos piroclásticos, que ocurre especialmente en las erupciones más grandes, es el colapso parcial de columnas eruptivas superiores a los 10 km (Branney y Kokelaar, 2002). El colapso ocurre a alturas de 1,000 a 1,500 m del cuerpo de la columna eruptiva, lo cual confiere gran velocidad y energía al material volcánico que se derrumba.

No es posible conocer a priori en que sector de la columna se va a producir el colapso, pero en diversos volcanes del mundo se ha observado que preferencialmente ocurre donde los bordes del cráter tienen una cota topográfica menor. Acompañando a los flujos piroclásticos que se generan por “boling-over” o colapso de columna es muy común que se produzcan oleadas piroclásticas, mezclas de gas y ceniza fina muy caliente disparados por explosiones laterales (ondas de choque).

Los materiales resultantes de los flujos piroclásticos, que se denominan con el mismo nombre, son depósitos masivos de cenizas y bloques de tamaños diversos (algunos muy grandes), que pueden tener espesores de varios metros (hasta 10 m en Las Lajas durante la erupción del 3 de junio) y que se emplazan como cuerpos continuos en el interior de las barrancas, inicialmente como materiales poco consolidados (Figura 13). El frente y laterales de estos depósitos son rápidamente erosionados por el agua de lluvia y se inicia la formación de canales y regueros por donde es lavado el material. Los depósitos pueden preservar altas temperaturas por varias semanas, de forma que cuando entran en contacto con el agua humean.

FIGURA 13

Depósito frontal del flujo piroclástico emplazado en la barranca Seca el 3 de junio de 2018, en la confluencia con el río La Playa. Tuvo un alcance de 9 km y en la fotografía tiene un espesor algo superior a los 2 m. La fecha roja señala los canales y regueros que se forman en el frente del flujo por la erosión de las lluvias (foto tomada el 24 de julio de 2018).



Las erupciones más comunes del volcán de Fuego, de pequeña y moderada magnitud han producido flujos piroclásticos con alcances de hasta 8 km y con volúmenes máximos de 10 millones de m^3 . Sin embargo, en erupciones de mayor magnitud, como las de los años setentas y de junio de 2018, tuvieron alcances superiores a los 10 km y volúmenes mayores. Concretamente, en la erupción del 3 de junio de 2018 los flujos piroclásticos se emplazaron en el sistema de barrancas Seca-Santa Teresa, la barranca Ceniza, la barranca El Jute y la barranca Las Lajas, con alcances de 6 a más de 11 km (Tabla 1; Escobar, 2018).

Los de mayor volumen y alcance fueron los emplazados de las barrancas Seca, con 9 km de longitud (Figura 13 y 14) y los de la barranca Las Lajas, con un alcance de 11.7 km en línea recta desde el cráter y más de 12.5 km de recorrido (Figura 14 y 15). INSIVUMEH también reportó flujos piroclásticos de menor recorrido (4-6 km) en las barrancas Trinidad y Taniluyá. Las Lajas tenía una profundidad y un ancho medio de 80 y 50 m respectivamente antes de la erupción y fue rellenada en su totalidad.

Los pulsos posteriores al relleno de la barranca, a partir de las 14:00 h, se desbordaron en algunas secciones, en tramos superiores a 500 m y se depositaron sobre la margen izquierda (La Reunión) y sobre la margen derecha, alcanzando completamente la comunidad de San Miguel Los Lotes (Figura 14) y parcialmente las comunidades del Rodeo y La Reyna, al suroeste de Las Lajas, ignorando por completo la topografía.

El volumen promedio de los depósitos de flujo piroclástico emplazados en la barranca Las Lajas y en las zonas donde se desbordó se estimó en 24 millones de m^3 , más del doble del promedio de los flujos piroclásticos que se habían registrado desde 1999 (Tabla 1, Escobar, 2018). Con base en imágenes de alta resolución y de forma preliminar la hipótesis planteada para explicar la formación de este flujo piroclástico tan voluminoso es que se trató de un evento generado por el colapso de columna eruptiva, que en su caída impactó y arrastró un volumen considerable de materiales fragmentados y sueltos presentes en la cima del volcán, concretamente en una depresión con forma de anfiteatro en la cabecera de la quebrada Las Lajas (Escobar, comunicación personal). Los volúmenes de los depósitos de flujo piroclástico emplazados en las otras barrancas (Ceniza, El Jute y Seca/Santa Teresa) van de 4 a 14 millones de m^3 (Tabla 1). Los volúmenes de los flujos emplazados en las barrancas Taniluyá y Trinidad fueron menores, con estimaciones preliminares de 3 millones de m^3 (INSIVUMEH, 2018).



TABLA 1

Estimaciones de los volúmenes de depósitos de flujo piroclástico principales generados durante la erupción del 3 de junio de 2018 (Escobar, 2018).

Barrancas	Facies	Alcance (km)	Área (m ²)	Espesor (m)			Volumen (x10 ⁶ m ³)		
				Min	Prom.*	Max	Min	Prom.*	Max
Las Lajas	Canal	11.7	1,240,040	5	15	25	6.2	18.6	31.0
Las Lajas	Desborde		1,118,591	1	5	10	1.1	5.6	11.2
El Jute	Canal	6	294,160	5	15	25	1.5	4.4	7.4
Ceniza	Canal	8.5	411,429	5	15	25	2.1	6.2	10.3
Sta. Teresa / Seca	Canal	9	778,761	5	15	25	3.9	11.7	19.5
Sta. Teresa / Seca	Desborde		516,078	1	5	10	0.5	2.6	5.2
Total							15.3	49.0	84.5

*Prom.= promedio

FIGURA 14

Mapa de las áreas afectadas por el paso de los principales flujos piroclásticos de la erupción del 3 de junio de 2018 (*datos de Escobar, 2018*). Se indican también las áreas donde se emplazaron los depósitos de flujo piroclástico en el interior de las barrancas y los que se desbordaron de los cauces.

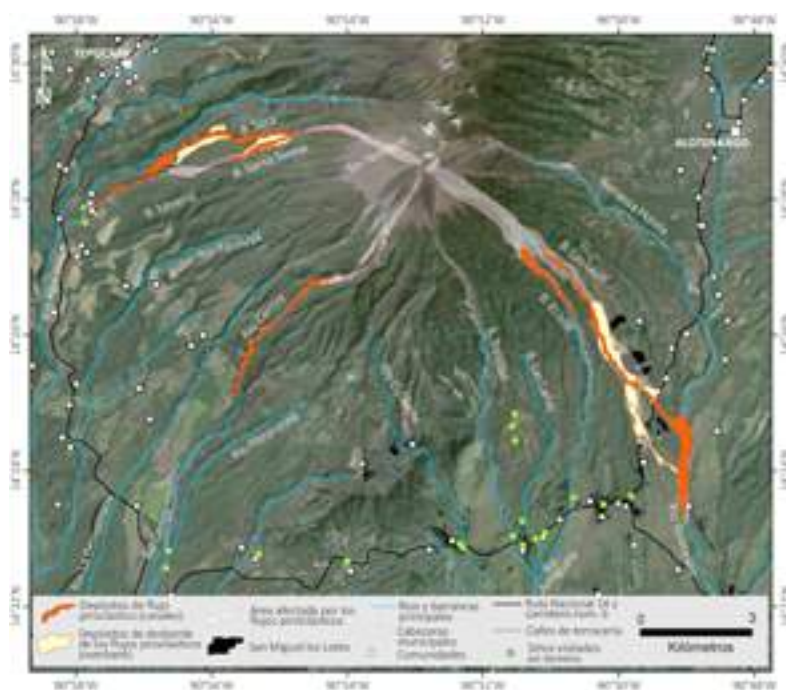


FIGURA 15

En la imagen puede observarse el impacto de los depósitos de flujo piroclástico en la comunidad San Miguel Los Lotes (*fotografía Carla Chun, INSIVUMEH, agosto 2018*).

Panorámica de la barranca las Lajas donde se emplazaron los depósitos de flujo piroclástico más voluminosos durante la erupción del 3 de junio de 2018. Puede observarse que la vegetación en los márgenes del flujo piroclástico quedó completamente cubierta por ceniza procedente de la nube acompañante de los flujos piroclásticos.



Para el conjunto del volcán se estima de forma conservadora que el volumen de materiales emitidos durante la erupción del 3 de junio en forma de flujos piroclásticos es cercano a los 50 millones de m³. Es importante mencionar que no todo este volumen de materiales será removilizado como lahares, sino solo una parte de ellos (ver apartado siguiente).

Más allá de la afectación en las barrancas y las zonas de desborde, la nube de cenizas acompañante de los flujos piroclásticos también generó impactos en una franja de varias decenas de metros a partir del perímetro de las barrancas (Figura 15). Estas zonas, en el momento del paso del flujo piroclástico son invadidas por la nube de gases y cenizas finas muy calientes. Estas cenizas se depositan sobre la vegetación con espesores de milímetros a centímetros.

5

LAHARES

Durante los períodos de lluvia posteriores a una erupción, los materiales volcánicos acumulados en las laderas del volcán (por la erupción reciente y otras anteriores), se movilizan para formar flujos de escombros y lodo, conocidos como lahares, que se transportan y emplazan en la red hídrica del volcán, normalmente en las barrancas más activas. Según la cantidad, tipo y proporción de sólidos (materiales volcánicos) y fluido (agua) en un lahar, varía su comportamiento y forma de transporte. Los flujos más concentrados, los flujos de escombros, tienen una proporción de sólidos en entre el 60-90% en volumen (80-90% en peso), mientras que los más diluidos, los flujos hiperconcentrados, tienen una proporción de volumen de sólidos en el rango del 20-60% (40-80% en peso). Cuando la concentración de sólidos es menor al 20%, es decir la proporción de fluido es predominante, se habla de que el agua está cargada de sedimentos (Iverson, 1997, Fagents y Baloga, 2006).

FIGURA 16

Lahar en la barranca Las Lajas del 10 de agosto de 2018. El material todavía caliente de los flujos piroclásticos es arrastrado por el agua de lluvia, de forma que la superficie del lahar se observa humeante (Fotografía de Carla Chung, INSIVUMEH, agosto 2018).



Conforme la concentración de sólidos se incrementa, la turbulencia en el flujo disminuye y comienza a comportarse como una masa plástica, coherente, como si fuera una mezcla de concreto (Pierson y Costa, 1987), con capacidad de transportar grandes bloques de roca y troncos de árboles por flotabilidad.

Los lahares pueden provocar destrucción de infraestructura de carreteras, puentes y viviendas por impacto, arrastre y sepultamiento. Además, generan la modificación y llenado de los cauces, de forma que en algunas zonas y puntos críticos pueden generar la migración de los canales de un cauce a otro cercano. La definición de las zonas susceptibles a ser inundadas por la ocurrencia de lahares es de fundamental importancia para el ordenamiento territorial y la implementación de medidas de mitigación.



En el volcán de Fuego, por su permanente actividad eruptiva y la disponibilidad de materiales volcánicos fragmentados, los lahares se producen prácticamente cada año durante la época de lluvias (Figura 16).

Los lahares pueden ser de dos tipos (Escobar, 2013), tanto por su mecanismo de disparo, como por las formas de erosión del material volcánico suelto.

A

LAHARES GENERADOS POR EROSIÓN DE BARRANCAS DURANTE LLUVIAS NORMALES

Estos lahares son generados por la erosión de las barrancas durante las precipitaciones normales de la época de lluvias, después de la ocurrencia de erupciones de moderada y gran magnitud, especialmente si en las barrancas se han emplazado depósitos nuevos de flujo piroclástico (aunque también pueden erosionarse los antiguos). Si los flujos se emplazan confinados en las barrancas, rápidamente empieza a actuar la erosión en los frentes y laterales de los depósitos tratando de restablecer las condiciones previas más estables (menor gradiente del canal). Un depósito de flujo piroclástico puede alimentar varios eventos de lahar en una misma barranca, sin embargo, la erosión va lavando el material disponible, de forma que sucesivamente se reducen el número y volumen de los lahares, si no hay nuevos aportes de material. En cambio, si los depósitos de flujo piroclástico han rellenado por completo la barranca donde se emplazaron y sobrepasan la altura de sus márgenes, la erosión inicia en el depósito, pero puede continuar hacia un canal externo tomando una nueva ruta, donde pueden encontrarse también depósitos de flujos piroclásticos nuevos y antiguos.

La duración de un evento de lahar individual está controlada por la duración de la lluvia que lo genera y puede ir desde 10 minutos para flujos de escombros pequeños hasta varias horas en el caso de los eventos más grandes. Cuando se erosionan flujos piroclásticos todavía calientes, los lahares pueden ser también calientes y emitir vapor, incluso varios meses después del emplazamiento de los flujos piroclásticos. Por lo general, el lahar desarrolla una oleada inicial fuerte que transporta troncos y bloques de roca en su frente, seguido de diversos pulsos en períodos de pocos minutos, que indican gran variabilidad en los picos de descarga en el tiempo que dura el lahar.



Las dimensiones y velocidades de los lahares varían ampliamente en función de que sector de las barrancas donde ocurren se esté observando, desde relativamente pequeños y lentos (<2 m de ancho y <1 m de profundidad y <2 m/s) hasta flujos muy grandes y rápidos (>40 m de ancho, >4 m de profundidad y >8 m/s). Las descargas máximas se estimaron entre <10 m³/s en flujos pequeños y >1000 m³/s para los flujos más grandes (Escobar, 2013).

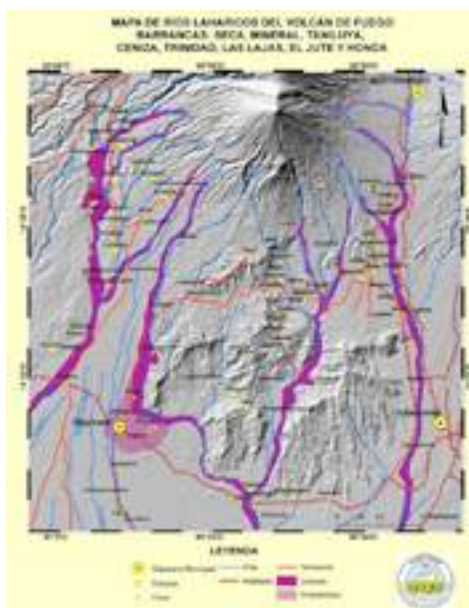
A medida que el lahar se transporta por las barrancas se va diluyendo por la incorporación de agua de lluvia y de las corrientes de barrancas tributarias, pasando de flujos de escombros a flujos hiperconcentrados y posteriormente aguas abajo a corrientes cargadas de sedimentos. En cualquier caso, el lahar sedimenta hasta que su velocidad decrece lo suficiente.

En el actual ciclo de actividad eruptiva (1999-presente), los lahares de mayor volumen generados por el mecanismo de erosión en barrancas se produjeron después de la actividad eruptiva de 2003 y de 2017.

En este último caso se generaron lahares en mayo y septiembre con recorridos de 10 a 15 km en las barrancas Seca, Mineral, Taniluyá, Ceniza, Trinidad, Las Lajas y Honda (Figura 17a). Los depósitos de los lahares de mayo de 2017 provocaron el desvío del cauce del río Ceniza, arriba de la comunidad Las Palmas (Siquinalá), hacia la margen izquierda, inundando el área del Campo Escuela Scoutt (Figura 17b, zona rayada en el mapa) y amagando con desviarse en otros puntos del río Ceniza aguas arriba, que fueron protegidos con bordas del mismo material del río. Además, cabe considerar la posibilidad de que se generen lahares de mayor magnitud, como ocurrió con posterioridad a la erupción de 1974, los cuales registraron longitudes de 10 a 15 km desde el frente de los flujos piroclásticos (hasta >20 km de la cima del volcán). Además de un mayor alcance, estos lahares generaron depósitos de materiales mucho más extensos que los observados hasta el momento en el actual ciclo de actividad volcánica para lahares del mismo tipo, e incluso mucho mayores que los producidos durante eventos de lluvia extremos, desbordándose y depositándose en zonas inter-fluviales y generando la modificación de cauces.

FIGURA 17

Mapa de los lahares ocurridos en las barrancas Seca, Mineral, Taniluyá, Ceniza, Trinidad, Las Lajas y Honda durante el mes de septiembre de 2017, después de abundantes precipitaciones (acumulados de 1,059 mm). Estos lahares afectaron numerosas calles de terracería (*Informe mensual de septiembre 2017, INSIVUMEH*).



El mismo día 3 de junio de 2018, en horas de la tarde, se produjeron los primeros lahares asociados directamente a la erupción, que pueden considerarse syn-eruptivos, por los ríos Mineral y Santa Emilia, afluentes del río Pantaleón y por las barrancas Taniluyá y Cenizas. En la semana posterior, se registran lluvias a partir del día 6 y posteriormente se reportan lahares post-eruptivos prácticamente todos los días hasta final del mes. Los de mayor alcance y volumen se registraron los días 9 y 10 de junio en las barrancas Seca y Ceniza, el 11 de junio en la barranca Las Lajas, el 14 de junio en las barrancas Teresa y río Mineral y los días 16 y 17 de junio se informa de un incremento del nivel de los ríos Pantaleón y Achiguate. Durante todo el mes de julio, coincidiendo con la canícula meteorológica, desciende la actividad de lahares, pero vuelven a registrarse a partir del día 2 de agosto hasta el momento, siendo en su mayoría de pequeña a moderada magnitud (centenares de miles de m³). El día 14 de agosto se indica que ocurrieron lahares moderados en las barrancas Las Lajas (Figura 16), Mineral y Seca, con un registro de lluvia en el flanco sureste (estación FUEGO-3) de 28 mm. Todos los reportes de lahares coinciden en que los flujos son concentrados, flujos de escombros con abundante material fino que los vuelve pastosos y con capacidad para transportar bloques de roca de grandes dimensiones (1-2 m de diámetro) y abundantes troncos de árboles.

Por el momento, estos lahares han removilizado volúmenes pequeños del material disponible en las barrancas (flujos piroclásticos de la erupción del 3 de junio y depósitos de flujos piroclásticos anteriores, generados en las erupciones de 2017 y de enero-febrero de 2018).



El volumen total de los lahares (agua + sólidos) individuales generados por erosión de las barrancas durante el actual ciclo eruptivo fue estimado en el orden de decenas de miles a centenares de miles de m^3 y volúmenes para el conjunto de la época de lluvias (numerosos eventos de lahar) de 1 a 3 millones de m^3 . Los alcances de estos flujos individuales han sido normalmente de entre 10 y 12 km, aunque los lahares producidos después de erupciones de mayor magnitud tuvieron alcances superiores a 15 km y en algunos casos hasta de 20 km, con capacidad de inundar extensas áreas.

B

LAHARES GENERADOS POR LLUVIAS EXTREMAS

Los lahares asociados a precipitaciones abundantes e intensas por la aproximación o cercanía de tormentas tropicales o huracanes (p. ej. Stan en octubre de 2005 y Agatha en mayo de 2010), se generan por la fluidificación de depósitos de derrubios emplazados en la cabecera de las barrancas debido al deslizamiento de las laderas inestables de la parte alta del volcán de Fuego (también de otros volcanes, como Agua y de otros tipos de cerros). Estos materiales, saturados en agua, fluyen en forma de lahares, normalmente más diluidos que los generados por eventos de lluvias normales. Aunque también es posible reconocer pulsos en la formación de estos lahares, generalmente en la parte más intensa de la tormenta se comportan como un flujo continuo, que puede durar varias horas.

Los lahares generados de esta forma son altamente erosivos en los tramos superiores de las barrancas donde la pendiente es mayor (forman terrazas y saltos) y depositan sus materiales cuando encuentran un cambio pronunciado de la pendiente (Figura 1), donde el flujo se ensancha y sale del canal inundando los terrenos adyacentes.



Estos eventos extremos producen un gran número de lahares individuales, no solo en las barrancas más activas sino también en otras que normalmente no presentan actividad. En este caso el volumen de los lahares está controlado por el volumen inicial deslizado en las partes altas del volcán. El volumen de los lahares individuales puede ser en el rango de varios millones de m^3 hasta ~ 20 millones de m^3 , sin embargo, la ocurrencia de varios eventos durante la duración del evento de lluvia extremo puede dar lugar a que los lahares tengan alcances e inunden áreas que corresponderían a la afectación de un lahar de varias decenas de millones de m^3 .



ESCENARIOS DE AMENAZA POR ACTIVIDAD VOLCÁNICA



Con base en el conjunto del registro eruptivo, pero especialmente en la información sobre el actual período de actividad eruptiva (1999-2018) y el anterior durante los años setentas, se conoce que el volcán de Fuego presenta una gran variabilidad de fenómenos volcánicos durante erupciones de diferente estilo y magnitud, que generan también productos diversos.

A raíz de la crisis eruptiva reciente se han definido escenarios de amenaza y producido los mapas correspondientes para los procesos volcánicos más frecuentes: flujos piroclásticos y lahares. Para el caso de los flujos piroclásticos se han considerado dos diferentes magnitudes de las erupciones que podrían producirlos. Para el caso de los lahares se han considerado los dos tipos de mecanismo disparadores, los lahares generados por precipitaciones normales y los generados por eventos de lluvia extremos.

Ciertamente, los lahares pueden producirse también sin actividad eruptiva en curso o después de varios meses de haber ocurrido una erupción y los impactos que generan normalmente son sentidos a distancias mucho mayores del volcán, que el impacto de los diferentes productos de la actividad eruptiva. Por ello, frecuentemente se tratan como un problema individualizado (ver sección siguiente). Sin embargo, es necesario no perder de vista que el volcán de Fuego está activo y que, en cualquier momento durante los próximas semanas o meses, de forma simultánea a la ocurrencia de lahares, puede ocurrir una nueva erupción. Esta futura erupción será, con probabilidad, de pequeña o moderada magnitud, como la mayoría de las ocurridas en los últimos 20 años, pero no puede descartarse un evento eruptivo de una magnitud similar a la ocurrida el 3 de junio de este año o incluso mayor. Es indispensable, por tanto, pensar en términos de escenarios, para identificar, no solo a las comunidades que son más susceptibles a ser afectadas, sino también para la planificación y ejecución de las medidas de prevención, mitigación y respuesta más adecuadas para la protección de la población frente al conjunto de amenazas posibles. Así, por ejemplo, acciones para la mejora de las calles de terracería que son afectadas frecuentemente por lahares pueden evitar que la población quede incomunicada y pueda mantener sus condiciones de vida, pero a la vez incentiva que los asentamientos permanezcan y crezcan en zonas de alta peligrosidad por flujos piroclásticos, donde la única forma de protegerse es la evacuación y donde sería deseable desincentivar el crecimiento de las poblaciones.

Sería necesario definir escenarios de amenaza volcánica según la magnitud de las erupciones posibles en el volcán de Fuego,

considerando todos los fenómenos volcánicos que podrían producirse, incluyendo los lahares asociados y producir los mapas correspondientes. En este sentido una de las comisiones del grupo internacional de expertos vulcanólogos que apoya al INSIVUMEH está orientada a la elaboración del Árbol de Probabilidad de Eventos, basados en la propuesta de Escobar (2013) sobre el análisis de las erupciones del siglo XX y especialmente del actual ciclo de actividad, donde se plantea que el volcán Fuego presenta un comportamiento dual: una actividad continua o de fondo de baja magnitud y erupciones explosivas periódicas con diferente grado de explosividad y volumen de materiales expulsados.

Con base en este análisis y de forma preliminar, a continuación, se plantea una propuesta de escenarios generales de amenaza por actividad volcánica y generación de lahares, solo como referencia y para sintetizar los diferentes grados de magnitud de las erupciones posibles y los grados de peligro que conllevan. Se espera que, en las próximas semanas o meses, INSIVUMEH y el grupo de expertos elaboren una propuesta definitiva.

El volcán de Fuego presenta una actividad continua (o de fondo), con erupciones explosivas de pequeña magnitud (estrombolianas y/o vulcanianas) que generan pulsos de gases y cenizas o columnas eruptivas inferiores a los 3 km, la dispersión de ceniza y la acumulación de material piroclástico (bloques y bombas volcánicas) entorno al cráter, formando en ocasiones pequeñas avalanchas de escombros que ruedan por las inclinadas pendientes del volcán. También pueden presentarse erupciones puramente efusivas que producen fuentes de lava de centenas de metros de altura y flujos de lava de corto recorrido (de cientos de metros a pocos kilómetros). En promedio, estas erupciones de pequeña magnitud emiten volúmenes alrededor de 1 millón de m³ de material volcánico y se clasifican en su mayoría con un VEI inferior a 2. Es poco frecuente que durante este tipo de actividad se produzcan flujos piroclásticos, pero de ocurrir son de pequeño volumen y se confinan en el interior de alguna de las principales barrancas en el volcán, pero no de forma generalizada.



Intercaladas con esta actividad continua o de fondo, se producen de forma intermitente y periódica, erupciones explosivas vulcanianas de moderada y gran magnitud. Mayoritariamente estas erupciones sobre el nivel de base han tenido VEI ~2 y han emitido en su mayoría volúmenes de material volcánico entre 1 y 10 millones de m³, a partir de columnas eruptivas de alrededor de 5-6 km de altura sobre el cráter. Generan la caída y dispersión de ceniza, avalanchas de rocas en la parte alta del cono volcánico y flujos piroclásticos confinados en las barrancas activas del volcán, con alcances no superiores a los 7 km. Pueden producir también fases efusivas con emisión de flujos de lava. Este tipo de actividad, junto a la actividad permanente o de fondo puede ser considerado como el escenario de amenaza de menor magnitud y mayor probabilidad de ocurrencia (**escenario 1**). Erupciones de este tipo se producen con una recurrencia de días, pocas semanas o meses.

Sin embargo, también se han producido en el volcán erupciones de de VEI >2 (VEI=3 e incluso VEI=4), como las erupciones del 3 de junio de 2018 o la de octubre de 1974 respectivamente. Estas erupciones de tipo vulcaniano, e incluso sub-pliniano, generan columnas eruptivas más altas (de 5 a >15 km de altura sobre el cráter) y la dispersión y caída de tefra y lapilli en áreas extensas alrededor del volcán. También se produce la emisión y caída de una mayor cantidad de fragmentos balísticos que se acumulan a una mayor distancia del centro emisor y la generación de flujos piroclásticos de volúmenes variables que se emplazan en el interior de las barrancas hasta distancias de 7-8 km en promedio, pero que pueden superar los 10 km en las erupciones de mayor magnitud. Durante las temporadas de lluvias que siguen a una erupción de este tipo se producen lahares con alcances de varios kilómetros pudiendo afectar diversas zonas de la cuenca media de los ríos. Algunas de estas erupciones explosivas desencadenaron crisis que involucraron la evacuación de personas de las comunidades cercanas. Del conjunto de erupciones de mayor explosividad en el volcán Fuego, pueden distinguirse otros dos escenarios posibles.



Un escenario de magnitud y probabilidad de ocurrencia intermedia (**escenario 2**), con erupciones vulcanianas de moderada magnitud y alta intensidad, de $VEI > 2$ y hasta $VEI = 3$. En estas erupciones la columna eruptiva puede superar los 10 km de altura y tener capacidad para dispersar cenizas hasta cientos de kilómetros del volcán, con depósitos de tefra y ceniza en un radio de 25 a 30 km. Se generan flujos piroclásticos con volúmenes promedio de 10 a 25 millones de m^3 , en varias direcciones entorno al cráter del volcán, con alcances promedio de 7-8 km, algunos de ellos con capacidad de azolvar las barrancas y desbordarse en algunos tramos. La erupción genera ondas de choque y oleadas piroclásticas. Se producen diversos eventos de lahar durante la temporada de lluvias posterior a la erupción, con volúmenes para cada evento de 500,000 hasta 3 millones de m^3 .

La erupción tipo para este escenario sería una similar a la ocurrida el 3 de junio de 2018, la cual debería ser considerado por la CONRED y las instancias que conforman el sistema de protección civil, incluidas las comunidades, como el nivel de magnitud mínimo frente al cual organizar y articular todas las acciones de prevención, mitigación y preparación. Este escenario se ha registrado en el volcán de Fuego con una recurrencia de pocos años (ciclo de actividad de los setentas) hasta decenas de años.

El tercer escenario, de mayor magnitud y menor probabilidad de ocurrencia (**escenario 3**) correspondería a una erupción vulcaniana o sub-pliniana de gran explosividad e intensidad, con VEI >3, como la ocurrida en octubre de 1974. En este caso las columnas eruptivas podrían ser mayores a 15 kilómetros sobre el cráter, generando depósitos de caída de tefra y cenizas de varios centímetros de espesor, hasta 50 km del cráter del volcán y la dispersión de la ceniza en un radio mayor a 200 km. La emisión y caída de fragmentos balísticos ocurriría en mayor cantidad que en escenarios más pequeños y algunos de ellos podrían tener alcances de hasta 5 km desde el cráter. Se producirían flujos piroclásticos de volúmenes superiores a los 25 millones de m³, en todas las barrancas del volcán, con alcances mínimos de 10 km, llenando la mayoría de los cauces y provocando su desborde. Asociados a los flujos piroclásticos también se depositarían oleadas piroclásticas. Los lahares asociados a la erosión de estos flujos podrían tener alcances superiores a los 10 km (más de 20 km de la cima del volcán) y se producirían de forma generalizada. Tendrían volúmenes de algunos millones de m³ para cada lahar individual, pero podrían alcanzar volúmenes de varias decenas de millones de m³ para una misma temporada de lluvias. Aunque no se ha realizado un análisis estadístico de la recurrencia de este tipo de erupciones, un estimado basado en el historial eruptivo indica que han ocurrido en el volcán de Fuego al menos una vez en períodos de 80 a 125 años.

Los escenarios de amenaza volcánica por flujos piroclásticos que se han definido a raíz de la actual crisis eruptiva y para los cuales se han generado mapas de amenaza (ver sección de mapas de amenaza), corresponden al escenario 2 y 3 descritos en esta sección. Para el caso de la amenaza por lahares, los escenarios se han establecido según las condiciones meteorológicas en el volcán de Fuego (ver sección siguiente), pero en cada caso se ha considerado un rango muy amplio de volúmenes de materiales volcánicos que podrían ser removilizados y que cubrirían las condiciones en el volcán en caso de producirse erupciones de diferente magnitud como las descritas para los escenarios 1, 2 y 3.



ESCENARIOS DE AMENAZA POR LAHARES. ZONAS CRÍTICAS

La generación de nuevos lahares durante las próximas semanas por el volumen de materiales volcánicos disponibles en la parte alta del volcán es la principal preocupación de las diversas instituciones gubernamentales y de cooperación trabajando en la crisis del volcán de Fuego. En su boletín informativo del 17 de julio de 2018, la CONRED identificó con amenaza alta, media y baja por descenso de lahares a 178 comunidades de los departamentos de Chimaltenango (15 comunidades del municipio de Yepocapa), Escuintla (152 comunidades de los municipios de Escuintla, Siquinalá, Santa Lucía Cotzumalguapa, La Democracia y Masagua) y Sacatepéquez (11 comunidades de Alotenango). Adicional a las comunidades con amenaza a lahares, también se consideran 69 comunidades en áreas cercanas a los ríos Achiguate, Acomé, Pantaleón y Coyolate, localizadas en el departamento de Escuintla, que podrían sufrir inundaciones, por el incremento de los caudales de escorrentía.

En esta sección se discuten los volúmenes de materiales que pueden ser removilizados después de la erupción del 3 de junio y los escenarios de amenaza y riesgo que se derivan de ello, con énfasis en zonas críticas que podrían ser afectadas por la deposición de volúmenes de sedimentos considerables y la modificación del curso de los cauces.



INSIVUMEH, junto al grupo de expertos internacional definió los escenarios de amenaza por lahares con base en la cantidad y tipo de lluvias que pueden esperarse en el volcán de Fuego. Las lluvias como mecanismo disparador condicionan la forma de erosión de las barrancas y el volumen de materiales volcánicos que pueden ser removilizados y por tanto el volumen y alcance de los flujos de escombros resultantes. Los estudios de Escobar (2013) para la caracterización de los lahares ocurridos durante el actual ciclo de actividad eruptiva y la estimación de los volúmenes de material volcánico depositado por la erupción del 3 de junio de 2018 se utilizaron de referencia para establecer dos escenarios posibles: A) amenaza de lahares por lluvias moderadas (precipitaciones normales de la temporada de lluvias) y B) amenaza de lahares por lluvias muy intensas (asociadas a eventos hidrometeorológicos extremos), para los cuales se produjeron los mapas de amenaza preliminares correspondientes, durante el mes de junio de 2018.

Posteriormente el grupo de expertos internacional, junto a INSIVUMEH, ha continuado trabajando para refinar estos mapas, tanto en el cálculo más preciso de los volúmenes y características de los materiales disponibles en las cabeceras de diferentes barrancas del volcán (Escobar, 2018) y en la obtención de nuevos modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) para algunos de los cauces principales, de mejor resolución que los actualmente disponibles (ver sección siguiente).



1

VOLÚMENES DE MATERIAL VOLCÁNICO EMPLAZADOS DURANTE LA ERUPCIÓN DEL 3 DE JUNIO DE 2018

La erupción de 3 de junio de 2018 emitió volúmenes de varias decenas de millones de m^3 de material piroclástico, a través de la caída de piroclastos y ceniza desde la columna eruptiva, con un mínimo estimado de ~ 20 millones m^3 sobre el edificio volcánico y por el emplazamiento de flujos piroclásticos, los de mayor volumen en las barrancas Seca, Ceniza y Las Lajas, con un total estimado promedio de 50 millones de m^3 y máximo de 85 millones de m^3 (Escobar, 2018).

Estos materiales están distribuidos en las cabeceras y el curso de los canales de las barrancas principales y en el caso de las barrancas Las Lajas y Seca, donde los flujos piroclásticos se desbordaron, también en sus márgenes. En la tabla 2 se resumen los datos sobre volúmenes de materiales volcánicos depositados en cada una de las barrancas, calculados preliminarmente por el INSIVUMEH y por Escobar (2018) y se incluyen los volúmenes reportados por el INSIVUMEH de los flujos piroclásticos de la erupción del 31 de enero-1 de febrero de 2018 para las barrancas Seca y Honda.

TABLA 2

Volúmenes de materiales piroclásticos depositados en las barrancas del volcán de Fuego por la actividad eruptiva reciente.

Barrancas	Longitud flujos piroc. (km)	Volumen flujos piroclásticos ($\times 10^6 \text{ m}^3$)		Ceniza promedio ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Volúmenes totales
		3 de junio 2018	Ene – Feb 18		
		Promedio	Máximo		
Las Lajas	11.7	24.2	42.2	0.12	42.3
Las Lajas	9	14.3	24.7	0.20	25.5
El Jute	2	4.4	7.4	0.05	7.5
Trinidad	5	3.0	5.1	0.07	5.2
Ceniza	8.5	6.2	10.3	0.1	10.4
Taniluyá	4	4.0	6.8	0.1	6.9
Honda*	5.7			0.12	3.9
Volumen Total		56.1	96.5	0.8	101.7

* La longitud reportada es para el flujo piroclástico de enero – febrero 2018

Considerando una situación extrema, donde además del volumen de los depósitos de material piroclástico nuevo se removieran también otros más antiguos, el volumen de materiales en el interior de una barranca que deberían ser erosionados para formar o vaciar un canal completamente puede calcularse tomando en cuenta los valores de su tamaño promedio y máximo (longitud, profundidad y ancho). Escobar (2018) considera valores promedio y máximos de 6-8 km de longitud, 50-100 m de ancho y 20-40 m de profundidad y calcula un volumen de 6 a 32 millones de m^3 que deberían removerse en su totalidad. Pero este proceso no ocurre de una sola vez, sino que se distribuye en muchos eventos, a partir de la generación de decenas a cientos de lahares individuales durante la época de lluvias.

Los lahares individuales tendrán volúmenes mucho menores que el volumen total de materiales volcánicos disponibles. El factor limitante del volumen de cada uno de los lahares individuales es la cantidad de agua disponible, que principalmente proviene de las lluvias (en menores cantidades puede provenir de la saturación del material). Recordemos que los flujos más concentrados, los flujos de escombros, tienen una carga de material sólido del 60 al 90% en volumen. Si consideramos un promedio de carga sólida del 70% (caso extremo para el volcán de Fuego) para un lahar, es decir solo un 30% del volumen es agua, entonces, por ejemplo, la formación de un lahar de un millón de m^3 , implicaría la removilización de 700,000 m^3 de material sólido y requeriría una cantidad de lluvia de 300,000 m^3 .

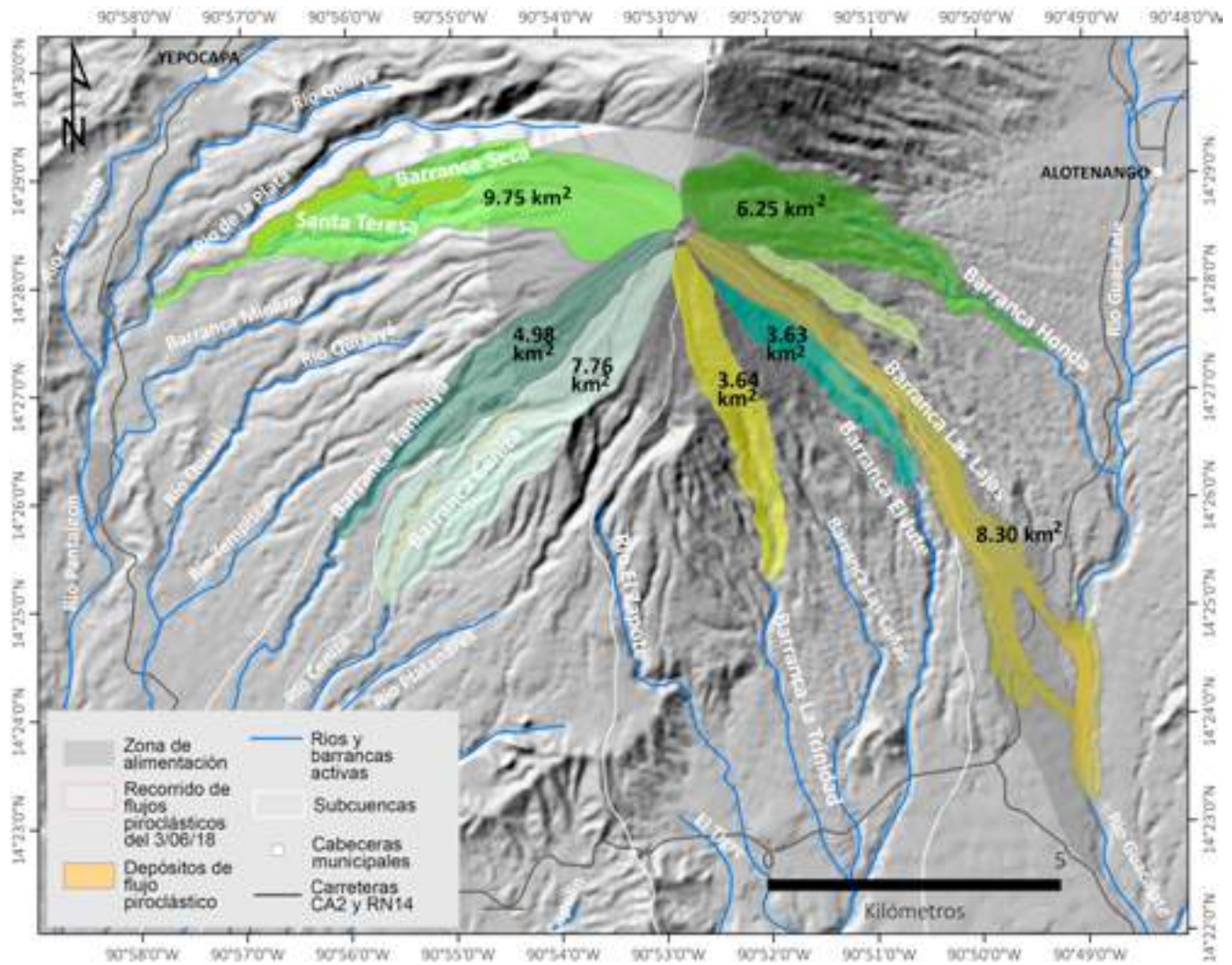
Los lahares se comportan de forma predominantemente erosiva en las zonas de mayor pendiente del cono volcánico, donde erosionan los materiales que rellenan los cauces y cambian a un régimen de sedimentación cuando reducen su velocidad, lo que suele ocurrir al encontrar cambios de pendiente abruptos. A medida que se produce el proceso de sedimentación y por la incorporación de nuevas corrientes de agua, el lahar se vuelve menos concentrado hasta convertirse en una corriente fluvial cargada de sedimentos (<20% de carga sólida).

La zona de alimentación de los lahares, donde se comporta de forma predominantemente erosiva, ocupa la parte más alta del cono volcánico hasta aproximadamente las cotas 1,300-1,800 msnm (3.5 a 4 km de la cima), donde la pendiente es superior a los 20°. En esta zona nacen las barrancas del volcán de Fuego (entre 2,500 y 2,700 msnm) y hasta su límite inferior ninguna barranca tiene cauces permanentes. Para cada barranca, es en este sector donde se recoge el agua de lluvia (áreas de captación) que dará lugar a la formación de lahares. Por la ocurrencia de la erupción del 3 de junio las zonas de captación de agua de lluvia o áreas de drenaje se extendieron a cotas más bajas (entre 800 y 1000 msnm) en las barrancas donde el volumen y alcance de los flujos piroclásticos fue mayor (Seca-Sta. Teresa, Ceniza y Las Lajas/El Jute), así como a las zonas en sus márgenes donde se produjo desborde de materiales y que también deben considerarse como áreas susceptibles de erosión. El volumen de los lahares dependerá de la cantidad de lluvia que se recoja en estas zonas de erosión o áreas de captación (Figura 18), que fueron estimadas con base a los trabajos de Escobar (2018) y la Dra. Lucia Capra del Centro de Geociencias de la UNAM. En la parte más alta del cono volcánico, las áreas de captación son de entre 2 y 6 km², sin embargo, las áreas de captación extendidas alcanzan los 8 km² en el caso de la barranca Las Lajas y casi los 10 km² en el caso de la barranca Seca-Santa Teresa.

El lahar sedimenta hasta que su velocidad decrece suficientemente, lo que suele ocurrir en los cambios de pendiente fuertes. En el volcán de Fuego esto ocurre usualmente entre las cotas 800-1,200 msnm, por debajo de las cuales la pendiente es inferior a los 15° (10° - 15°) y los canales empiezan a concentrar corrientes permanentes, amplían sus áreas transversales, se profundizan (hasta los 100 m en algunos casos) y se ensanchan (hasta los 150 m). En esta zona los lahares dejan de ser predominantemente erosivos para empezar a depositar sedimentos, proceso que continúa ocurriendo aguas abajo hasta las llanuras aluviales y fluviales en función del volumen de cada lahar.

FIGURA 18

Áreas de captación preliminares de las principales barrancas activas en el volcán de Fuego. Los límites de estas áreas se establecieron a partir de la información sobre límites de subcuencas y microcuencas y de la delimitación del alcance de los depósitos de flujos piroclásticos emplazados durante la erupción del 3 de junio de 2018.



2

PRECIPITACIONES EN EL VOLCÁN DE FUEGO

La pluviometría media anual en el volcán de Fuego es de 3,000 a 4,000 mm, considerando un régimen de precipitación normal y hasta de 6000 mm con la entrada o cercanía de depresiones tropicales o huracanes. Para la época de lluvias, con precipitaciones normales, la media diaria oscila de 16 a 25 mm, según si se consideran los seis meses de la época de lluvias o solamente cinco, excluyendo el mes de julio donde predomina una situación de canícula con muy pocas precipitaciones.

Los datos de precipitaciones se pueden obtener casi en tiempo real de las redes de estaciones meteorológicas del INSIVUMEH (<http://www.insivumeh.gob.gt:8080/redhidromet/default1.aspx>) y del ICC (<https://redmet.icc.org.gt/>). Las estaciones más cercanas al volcán son para el caso del INSIVUMEH la situada en el observatorio vulcanológico en Panimaché (OVFUEGO/PANIMACHE) y la de Antigua Guatemala (ANTIGUA GUATEMALA) y para la red del ICC las del Ingenio Concepción, en las laderas de Volcán de Agua, inmediatamente al norte de Escuintla y la estación El Platanar, cerca de la ciudad de Acatenango. Estas estaciones cubren el volcán desde diferentes direcciones, aunque ninguna es cercana a las áreas potenciales de generación de lahares.

Cabe mencionar que desde julio de este año la CONRED, el INSIVUMEH y el ICC inspeccionan sitios en la parte alta de las cuencas de los ríos Pantaleón, Achiguate y Guacalate (laderas del volcán de Fuego) para la densificación de la red de estaciones meteorológicas. Por otra parte, la Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos del INSIVUMEH dispone recientemente de medidores de precipitación en las nuevas estaciones sísmicas y de infrasonido telemétricas que se instalaron con posterioridad a la erupción del 3 de junio en tres localizaciones de la cuenca del Guacalate (ver capítulo II de este informe).

Desde el inicio de la época de lluvias hasta el final del mes de julio las estaciones más cercanas al volcán (Panimaché y Concepción) habían registrado 1,000 mm de lluvia acumulada (Escobar, 2018). Esto equivale a 16 mm de lluvia media diaria. La acumulación de la precipitación media anual (3,000 a 4,000 mm) se alcanzará hasta fines de octubre, suponiendo que no ocurre la entrada de ningún fenómeno hidrometeorológico extremo. La Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos del INSIVUMEH informó de la ocurrencia de lahares en la barranca Las Lajas con un acumulado de lluvias de 28 mm, lo que parece indicar que durante estos primeros meses después de la erupción del 3 de junio, cantidades de lluvia un poco por encima de la media diaria pudieron desencadenar los lahares.

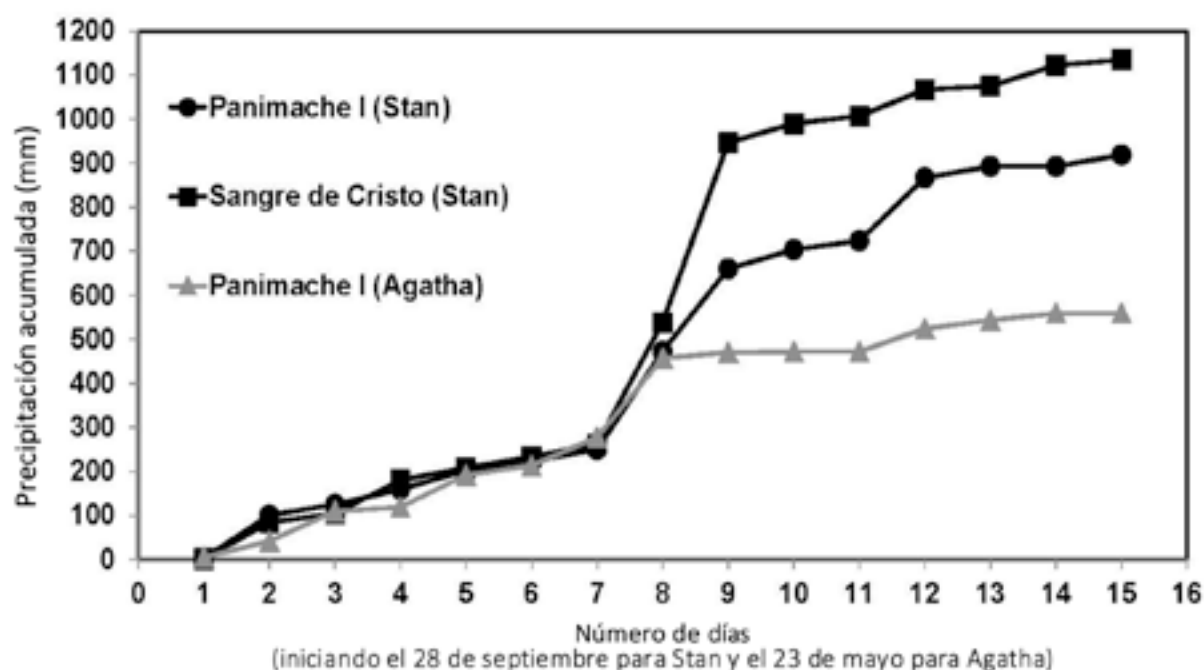


Adicionalmente, la Unidad de Meteorología del INSIVUMEH ha publicado una estimación de las relaciones duración-intensidad-frecuencia para diferentes lugares en Guatemala (<http://www.insivumeh.gob.gt/folletos/INFORME%20de%20intensidades%20de%20lluvia%20Guatemala.pdf>), a partir de la cual Escobar (2018) calculó preliminarmente las cantidades de precipitación para diferentes períodos de retorno que podrían esperarse para eventos de tormenta individuales, con duración de pocas horas, considerando un régimen de lluvias normal. Las cantidades máximas obtenidas para este tipo de tormentas son de 100 mm.

En el caso de eventos meteorológicos extremos, durante el huracán Stan en 2005, en los observatorios vulcanológicos del INSIVUMEH, en el flanco suroeste del volcán, se registró un acumulado de 1,100 mm durante los quince días posteriores al inicio del evento (Figura 19) y acumulados diarios entre 250 y 400 mm para los días 5 y 6 de octubre. Durante el huracán Agatha en 2010, desde el 23 de mayo se registró un acumulado quincenal de 550 mm (Figura 19) y un acumulado diario máximo de 179 mm el día 30 de mayo. Estas cantidades de lluvia son sustancialmente mayores que los promedios diarios de precipitación normal y de dos a cuatro veces más grandes que el máximo esperado para los eventos de tormenta normales de la época de lluvias.

FIGURA 19

Precipitación acumulada en los observatorios vulcanológicos del INSIVUMEH en Panimaché y Sangre de Cristo durante las tormentas tropicales Stan en 2005 y Agatha en 2010 (modificado de Escobar, 2013).



En resumen, los datos disponibles hasta el momento indican que cantidades máximas de 100 mm de precipitación deben considerarse posibles para un escenario de lluvias normales, mientras que para un escenario de lluvias intensas asociadas a eventos hidrometeorológicos extremos cabría esperar cantidades superiores con acumulados diarios entre 200 y 500 mm.

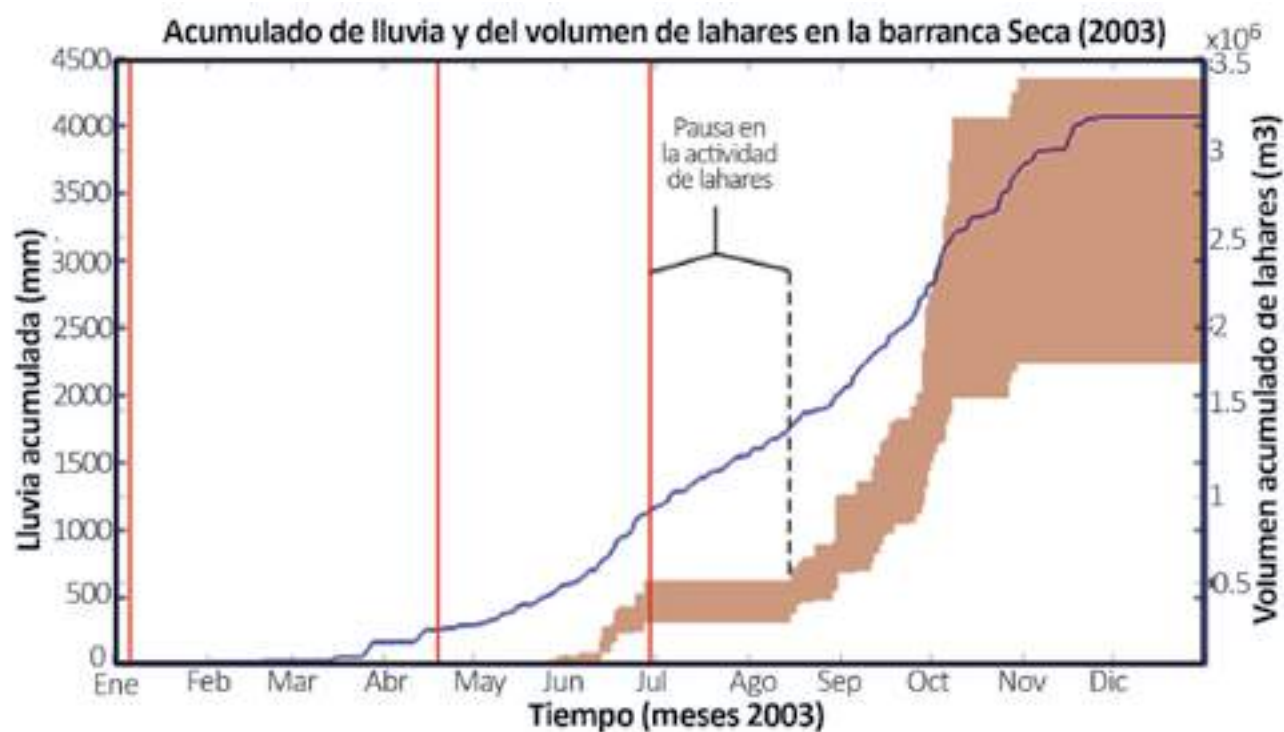
Sería de interés, aprovechando la experiencia del ICC en la obtención y análisis de datos meteorológicos y climáticos, que pudieran refinarse estas estimaciones sobre los máximos de lluvia para eventos de tormenta individuales, tanto en el caso de lluvias normales como de eventos extremos.

La actividad de lahares ha sido moderada durante los tres meses posteriores a la erupción del 3 de junio de este año y ausente durante el mes de julio por la condición de canícula meteorológica. En este período la cantidad de lluvia acumulada ha sido $\sim 1/3$ de la lluvia total que se espera se acumule para el conjunto de la temporada. Por ello, cabe esperar que en los dos próximos meses la generación de lahares se torne mucho más intensa (en cantidad y magnitud de los eventos). Escobar (2013) analiza un ejemplo que ilustra bien esta situación, la actividad de lahares en la barranca Seca durante la estación lluviosa de 2003, después del emplazamiento de flujos piroclásticos voluminosos. Durante ese año, aunque se registraron lluvias durante julio y agosto, la actividad de lahares fue mínima, mientras los depósitos se saturaban en agua o mientras que los primeros lahares erosionaban los depósitos de flujo piroclástico para excavar nuevos cauces. No es hasta mediados de agosto que la actividad de lahares se recupera y crece fuertemente durante septiembre y octubre (Figura 20).



FIGURA 20

Volumen acumulado de lahares a partir del recuento de los eventos registrados por el observatorio vulcanológico en Sangre de Cristo durante la temporada de lluvias de 2003 en la barranca Seca (bandas color café). La línea azul indica el registro de precipitaciones en este observatorio. Las líneas verticales rojas muestran las fechas de las erupciones de mayor magnitud de ese año (modificado de Escobar, 2013).



3

ESCENARIO A DE AMENAZA POR LAHARES (LLUVIAS MODERADAS)

El principal mecanismo de formación de lahares durante la época de lluvias es la erosión de barrancas donde los flujos piroclásticos han rellenado total o parcialmente los canales. La lluvia erosiona el frente y laterales de los depósitos de flujo piroclástico de forma que el cauce busca una situación de nuevo equilibrio.

Durante el actual ciclo de actividad volcánica, los volúmenes de los lahares individuales formados por erosión de las barrancas han sido habitualmente de decenas de miles a centenares de miles de m^3 , que sumados a lo largo de una época de lluvias completa pueden acumular entre 1 y 3 millones de m^3 .

Considerando las áreas de captación estimadas para las principales barrancas activas y lluvias de 25, 50 y 100 mm, consideradas posibles para la época de lluvias con un régimen normal (Tabla 3), se obtienen cantidades de agua máximas de 360,000 a 975,000 m³ según el área de captación de cada barranca, en el caso más extremo, pero en el rango de 90,000 a 350,000 m³ para cantidades de lluvia en el rango del promedio diario. En la Tabla 3 se muestran los volúmenes de los lahares que podrían generarse en caso de que el total de estas cantidades de lluvia constituyera el 30% del volumen del lahar (flujos de escombros con 70% de sólidos) y en la tabla 4 se estiman los volúmenes de los lahares en caso de que las cantidades de lluvia captadas contabilizaran como el 50% del volumen (flujos hiperconcentrados con 50% de material sólido).

TABLA 3

Volúmenes de lahares de tipo flujos de escombros en las barrancas del volcán de Fuego en un escenario de lluvias normales (suponiendo la incorporación del total de las precipitaciones, que contabilizan solo como un 30% del lahar)

Barrancas	Área		Precipitación	Volumen lahar	Precipitación	Volumen lahar	Precipitación	Volumen lahar
	m ²	km ²	25 mm	(70% sólidos)	50 mm	(70% sólidos)	100 mm	(70% sólidos)
Barranca Seca/Sta. Teresa	9751462	9.75	243,787	812,622	487,573	1,625,244	975,146	3,250,487
Barranca Honda	6246000	6.25	156,150	520,500	312,300	1,041,000	624,600	2,082,000
Las Lajas	8300000	8.30	207,500	691,667	415,000	1,383,333	830,000	2,766,667
El Jute	3635000	3.63	90,875	302,917	181,750	605,833	363,500	1,211,667
Trinidad	3636000	3.64	90,900	303,000	181,800	606,000	363,600	1,212,000
Ceniza	7759000	7.76	193,975	646,583	387,950	1,293,167	775,900	2,586,333
Taniluyá	4979000	4.98	124,475	414,917	248,950	829,833	497,900	1,659,667

TABLA 4

Volúmenes de lahares de tipo flujos hiperconcentrados en las barrancas del volcán de Fuego en un escenario de lluvias normales (suponiendo la incorporación del total de las precipitaciones, que contabilizan solo como un 50% del lahar)

Barrancas	Área		Precipitación	Volumen lahar	Precipitación	Volumen lahar	Precipitación	Volumen lahar
	m ²	km ²	25 mm	(50% sólidos)	50 mm	(50% sólidos)	100 mm	(50% sólidos)
Barranca Seca/Sta. Teresa	9751462	9.75	243,787	487,573	487,573	975,146	975,146	1,950,292
Barranca Honda	6246000	6.25	156,150	312,300	312,300	624,600	624,600	1,249,200
Quebrada de Agua	1167000	1.17	29,175	58,350	58,350	116,700	116,700	233,400
Las Lajas	8300000	8.30	207,500	415,000	415,000	830,000	830,000	1,660,000
El Jute	3635000	3.63	90,875	181,750	181,750	363,500	363,500	727,000
Trinidad	3636000	3.64	90,900	181,800	181,800	363,600	363,600	727,200
Ceniza	7759000	7.76	193,975	387,950	387,950	775,900	775,900	1,551,800
Taniluyá	4979000	4.98	124,475	248,950	248,950	497,900	497,900	995,800

TABLA 5

Volúmenes de lahares (flujos de escombros) en las barrancas del volcán Fuego en un escenario de lluvias intensas (eventos meteorológicos extremos) (suponiendo la incorporación del total de las precipitaciones, que contabilizan solo como un 30% del lahar)

Barrancas	Área		Precipitación	Volumen lahar	Precipitación	Volumen lahar	Precipitación	Volumen lahar	Precipitación	Volumen lahar
	m ²	km ²	200 mm	(70% sólidos)	300 mm	(70% sólidos)	400 mm	(70% sólidos)	500 mm	(70% sólidos)
Barranca Seca/Sta. Teresa	9751462	9.75	1,950,292	6,500,975	2,925,439	9,751,462	3,900,585	11,001,949	4,875,731	16,252,437
Barranca Honda	6246000	6.25	1,249,200	4,164,000	1,873,800	6,246,000	2,498,400	8,328,000	3,123,000	10,410,000
Las Lajas	8300000	8.30	1,660,000	5,533,333	2,490,000	8,300,000	3,320,000	11,066,667	4,150,000	13,833,333
El Jute	3635000	3.63	727,000	2,423,333	1,090,500	3,635,000	1,454,000	4,846,667	1,817,500	6,058,333
Trinidad	3636000	3.64	727,200	2,424,000	1,090,800	3,636,000	1,454,400	4,848,000	1,818,000	6,060,000
Ceniza	7759000	7.76	1,551,800	5,172,667	2,327,700	7,759,000	3,103,600	10,345,333	3,879,500	12,931,667
Taniluyá	4979000	4.98	995,800	3,319,333	1,493,700	4,979,000	1,991,600	6,638,667	2,489,500	8,298,333

TABLA 6

Volúmenes de lahares (flujos hiperconcentrados) en las barrancas del volcán Fuego en un escenario de lluvias intensas (eventos meteorológicos extremos) (suponiendo la incorporación del total de las precipitaciones, que contabilizan solo como un 50% del lahar)

Barrancas	Área		Precipitación	Volumen lahar	Precipitación	Volumen lahar	Precipitación	Volumen lahar	Precipitación	Volumen lahar
	m ²	km ²	200 mm	(50% sólidos)	300 mm	(50% sólidos)	400 mm	(50% sólidos)	500 mm	(50% sólidos)
Barranca Seca/Sta. Teresa	9751462	9.75	1,950,292	3,900,585	2,925,439	5,850,877	3,900,585	7,801,170	4,875,731	9,751,462
Barranca Honda	6246000	6.25	1,249,200	2,498,400	1,873,800	3,747,600	2,498,400	4,996,800	3,123,000	6,246,000
Las Lajas	8300000	8.30	1,660,000	3,320,000	2,490,000	4,980,000	3,320,000	6,640,000	4,150,000	8,300,000
El Jute	3635000	3.63	727,000	1,454,000	1,090,500	2,181,000	1,454,000	2,908,000	1,817,500	3,635,000
Trinidad	3636000	3.64	727,200	1,454,400	1,090,800	2,181,600	1,454,400	2,908,800	1,818,000	3,636,000
Ceniza	7759000	7.76	1,551,800	3,103,600	2,327,700	4,655,400	3,103,600	6,207,200	3,879,500	7,759,000
Taniluyá	4979000	4.98	995,800	1,991,600	1,493,700	2,987,400	1,991,600	3,983,200	2,489,500	4,979,000

Estos datos muestran que los volúmenes de los lahares estarán en un rango de centenares de millones de m^3 hasta máximos de 1 a 3 millones de m^3 en el caso de producirse lluvias alrededor de 100 mm.

El mapa preliminar de amenaza de inundación por lahares para este escenario elaborado recientemente (ver sección siguiente) considera la ocurrencia de lahares de 1, 5 y 15 millones de m^3 . Los alcances para lahares con 1 millón de m^3 están en el rango de 10 km desde la zona de alimentación. Para el caso de lahares hasta 5 m^3 , los alcances serían entre 12 y 15 km según las barrancas y afectarían zonas más amplias de los márgenes de los cauces. Los lahares con volúmenes de 15 millones de m^3 son improbables que ocurran para este escenario de lluvias normales, pero cubre las áreas que podrían resultar afectadas por la ocurrencia sucesiva de diversos lahares durante la temporada de precipitaciones.

Como se mencionó previamente, la duración de un evento de lahar individual está controlada por la duración de la lluvia que lo genera y puede ir desde 10 minutos para flujos de escombros pequeños hasta varias horas en el caso de los eventos más grandes. Normalmente el lahar desarrolla una oleada inicial fuerte que transporta troncos y bloques de roca en su frente, seguido de diversos pulsos en períodos de pocos minutos, que indican gran variabilidad en los picos de descarga en el tiempo que dura el lahar. Los lahares pueden ser humeantes durante varios meses cuando erosionan depósitos de flujo piroclástico recientes que preservan altas temperaturas en su interior.

4

ESCENARIO B DE AMENAZA POR LAHARES (LLUVIAS INTENSAS)

Los eventos hidrometeorológicos extremos (depresiones tropicales y huracanes) descargan cantidades de lluvia muy por encima del promedio diario y en ocasiones con alta intensidad (en pocas horas). Si ocurren en la parte final de la temporada de lluvias donde los terrenos están casi-saturados o saturados en agua, suelen generar deslizamientos en zonas de altas pendientes en todo el relieve nacional, incluidos los volcanes como Fuego. Los registros de lluvia en el volcán para este tipo de eventos en el pasado indica que es posible la descarga de cantidades de lluvia diaria superiores a 100 mm y hasta 500 mm. Estas condiciones de precipitación conllevan que los lahares que se generan a partir de ellos son más diluidos que los formados a partir de precipitaciones normales.

Las tablas 5 y 6 muestran las cantidades de lluvia en las áreas de captación consideradas para las diferentes barrancas en volcán de Fuego y los volúmenes de los lahares que podrían resultar por la removilización de materiales piroclásticos, en caso de flujos de escombros con un porcentaje de sólidos del 70% y en caso de flujos hiperconcentrados con un porcentaje de sólidos del 50%.

Los datos anteriores muestran que en el caso de lluvias extremas lahares con volúmenes de 5 a 8 millones de m^3 pueden ocurrir en algunas de las barrancas del volcán de Fuego, en especial en la barranca Las Lajas, Ceniza y el sistema de barrancas Seca-Santa Teresa. Para el caso extremos de lluvias diarias alrededor o superiores a los 500 mm, en estas barrancas sería posible que se generaran lahares de volúmenes superiores a los 10 millones de m^3 .

De estos datos también puede analizarse que la mayor limitante de los volúmenes de lahares para este caso es la cantidad de material disponible para ser removilizado. Así para el caso de las barrancas El Jute, la Trinidad y Honda, donde los materiales emplazados recientemente tienen menores volúmenes, en caso de precipitaciones superiores a los 400 mm, los volúmenes de los lahares serían menores que los indicados en las tablas 5 y 6.

Para el caso específico del río Guacalate, en el tramo desde la zona zero hasta su llegada a la cabecera municipal de Escuintla, debe considerarse que, en las condiciones de este escenario, además de los aportes de los posibles lahares formados en la ladera este del volcán de Fuego (barrancas Honda, Las Lajas y desborde de Las Lajas sobre San Miguel Los Lotes), podrían generarse otros en la ladera oeste y suroeste del volcán de Agua, donde las barrancas también tributan al río Guacalate.

El mapa preliminar de amenaza de inundación por lahares para este escenario (B) elaborado recientemente (ver sección siguiente) considera la ocurrencia de lahares de 10, 20 y 60 millones de m^3 .



5

ZONAS CRÍTICAS POR CAMBIOS EN LA MORFOLOGÍA DE LOS CAUCES

Para ambos escenarios, debe considerarse que la ocurrencia sucesiva de eventos de lahar durante la temporada de lluvias puede generar que los alcances de lahares individuales, tanto en términos de longitud como en extensión de áreas de sedimentación, sean mayores de lo que se esperaría por su volumen. Dicho de otra forma, las áreas afectadas por los lahares individuales durante todo el período de lluvias se suman parcialmente, un fenómeno que se conoce como agradación, de forma que pueden tener extensiones mayores a las esperadas. Este fenómeno modifica la morfología en diversas zonas de los canales de las barrancas más activas, erosionando en unas zonas (zonas de alimentación y zonas altas de las barrancas) y sedimentando en otras (cambios de pendiente), rellenando los canales y modificando sus márgenes, de forma que un nuevo evento de lahar se ve obligado a buscar un nuevo paso. Los principales fenómenos de cambio de morfología de los cauces son el desvío de los canales, la captura de las cabeceras de otras barrancas o el cambio de canales.

De esta forma nuevas zonas que antes no estaban expuestas a riesgo de lahares e inundaciones pueden estarlo bajo determinadas condiciones de ocurrencia sucesiva de lahares.

Mientras se mantienen las condiciones morfológicas de los cauces actuales, la evaluación de amenazas a través de simulaciones y la producción de mapas permite visualizar las áreas y poblaciones más expuestas. Existe la dificultad de incorporar en los mapas la problemática que puede suscitarse si se produce un cambio de morfología de los cauces debido a la agradación y a la erosión.

Con información de Escobar (2018) y a través de las visitas de campo a diferentes barrancas en las laderas sur y suroeste del volcán de Fuego se han identificado diversas zonas críticas donde pueden presentarse estos fenómenos, todas ellas en el Departamento de Escuintla (Figura 21).

■ BARRANCA LAS LAJAS

Durante el emplazamiento del flujo piroclástico en la erupción del 3 de junio ocurrió el cambio de canal y la captura de corriente en la barranca Las Lajas, en dos puntos hacia la margen derecha, sobre la cota ~1,850 msnm hacia la barranca El Jute y aguas abajo, en la cota ~1,040 msnm, en el punto de divergencia hacia San Miguel Los Lotes (Figura 21). Especialmente en ese último punto, si la erosión sigue profundizando este nuevo canal, los lahares podrían circular por canales próximos a las comunidades como San Jacinto Miramar, El Rodeo, La Esperanza y Santa Rosa y a otros tramos de la carretera RN14. En condiciones normales estas comunidades se encuentran en un alto entre el cauce del río Guacalate y la barranca El Jute que las protegía parcialmente de los impactos directos de los flujos. Estos nuevos canales tienen recorridos cortos hasta incorporarse al río Guacalate.

Durante el mes de junio, julio y agosto instancias de gobierno y empresas privadas realizaban obras en el sector del puente de la RN14 sobre la barranca Las Lajas para redirigir el canal a su camino habitual. En función de las condiciones meteorológicas y del volumen de los lahares que se generen depende el éxito de estas intervenciones. Sin embargo, evitar el cambio de canal en el punto de divergencia generado por el flujo piroclástico implica un proyecto de movilización de millones de m³ de materiales.

■ RÍO GUACALATE

Las barrancas Las Lajas y Honda confluyen con el río Guacalate en la cota ~850 msnm y ~1,000 msnm. Durante la erupción del 3 de junio, los depósitos distales de los flujos piroclásticos superaron el puente de la RN14 sobre la barranca las Lajas y parte de los materiales piroclásticos se emplazaron en el cauce del río Guacalate hasta 2.5 km aguas abajo de la confluencia, en las cercanías de la comunidad Monte María. El río Guacalate fluye hacia el sur circulando al oeste de la ciudad de Escuintla, cuyo sector norte se encuentra 6 km aguas abajo del punto más distal de los depósitos de flujo piroclástico. El transporte de sedimentos a través de lahares seguirá el curso del río y podrá alcanzar varios sectores con poblaciones y colonias cercanas a zonas críticas.

FIGURA 21

Puntos de divergencia de canales en la barranca Las Lajas producidos durante el emplazamiento del flujo piroclástico del 3 de junio de 2018 (flechas). Las líneas blancas continua y discontinua indican los cauces que algunos lahares podrían tomar de continuar la erosión sobre los materiales emplazados sobre San Miguel Los Lotes. Imagen de UNOSAT publicada el 7 de julio sobre una imagen satelital obtenida de Sentinel-2 el 4 de junio de 2018.

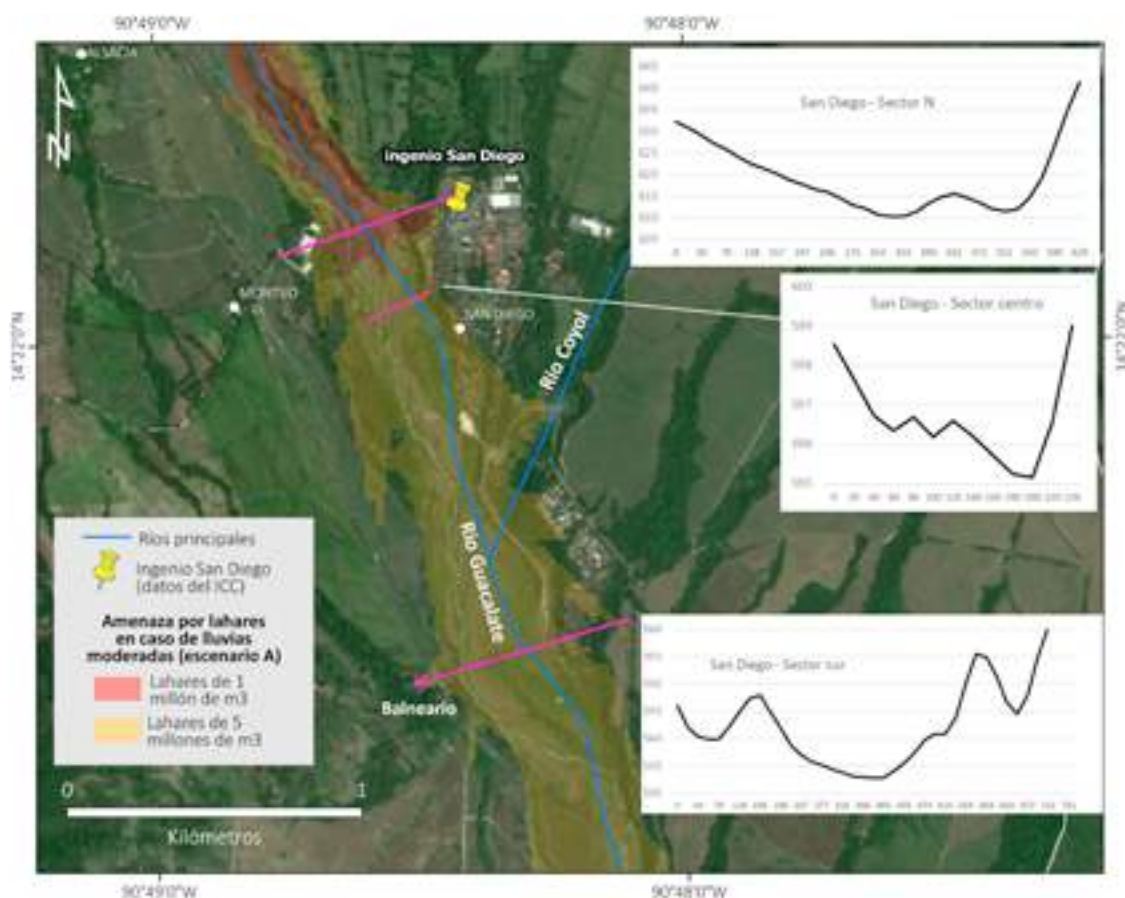
MEXICO



En este recorrido, entre 3.8 y 4 km aguas abajo de la parte distal de los flujos piroclásticos, en la margen izquierda del río se ubica la comunidad San Diego, donde se encuentra el ingenio del mismo nombre. En el sector sur de la población se produce la confluencia del río Coyol (que nace en el volcán de Agua) con el río Guacalate. A esa misma altura en la margen derecha se encuentra un balneario, aprovechando las aguas del río El Cantil. El cauce del río a su paso por San Diego tiene anchos entre 50 y 300 m aproximadamente y profundidades entre 5 y 20 m (Figura 22). La corriente circula por un canal cercano a la margen izquierda (paralelo y justo por debajo de la carretera RN14), pero su morfología indica que abandonó un cauce previo más cercano a la población, parcialmente rellenado de sedimentos aluviales y fluviales. En el sector del ingenio la diferencia de alturas con la base de estos cauces es de 20 a 25 m, pero en algunos sectores de la población más al sur es tan solo de 5 m, donde la construcción de viviendas ha invadido parcialmente el cauce.

FIGURA 22

Detalle del cauce del río Guacalate a su paso por la comunidad San Diego. Lahares de 1 a 5 millones de m³ podrían alcanzar este lugar. Los perfiles transversales del cauce del río muestran profundidades del canal actual y de uno paralelo abandonado entre 5 y 20 m. En la margen derecha se encuentran la carretera RN14 y en la izquierda la población. En su sector centro la comunidad ha invadido parcialmente el antiguo cauce del río por lo que puede ser impactado directamente por los lahares. La imagen de base fue obtenida del servidor World Imagery de ArcGis© 10.2.





El análisis de amenaza por lahares realizado por INSIVUMEH (2018) muestra que todo el sector puede ser alcanzado por lahares de 1 a 5 millones de m^3 , sin embargo, del actual análisis de amenaza no se obtiene la probable profundidad de los flujos de escombros o hiperconcentrados. La Dra. Lucia Capra del Centro de Geociencias de la UNAM del grupo internacional de expertos, en coordinación con el INSIVUMEH, realiza la modelación de lahares con diferentes volúmenes hasta 3 millones de m^3 con el software FLO-2D (O'Brien et al., 1993), el cual permite obtener además de las áreas de inundación, los posibles espesores de los flujos de escombros e hiperconcentrados. Se desconoce si estos trabajos serán sistemáticos y su actual avance, pero deberá darse seguimiento a estos trabajos, ya que la información que podrán proveer es muy relevante para la gestión de estas zonas críticas. Adicionalmente cabe mencionar que esta zona está señalada como probable zona de inundación en el análisis realizado por la CONRED en 2015 (Mapas de amenaza por deslizamientos e inundaciones de la SE-CONRED, ECHO y PNUD, ver Figura 23).

Adelante de este punto, aguas abajo, a la llegada del río Guacalate al norte de la ciudad de Escuintla, adicionalmente a la amenaza del paso de lahares por su canal actual (escenario A con volumen de lahares de 5 millones de m^3), existe el riesgo adicional que la sedimentación y la agradación puedan forzar un cambio de canal y captura de corrientes cuando el río cambia su patrón de drenaje respecto a cotas más altas. Por encima de ~ 500 msnm, la topografía produce un patrón de drenaje convergente hacia el río Guacalate, pero por debajo de 500 msnm el drenaje se desplaza hacia el amplio abanico aluvial de Escuintla, con un conjunto divergente de arroyos, algunos de los cuales atraviesan la ciudad de Escuintla (Escobar, 2018). El primer punto donde uno de estos arroyos se encuentra muy cercano al canal actual del Guacalate es a la altura de la comunidad El Colorado, 1.8 Km al norte del Ingenio Concepción. En este punto el canal de este arroyo (río Limoncillo según los mapas de amenaza por inundaciones de la CONRED) se

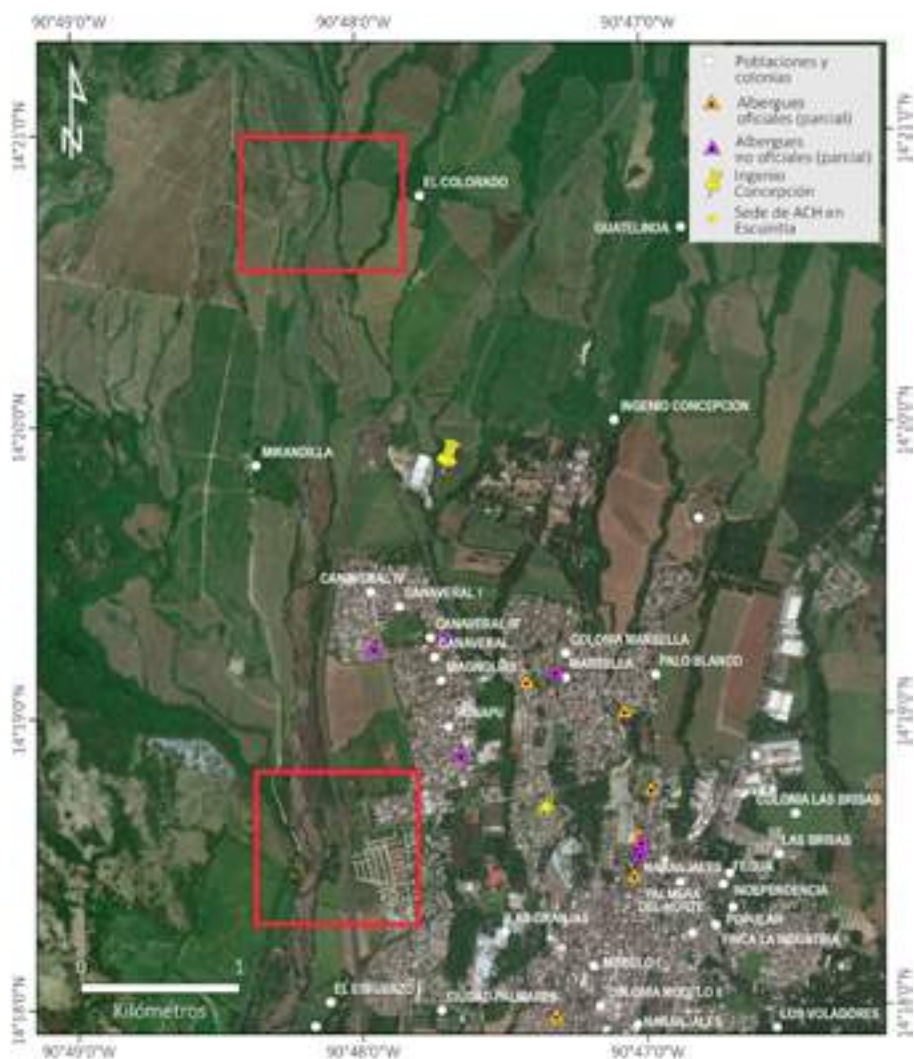
encuentra a menos de 100 m del río Guacalate (Figura 23). Otro punto crítico se encuentra 4 km aguas abajo, al paso del río Guacalate al oeste de las colonias Cañaveral y El Esfuerzo, donde nace el arroyo Cusmajate muy cerca del cauce del río principal (Figura 23). En la colonia Cañaveral se encuentran tres de los albergues no oficiales que se logró georreferenciar (se desconoce si siguen en funcionamiento), concretamente los ubicados en la Iglesia Jesucristo es nuestra roca, el más cercano a la zona de amenaza por lahares y en las iglesias Evangélica “Shaddai” y Apostólica de la Fe en Cristo Jesús (Figura 23).

La profundidad del canal del río Guacalate en este tramo varía de 20 m en el punto más al N hasta 12-15 m a su paso por la ciudad. Aunque esta profundidad puede contener lahares de volúmenes considerables, sería importante dar seguimiento a las modificaciones de la morfología del canal en estos y otros puntos similares debidos a los procesos de relleno por sedimentación y de agradación de los canales.

Otra zona crítica que deberá ser monitoreada es el paso del río Guacalate por la ciudad de Masagua, en la cuenca media, 12-14 km aguas abajo de las anteriores zonas descritas. Desde Escuintla el relieve se suaviza y el confinamiento y la profundidad del canal del río Guacalate disminuyen. En la ciudad de Masagua la diferencia de elevación entre el canal del río es de ~ 10 m, y la distancia horizontal entre el canal del río y la ciudad también es muy pequeño (100 - 200 m). La morfología del canal en esta región es típica de un comportamiento mucho más inestable, con canales anastomados, que han sufrido diversos cambios de ubicación. La zona, desde la población de Masagua hasta la confluencia del Guacalate con el río Achiguate está señalada como de amenaza alta y muy alta por inundación en los mapas de deslizamientos e inundaciones de la SE-CONRED (hoja 501). Por la distancia a las zonas de origen de los lahares, es poco probable la llegada de flujos en condiciones de lluvia normales, sin embargo, en caso de eventos de gran magnitud desencadenados por lluvias extremas la población podría ser alcanzada por flujos hiperconcentrados. Lo más probable es el aumento de los caudales con abundante carga de sedimento, por el relleno de canales y agradación aguas arriba.

FIGURA 23

Paso del río Guacalate por Escuintla. En los cuadros rojos se enmarcan los puntos más críticos del cauce de este río, donde de ocurrir el relleno del canal con depósitos de lahar podría producirse el desvío del cauce hacia la margen izquierda, capturando las cabeceras de arroyos que drenan el abanico aluvial de Escuintla y que cruzan el sector oeste de la ciudad. La imagen de base fue obtenida del servidor World Imagery de ArcGis© 10.2. En el recuadro se muestra el detalle de esta zona obtenido de los Mapas de Amenaza por Deslizamientos e Inundaciones de la SE-CONRED de 2015.



COMUNIDAD DON PANTCHO

(ENTRE LAS BARRANCAS LAS CAÑAS Y LA TRINIDAD)

El día 26 de julio, junto a personal de la sede del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Escuintla, se visitó la comunidad Don Pancho (Escuintla), situada al norte de la calle de terracería núm. 6, entre las barrancas Las Cañas al este y La Trinidad al oeste (Figura 24). Se realizó una visita a los terrenos de los cafetales y milpas de esta comunidad con dos miembros de la Asociación Civil Junan-Cusamuj, que integra a 84 familias.

La calle de terracería que circulaba de la comunidad hasta las partes más altas de las fincas (~1,000-1,200 msnm) fue dañada parcialmente por las lluvias posteriores a la erupción del 3 de junio de 2018. Al menos por un tramo de un kilómetro la calle fue erosionada, formándose de forma incipiente el cauce de una nueva barranca. La impermeabilización del terreno por la caída de ceniza volcánica, que según los miembros de la comunidad fue de 10 cm en algunas partes de la finca, provocó la reducción de la infiltración y la concentración de la escorrentía, que se canalizó por el trazado de la calle (Figura 24).

Este fenómeno, que puede haber ocurrido o estar ocurriendo en otras zonas de las laderas del volcán, parece ser local y asociado principalmente a escorrentía. El efecto de impermeabilización del terreno por parte de la ceniza se irá reduciendo en los próximos meses a medida que esta se altera y se lava, considerando que no ocurre nueva actividad eruptiva. La comunidad y su finca se encuentran situadas aproximadamente a 800 m en línea recta del cauce de la barranca Trinidad, en un resalte del relieve, con una diferencia de altura respecto a la base de la barranca de 60-70 m. Ladera arriba esta diferencia de altura entre la barranca y la zona de la finca se reduce, pero siempre es superior a los 50 m. Sin embargo, sería de interés a través de imágenes satelitales de alta resolución monitorear la evolución de este proceso de erosión en la zona de Don Pancho y a la vez los cambios de morfología del cauce que pudieran producirse en la barranca Trinidad en la parte más alta de la ladera, para comprobar que en ningún punto está modificando su cauce, que pudiera resultar en un mayor aporte de agua y sedimentos hacia la zona de Don Pancho.

RÍO ACHIGUATE:

ENTRE LAS CONFLUENCIAS DE LAS BARRANCAS Y LAS CAÑAS Y LA TRINIDAD Y DEL RÍO CENIZA

El río Achiguate es alimentado por las barrancas El Jute, Las Cañas, La Trinidad y aguas abajo del río El Zapote. Al menos dos de estas barrancas, El Jute y La Trinidad han sido activas en la generación de lahares. En la confluencia con el río Achiguate los posibles flujos de escombros que pudieran generarse sumarían sus aportes, generando zonas de inundación más amplias en este punto y aguas abajo en la confluencia con el río El Zapote, con la formación de abanicos de sedimentos.

Posteriormente el río circula parcialmente encajado entre relieves de edad Terciaria donde recibe los aportes del afluente El Tigre, hasta prácticamente su confluencia con el río Ceniza ya en la llanura aluvial al norte de la CA2. En este tramo el canal del Achiguate se estrecha y ensancha en las diversas curvaturas de su recorrido, generando diversas zonas de sedimentación. Esta zona ha sido identificada en los Mapas de Amenaza por Deslizamientos e Inundaciones de la SE-CONRED de 2015 como de amenaza media a muy alta de inundaciones. De igual forma, lahares de volúmenes entre 3 y 5 millones de m³ podrían alcanzar esta zona, inundándola por completo. Las zonas de inundación se extenderían a las partes más anchas del canal (en algunos casos hasta 800 m hacia los márgenes) donde el relieve es más bajo y donde se encuentran algunos caseríos y comunidades.



Localización de la comunidad Don Pancho (puntos FG10 a FG12) y de la zona de erosión identificada en sus cafetales. En las imágenes se observa la erosión que se produjo en un tramo de la terracería que conecta la comunidad con las fincas de café.

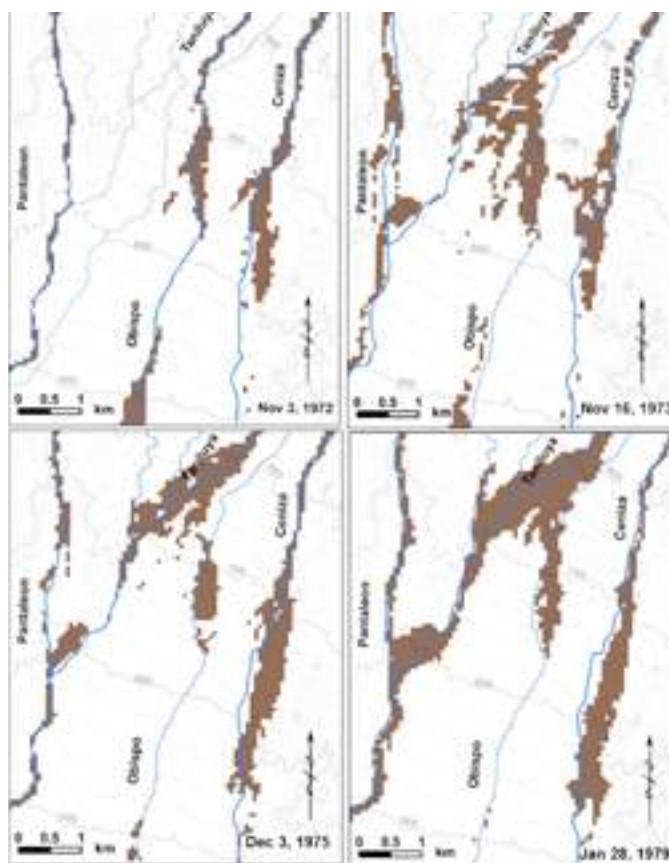


RÍO CENIZA

El río Ceniza también tiene varios sectores donde el azolvamiento por sedimentación de los canales puede provocar la rotura de sus márgenes, el desplazamiento y la captura de corrientes cercanas. El caso de este río es especialmente preocupante por el impacto muy alto que podrían generar estos procesos en zonas habitadas donde normalmente no ha ocurrido la llegada de lahares e inundaciones y dados los antecedentes históricos de modificación de cauces que se produjeron después de las grandes erupciones en la década de 1970 (Escobar, 2013). En esa ocasión se produjo el cambio de canal y la captura de corriente del río Taniluyá-río Obispo hacia el río Pantaleón, cambios que fueron analizados a través de imágenes Landsat MSS por Escobar (2013) (Figura 25). En noviembre de 1972, el río Taniluyá fluyó hacia el sur en el río Obispo, pero un año más tarde, la agradación del canal y el desplazamiento hicieron que el río Taniluyá cambiara al río Pantaleón.

FIGURA 25

Cambio de canal y captura de flujo a lo largo del sistema de drenaje Taniluyá - Obispo - Pantaleón durante la década de 1970, asociados a la sedimentación lahárica después de las grandes erupciones de esa década. Las áreas de sedimentación se muestran en color café (a partir de imágenes Landsat MSS), las corrientes activas se muestran como líneas azules continuas y las corrientes abandonadas como líneas azules punteadas (Escobar, 2013)



Las grandes áreas de sedimentación observadas en las imágenes de noviembre de 1972 y noviembre de 1973 probablemente estén relacionadas con las grandes erupciones en septiembre de 1971 y febrero - marzo de 1973. La sedimentación por lahares continuó en 1975 y hasta 1979, pero trasladada a lo largo del nuevo sistema Taniluyá-Pantaleón. Durante estos eventos, también la margen izquierda del río Ceniza recibió una gran cantidad de aportes, con extensas áreas cubiertas de sedimentos.

Más recientemente, en mayo de 2017, la actividad de lahares afectó la zona de Las Palmas, acercándose peligrosamente a la comunidad, sin afectarla, ya que dos kilómetros aguas arriba, donde la terracería cruza el río se produjo el cambio de canal del río Ceniza hacia la margen izquierda. Esto provocó la inundación de la ubicación del Campo Escuela Scoutt (Figura 17) que quedó destruida. En la zona del desvío, sobre la margen derecha se construyeron bordas de materiales naturales del mismo río. Este año, las lluvias posteriores a la erupción de 3 de junio generaron el aporte de un volumen considerable de sedimentos en esta misma zona, lo cual afectó el sistema de canalización de agua hacia la comunidad. Parcialmente estos materiales fueron dragados para construir nuevas bordas.



En la situación actual, además de este punto, al menos otros dos sectores del río Ceniza son susceptibles de presentar modificaciones del cauce (Figura 26). El primero dos kilómetros más al norte del lugar descrito, donde el cauce del río Ceniza está muy cercano a la cabecera del río Democracia y otro más al sur, al norte de la ciudad de Siquinalá, donde el río Ceniza cambia su dirección N-S a W-E, en un giro de casi 90°. Cabe mencionar también que la modificación del canal a la altura de la comunidad, donde se encontraba el Campo Escuela Scoutt puede volver a ocurrir moviéndose dentro del ancho del cauce en este sector.

En todos estos sectores el actual canal del río Ceniza tiene una profundidad cercana o menor a los 10 m. El aporte de mayor cantidad de sedimentos por la actividad de lahares podría generar que el cauce se modificara, desviándose y captando las cabeceras de arroyos cercanos. En todos los casos estos fenómenos producirían el desvío de los cauces hacia otros con recorridos más cercanos a la ciudad de Siquinalá.

Aguas abajo de los puntos mencionados, en la confluencia del río Ceniza con el río Capulín y con el río Achiguate, así como en otros puntos de las cuencas medias y bajas del río Pantaleón se observó que la carga de sedimentos en las corrientes fluviales está provocando una mayor capacidad erosiva en las zonas externas de los meandros, afectando en ocasiones zonas de cultivo. Es de esperarse que en caso de producirse lahares, aún de pequeño volumen, la carga de sedimento en las corrientes fluviales aumentará, así como su capacidad erosiva.

■ ÁREAS DE SEDIMENTACIÓN EN EL CURSO DEL RÍO PANTALEÓN

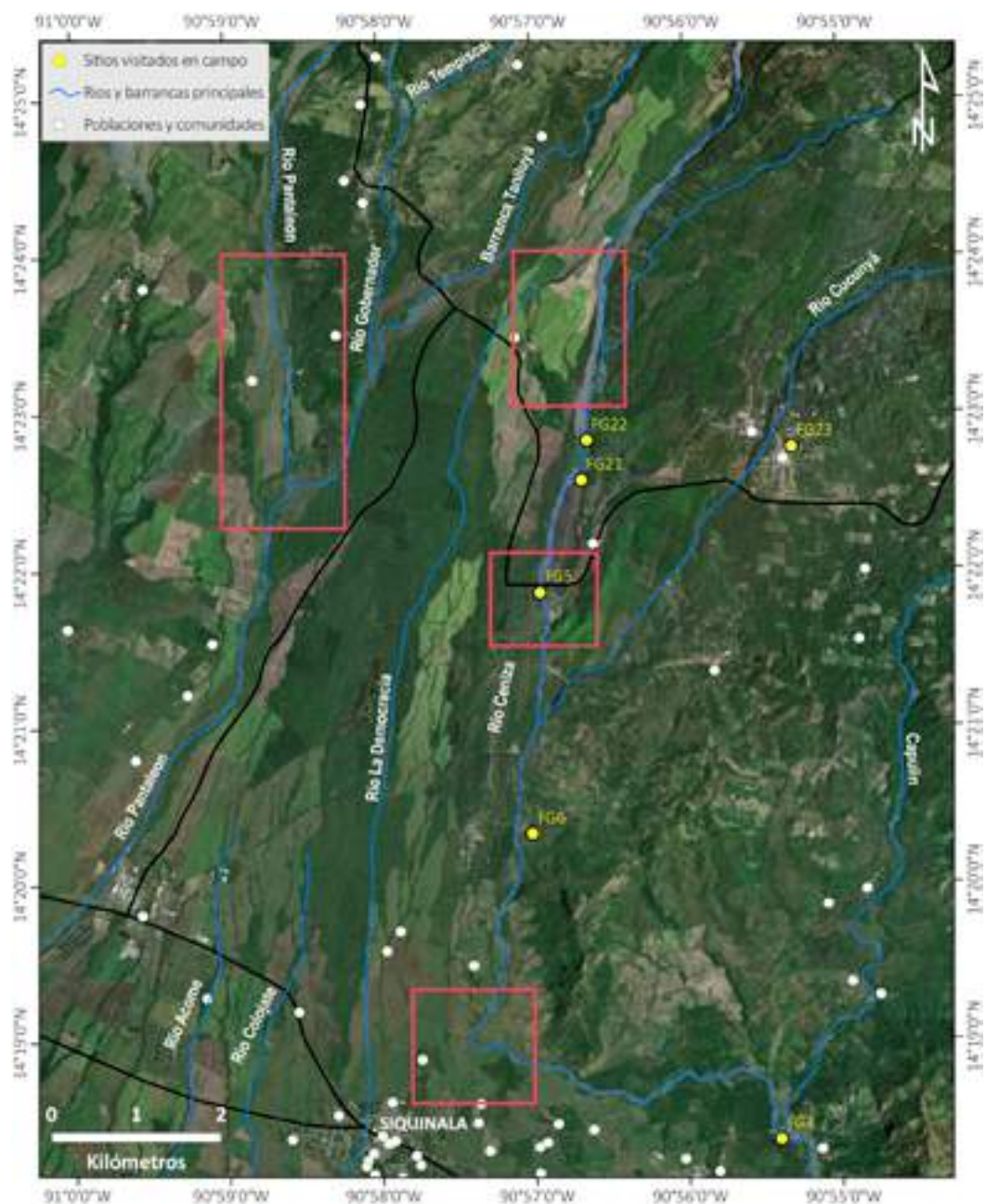
El río Pantaleón recibe sedimentos provenientes de los extensos depósitos de flujo piroclástico emplazados en el sistema de barrancas Seca-Santa Teresa, tanto de la erupción del 3 de junio del presente año, como de la erupción de mayo de 2017.

Posterior al 3 de junio se observan amplias zonas de sedimentación en la zona de confluencia del río Pantaleón con el río Gobernador (que recoge las aguas de la barranca Taniluyá y otras; Escobar, 2018), que afectaron zonas de cultivo en las cercanías de la comunidad San Rafael La Cuchilla (Figura 26).

Otros lugares expuestos a los fenómenos de rotura de márgenes y modificación de canales en el río Pantaleón son las zonas cercanas a las comunidades Palo Verde y El Porvenir.

FIGURA 26

Zonas en los cauces de los ríos Ceniza y Pantaleón, al suroeste del volcán de Fuego, donde es probable que ocurran procesos de sedimentación en caso de producirse lahares. En estas zonas, donde la profundidad de los canales es inferior a 10 m, podrían producirse la modificación de cauces y la captura de cabeceras de arroyos cercanos; en el caso del río Ceniza hacia la margen derecha, poniendo bajo amenaza la ciudad de Siquinalá (modificado de Escobar, 2018).





MAPAS DE ESCENARIOS DE AMENAZA POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS Y LAHARES



Se han realizado diversos esfuerzos en el volcán de Fuego para la elaboración de mapas de amenaza por diferentes fenómenos volcánicos, especialmente para escenarios de amenaza por flujos piroclásticos y lahares. Aunque no se han elaborado mapas por cada escenario eruptivo, que integren el conjunto de las áreas que resultarían afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos que se generan durante una erupción, se han diseñado algunos web-maps (INSIVUMEH y MapAction y Geoportal de CONRED) que permiten visualizar conjuntamente las áreas señaladas en los mapas de amenaza por flujos piroclásticos y lahares elaborados recientemente.

Los diferentes principios físicos, productos y grados de peligro de cada uno de los fenómenos volcánicos es la razón por la que se realizan mapas de amenaza específicos para cada uno de ellos. La amenaza o peligro volcánico es la probabilidad de que un evento eruptivo destructivo de determinada magnitud impacte un área en un período de tiempo determinado (Blong, 1984). Para cuantificarlo se requiere estimar las probabilidades de ocurrencia y la afectación espacial de un fenómeno en específico. Durante las últimas décadas del s. XX la mayor parte de los mapas de amenazas se elaboraron únicamente con base en el historial eruptivo conocido y en la distribución y alcances de los depósitos volcánicos reconocibles en campo. Actualmente, es frecuente el uso de software especializado de simulación para elaborar los mapas. El uso de simulaciones para delimitar las áreas que podrían resultar afectadas por una erupción requiere igualmente del conocimiento del historial eruptivo y de la disponibilidad de datos sobre magnitud, alcances y volumen del material involucrado en cada fenómeno volcánico. A partir de esta información es posible calibrar el software (reproducir eventos conocidos) y establecer rangos de valores para los parámetros de entrada necesarios para realizar las simulaciones. Existen diversos programas de cómputo para simular un mismo fenómeno volcánico, su selección normalmente se realiza atendiendo a criterios de adecuación al fenómeno que se simula, a la accesibilidad (software libre) y a la optimización del tiempo de cómputo, especialmente importante durante crisis volcánicas. En todo caso, independientemente del software que se utilice siempre se requiere capacitación y entrenamiento para su uso y la comprensión de sus limitaciones.

Los primeros trabajos para la evaluación de peligros y de elaboración de mapas de amenaza volcánica fueron realizados por INSIVUMEH en los años ochenta, bajo la asesoría del Dr. William Rose (MTU), el cual realizó numerosas investigaciones en Guatemala desde la década de los setenta. Los mapas son parte del informe preliminar “Volcanic Hazards of Fuego Volcano, Guatemala” (Rose et al., 1988), que no ha podido ser consultado de su fuente original, sino del extracto presentado en la página web del MTU (<http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/fuego/hazards2.html>), por lo que las imágenes presentan muy poca resolución y no es posible leer sus leyendas. Se elaboraron los mapas por caída de ceniza, que marca las áreas que podrían resultar afectadas por la deposición de 5, 10 y 20 cm de ceniza, correspondiente a zonas en el interior de los radios de 10, 15 y 30 km desde el cráter del volcán aproximadamente (Figura 27a) y el mapa de amenaza por los productos de la actividad explosiva, que señala las áreas que podrían ser afectadas por la caída y rodamiento de bloques (avalanchas de rocas), por flujos piroclásticos y por lahares (Figura 27b). Este último mapa, denominado Mapa preliminar de Riesgo Volcánico del Volcán de Fuego, es el primer intento de elaborar un mapa de amenaza (ya que no muestra elementos de exposición o vulnerabilidad) que incluya la mayor parte de afectaciones que ocurrirían en un mismo escenario eruptivo. Estos mapas fueron elaborados con base en la historia eruptiva conocida hasta el momento de su elaboración (posterior a la erupción de 1974) y utilizando como referencia el alcance y distribución de los depósitos de diferentes erupciones prehistóricas e históricas observables en campo.

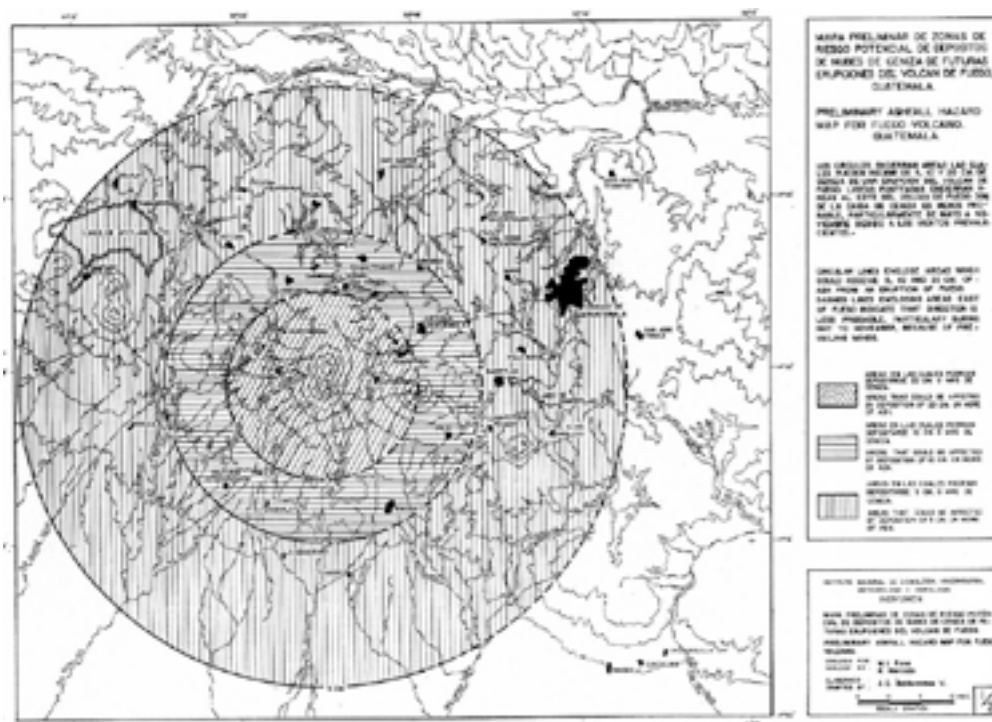


FIGURA 27

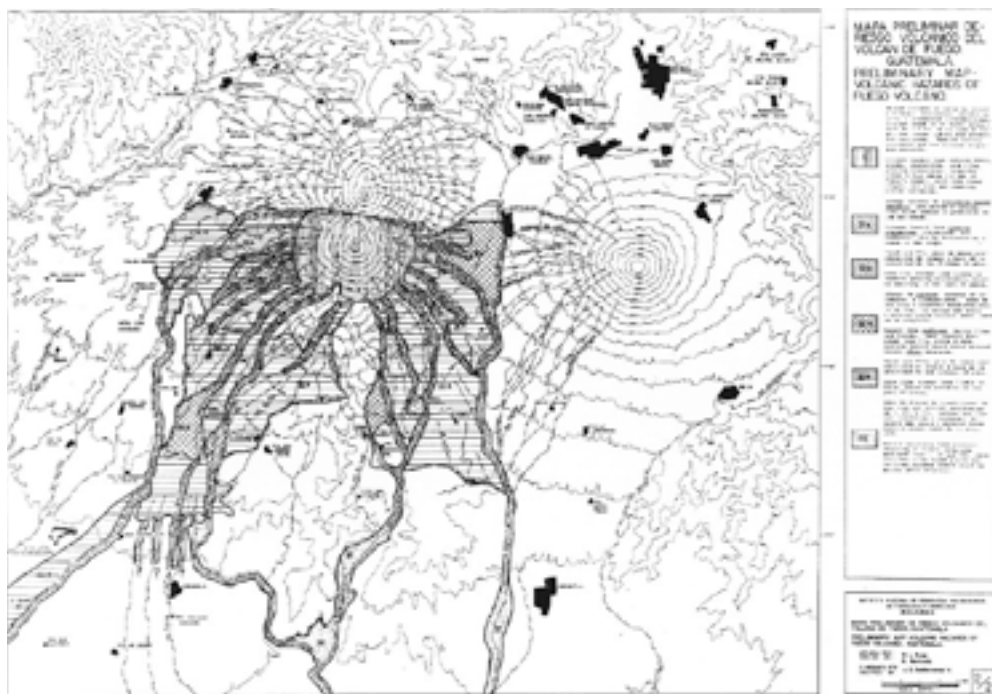
Primeros mapas de amenaza para el volcán Fuego, elaborados por el INSIVUMEH e investigadores de la MTU (William Rose y colaboradores) a finales de los años setenta (se denominaron mapas de riesgos).

a) Mapa de amenaza por caída de ceniza y b) Mapa de amenaza por balísticos, avalanchas, flujos piroclásticos y lahares.

a.



b.

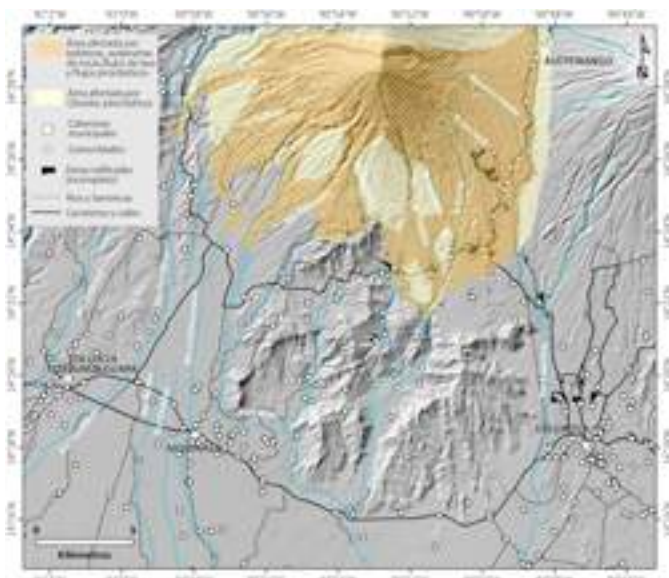


Posteriormente, después de iniciado el actual ciclo de actividad en 1999, el USGS elaboró nuevos mapas de amenaza por lahares y por flujos piroclásticos para los volcanes Fuego y Acatenango en 2001 (USGS Open-file 01-431 de Vallance et al., 2001: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/0431/pdf/of2001-0431.pdf>), en el marco de un proyecto post-Mitch de evaluación de peligros en varios volcanes de Centroamérica. Para Guatemala también se realizó un trabajo similar en el volcán Atitlán (USGS Open-file 2005-1403 de Haapala et al., 2005). El reporte para volcán Fuego y Acatenango recopila el historial de actividad volcánico conocido para el macizo volcánico y presenta cuatro mapas, dos de ellos para el volcán Fuego: el mapa de amenaza por flujos piroclásticos y otros fenómenos asociados a la actividad explosiva (emisión de proyectiles balísticos y avalanchas de rocas) y efusiva (flujos de lava), basado principalmente en la información geológica de los depósitos de erupciones pasadas (Figura 28a) y el mapa de amenaza por lahares, elaborado a partir de la simulación, con el software LaharZ del USGS (Schilling, 1998), de flujos de escombros de 1, 2, 4, 8 y 16 millones de m³ (Figura 28b). El programa se basa en la relación empírica estudiada en 27 volcanes alrededor del mundo, entre el volumen de los lahares y las áreas inundadas por ellos, que puede expresarse con ecuaciones sencillas. Estos mapas han sido los únicos disponibles y los más utilizados en los últimos 17 años.

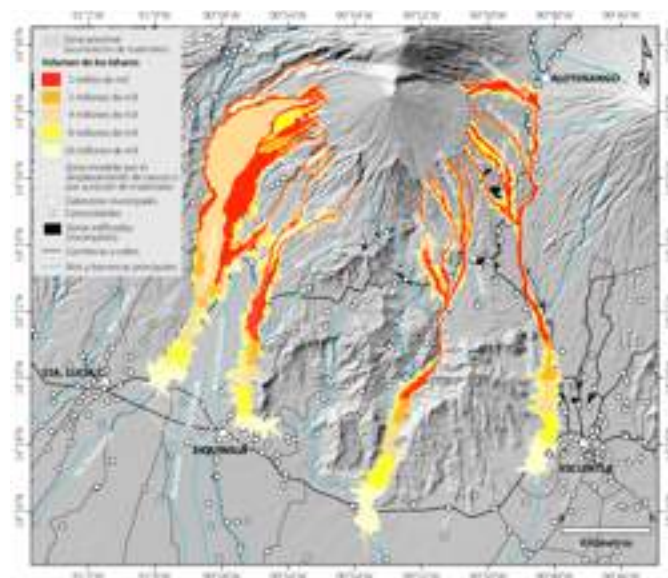
FIGURA 28

Mapas de amenaza del volcán Fuego elaborados por el USGS (Vallance et al., 2001): a) Mapa de amenaza por productos de la actividad explosiva incluyendo flujos piroclásticos y b) mapa de amenaza por lahares.

a.



b.



Con motivo de la reciente crisis del volcán Fuego, a partir del día de la erupción se conformó un grupo de expertos internacional, coordinado por el Dr. Rudiger Escobar (MTU), donde se integraron especialistas del VDAP—USGS y de universidades de Estados Unidos, Reino Unido, México e Italia, para dar apoyo a las labores del INSIVUMEH, tanto en el área de vigilancia volcánica, como de producción de mapas de amenaza (ver capítulo II de este informe). En el transcurso del mes de junio se actualizaron los mapas de amenaza por flujos piroclásticos y por lahares, para dos escenarios de diferente magnitud en cada caso. En ambos se utilizó la información previa disponible en los trabajos de referencia para el volcán para definir los escenarios (volúmenes de material volcánico involucrado), así como información sobre el histórico de lluvias de la Unidad de Meteorología del INSIVUMEH, para definir los escenarios de lahares.

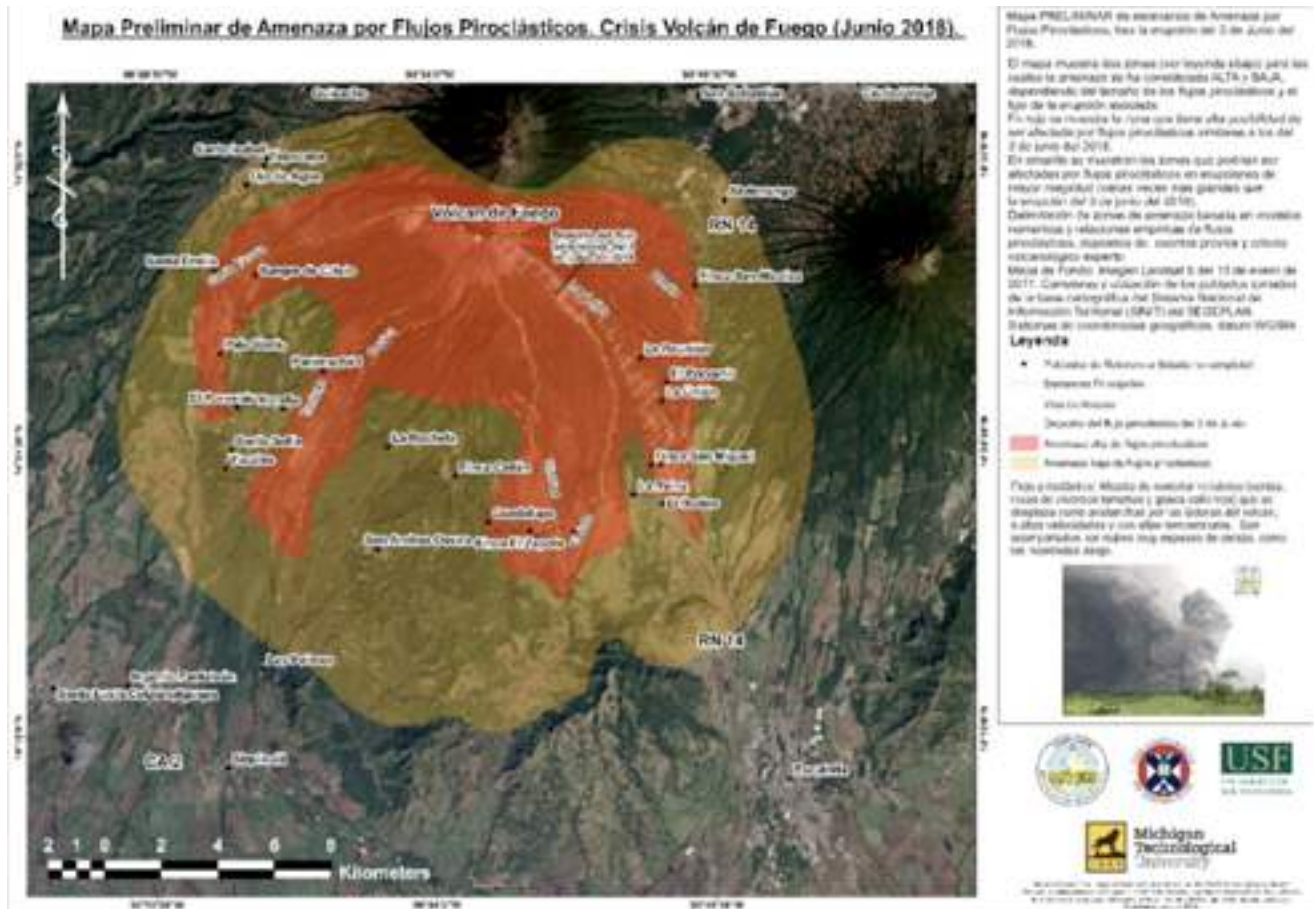
El mapa de amenazas por flujos piroclásticos (Figura 29) muestra las áreas que podrían resultar afectadas por este tipo de fenómeno en el caso de dos escenarios: en naranja intenso se señalan las áreas que serían impactadas por flujos piroclásticos en un escenario de amenaza alta asociado a una erupción como la del 3 de junio de 2018 (descrito en el apartado anterior como escenario 2, de magnitud intermedia) y en amarillo las áreas que podrían ser afectadas por flujos piroclásticos en caso de un escenario provocado por una erupción de uno o varios ordenes de magnitud más grande, como la de 1974 (descrita en el apartado anterior como escenario 3, de mayor magnitud). La amenaza es más alta para el caso de las erupciones similares a la de junio de este año, aun siendo de menor magnitud, debido a que pueden ocurrir con mayor frecuencia.

El mapa fue elaborado considerando los volúmenes y alcances de eventos previos y a partir de simulaciones numéricas, con el criterio de vulcanólogos expertos en este tipo de análisis. El software empleado para la elaboración de este mapa fue TITAN2D (Patra et al., 2005) sobre la base del DEM ALOS2 de 2011 de 12.5 m de resolución horizontal.



FIGURA 29

Mapa preliminar de amenaza por flujos piroclásticos elaborado a raíz de la crisis del 3 de junio de 2018 por el INSIVUMEH y diversas universidades involucradas en el grupo de expertos internacional.



El área de amenaza alta es de 163 km², abarca toda la zona alta del cono volcánico desde el cráter hasta distancias de 6.5 km hacia el sur (hasta las cotas 1000 a 1350 msnm según el tramo) y hasta distancias de 9 km hacia al oeste (San Pedro Yepocapa) y este (donde cubre un tramo de 6 km de la RN14). Además, la zona de amenaza alta se extiende hasta 13 km en las subcuencas de los ríos Pantaleón, Democracia, Ceniza y Achiguate (abarcando todo el recorrido de las barrancas La Trinidad, Las Cañas y el Jute), entre 1 y 2 km más que la zona señalada en el mapa del USGS de 2001.

Para la subcuenca del río Guacalate, la zona de amenaza alta cubre el recorrido total de las barrancas Honda y Las Lajas y hasta 4 km aguas abajo de la confluencia de esta última barranca con el río Guacalate. Para los casos de las barrancas Taniluyá y río El Zapote, el mapa del USG marca zonas entre 2 y 4 km más extensas que las señaladas en el nuevo mapa preliminar. La zona de amenaza baja, de más de 400 km² de extensión cubre por completo el cono volcánico, extendiéndose hasta 16-17 km hacia el sur y 10 km hacia el oeste y este. En este escenario, correspondiente a una erupción de gran magnitud, el alcance de los flujos piroclásticos estaría limitado al oeste por el relieve de la margen derecha del río San Pedro y al sur por los relieves de edad Terciaria que separan el volcán de la planicie aluvial de Escuintla.

Cabe mencionar que las áreas de amenaza en el mapa no incluyen las zonas en el perímetro de los flujos piroclásticos que serían afectadas por las nubes de ceniza acompañantes. Por tanto, los límites marcados deben tomarse como referencia y no como absolutos. El grado de peligro o amenaza no cambia abruptamente en los perímetros de los polígonos, sino que decrece gradualmente conforme nos alejamos de las áreas de origen de los fenómenos.



Los mapas de escenarios de amenaza por lahares (Figura 30) se elaboraron también durante el mes de junio utilizando el software de simulación LaharZ (Schilling, 1998), sobre la base del DEM ALOS2 de 12.5 m de resolución horizontal. Con el consenso del INSIVUMEH y el grupo de expertos vulcanólogos se consideraron diferentes volúmenes de los flujos según el escenario de lluvias esperado: un escenario A con lluvias normales para la temporada de precipitaciones anual (Figura 30a) y un escenario B con lluvias muy intensas asociadas a eventos hidrometeorológicos extremos (Figura 30b). Para el primer escenario (A) se simularon lahares con volúmenes de 1, 5 y 15 millones de m³, mientras que para el segundo (B) se simularon volúmenes de 10, 10 y 60 millones de m³. Para ambos escenarios, el mayor volumen parece estar sobredimensionado atendiendo a los cálculos de precipitación en las áreas de captación y de volumen de lahares que podrían generar (ver sección de escenarios de amenaza). Sin embargo, como se mencionó, la ocurrencia sucesiva de varios eventos de lahar de volúmenes moderados puede dar como resultado la afectación de áreas más extensas a las esperadas, por los fenómenos de sedimentación, agradación y modificación de canales, que quedan cubiertas por las simulaciones de los volúmenes más grandes.

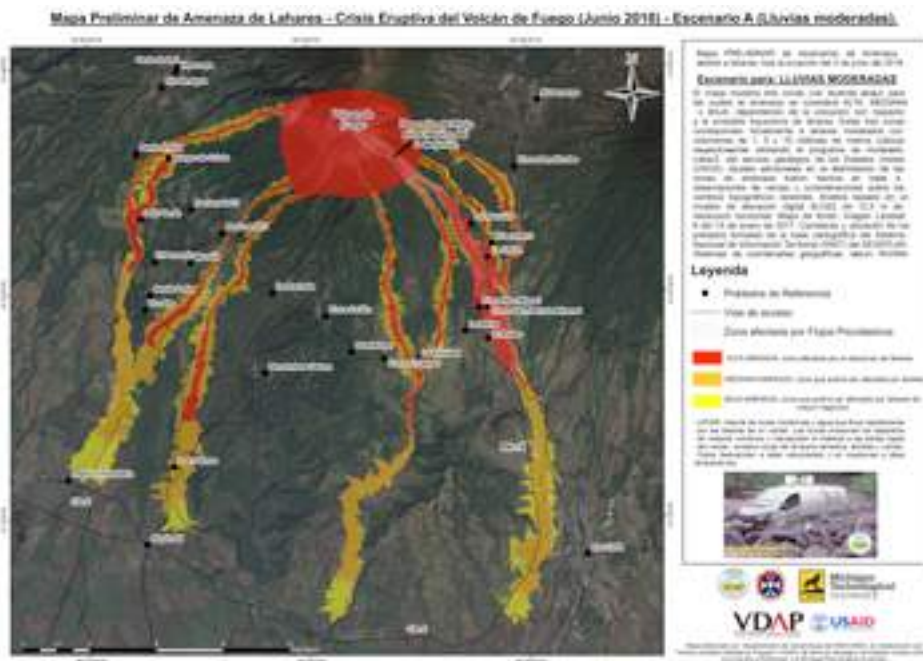
Igual como ocurre para el mapa de flujos piroclásticos debe tomarse en cuenta que las áreas en el exterior de los polígonos señalados como inundables no están exentos de peligro, debido a que las zonas de amenaza solo pueden aproximarse, especialmente en zonas de relieve bajo. Uno de los elementos necesarios para simular cualquier tipo de flujo es la base topográfica sobre la cual van a correr las simulaciones. La resolución de los DEM es un factor determinante de los resultados de las simulaciones (Stevens et al., 2002; Capra et al., 2011). En el caso de la modelación con el software LaharZ este aspecto es especialmente relevante en la parte más distal de las simulaciones, donde los resultados muestran picos en el perímetro de las áreas inundadas. Además de la resolución del DEM otras limitantes como la incertidumbre sobre la fuente, el tamaño, evolución y movilidad de los futuros eventos de lahar impiden la localización precisa de los límites de las zonas de amenaza.

Los mapas de escenarios de amenaza por flujos piroclásticos y lahares se encuentran disponibles en la página web del INSIVUMEH. Los mapas están integrados a un web-map en la misma página de internet, donde pueden visualizarse en 3D. La Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos proporcionó los shape-files de estos mapas a Acción Contra el Hambre, aunque estos no están disponibles para el público en general (ver capítulo II de este informe).

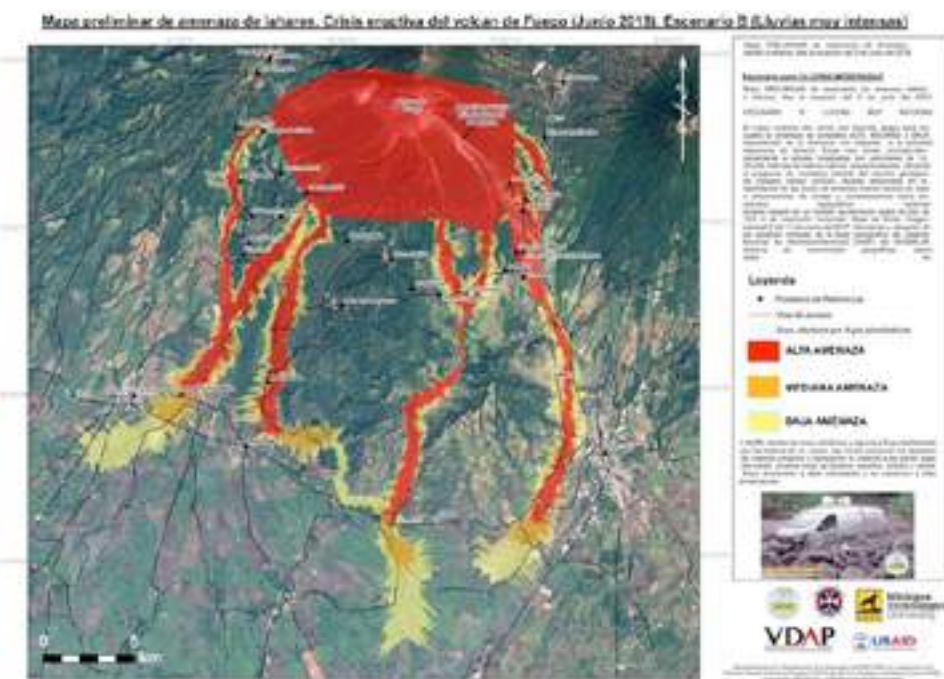
FIGURA 30

Mapas preliminares de escenarios de amenaza por lahares elaborados a raíz de la crisis del 3 de junio de 2018 por el INSIVUMEH y el grupo de expertos internacional: a) Escenario A para lluvias moderadas de la temporada de lluvias anual, donde se considera la ocurrencia de lahares de 1, 5 y 15 millones de m³ y b) escenario B para lluvias muy intensas asociadas a la entrada o cercanía de depresiones tropicales y huracanes, en el que se simularon lahares con volúmenes de 10, 20 y 60 millones de m³.

a.



b.



No se dispone todavía de los mapas de amenaza actualizados por los fenómenos de caída de ceniza, emisión de fragmentos balísticos y flujos de lava en el volcán Fuego. A continuación, se resumen para cada fenómeno volcánico los productos disponibles y los que sería necesario elaborar en el medio plazo para tener una evaluación de amenaza volcánica más completa para el volcán (Tabla 7).

TABLA 7

Productos para la evaluación de amenazas volcánicas disponibles y por elaborar.

Emisión de fragmentos balísticos	
Mapas de eventos (mapas geológicos-vulcanológicos)	INSIVUMEH reporta los máximos alcances de estos fragmentos, especialmente si alcanzan La Meseta
Mapa de amenaza por emisión de fragmentos balísticos	No se ha elaborado
Software libre de simulación para la elaboración de mapas de amenaza	Eject! (Matin et al., 2001) Ballistics (no es libre, pero puede solicitarse a sus autores en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México)
Caída de piroclastos y ceniza	
Mapas de eventos (mapas geológicos-vulcanológicos)	INSIVUMEH elabora mapas de distribución y alcance de las caídas de ceniza con base a datos de espesor reportados por observadores locales. Recientemente también se ha incorporado información recopilada a través de usuarios de Twitter en las áreas afectadas, que envían datos y fotografías.
Mapas de amenaza por caída de ceniza	No se ha elaborado
Mapas de probabilidad de colapso de techos	No se ha elaborado
Software libre de simulación para la elaboración de mapas de amenaza	Hazmap (Macedonio et al., 2005) Tephra2 (Bonadonna et al., 2002) Fall3D (Folch et al., 2008)
Flujos de lava	
Mapas de eventos (mapas geológicos-vulcanológicos)	INSIVUMEH registra en listados los eventos y el alcance de los flujos. Existe una base de datos vinculada a la tesis doctoral de Rudiger Escobar que abarca de 1999 hasta 2013. No se elaboran mapas. Para volcán Pacaya se dispone de una base de datos cartográfica de los flujos de los últimos 60 años. Se desconoce si se realiza el mismo tipo de trabajo para el volcán de Fuego.
Mapas de amenaza por flujos de lava	No se ha elaborado
Software libre de simulación para la elaboración de mapas de amenaza	Downflow (Favalli et al., 2011) ELFM (Damiani et al., 2006) Q-LavHa (Mosseaux et al., 2016)
Flujos piroclásticos	
Mapas de eventos (mapas geológicos-vulcanológicos)	INSIVUMEH registra, a través de salidas de campo y reporte de observadores locales, el alcance de los flujos piroclásticos. Para el evento del 3 de junio si existen capas de información para SIG sobre el alcance de los depósitos en las principales barrancas.
Mapas de amenaza por flujos piroclásticos	Mapa preliminar de escenarios de amenaza alta y baja por flujos piroclásticos (INSIVUMEH y otros, 2018)
Software libre de simulación para la elaboración de mapas de amenaza	Titan2D (Patra et al., 2005) LaharZ (Schilling, 1998). Módulo del cono de energía para simular los alcances de las oleadas piroclásticas.
Lahares	
Mapas de eventos (mapas geológicos-vulcanológicos)	INSIVUMEH registra los reportes de ocurrencia de lahares, pero se desconoce si realiza algún tipo de base de datos cartográfica.
Mapas de amenaza lahares	Mapa preliminar de escenarios de amenaza A y B por lahares (INSIVUMEH y otros, 2018)
Software libre de simulación para la elaboración de mapas de amenaza	LaharZ (Schilling, 1998) Flo-2D (no es de uso libre, pero se está usando en el Centro de Geociencias de la UNAM para la elaboración de mapas de amenaza de mayor detalle y con información sobre los factores de peligro).



Con relación al riesgo de inundaciones, especialmente en la cuenca media y baja de los ríos Guacalate, Achiguate, Pantaleón, Cristóbal y Coyolate, los mapas de amenaza por deslizamientos e inundaciones elaborados por la SE-CONRED en 2015 con apoyo de la Oficina de Ayuda Humanitaria ECHO y el PNUD son un recurso que debería ser integrado a los web-maps junto con los mapas de amenaza por actividad eruptiva y de lahares. El análisis de amenaza por deslizamientos se elaboró utilizando la metodología Mora-Vharson con resolución de 1 km y con datos de litología, humedad del suelo, pendiente y acumulado de precipitaciones. Para el caso del análisis de inundaciones se realizaron simulaciones con el software TerraView 4.2.2, específicamente con la subrutina TerraHydro, utilizando datos sobre topografía, orientación de la pendiente, profundidad de los cauces y de precipitación promedio anual (INSIVUMEH), para periodos de retorno de inundaciones de 10, 100 y 500 años.

Los mapas de amenaza constituyen la base para los subsecuentes análisis de vulnerabilidad y riesgo, necesarios para la toma de decisiones en materia de prevención y mitigación de desastres volcánicos. Entre otros aspectos permiten identificar aquellas poblaciones o zonas donde sería conveniente realizar estudios y análisis de mayor detalle para la gestión de problemas específicos (p. ej. la elaboración de mapas de probabilidad de colapso de techos por acumulación de ceniza volcánica, mapas de amenaza por la fuerza de impacto de los lahares en áreas urbanas, seguimiento de zonas críticas, etc.).

Con base en la información disponible en estos mapas se han identificado las poblaciones y comunidades expuestas a las amenazas derivadas de la actividad eruptiva y de los lahares y las más vulnerables a ser afectadas de forma continua y severa.



EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD
DE LA POBLACIÓN, INFRAESTRUCTURA,
BIENES Y SERVICIOS.

En un entorno multiamenaza como el del volcán de Fuego, la extensión de las áreas de influencia para el análisis de elementos expuestos son diferentes según la amenaza considerada: en el caso de la caída de piroclastos y ceniza o la emisión de fragmentos balísticos es adecuado delimitar círculos concéntricos en torno al cráter del volcán; sin embargo para las amenazas asociadas a flujos piroclásticos o a lahares (incluyendo las inundaciones) el área de influencia abarca todas las laderas del volcán, pero se extiende principalmente hacia el suroeste, sur y sureste, siguiendo el curso de la red hidrográfica. En su conjunto, el área de influencia delimitada, descrita en la primera sección de este informe, tienen una extensión cercana a los 1,025 km² (Figura 31), en su mayoría pertenecientes al Departamento de Escuintla.



La delimitación de esta área para el conjunto de amenazas asociadas a la actividad del volcán de Fuego se basó en criterios geomorfológicos y geológicos. Para su trazado se utilizaron los límites naturales de las microcuencas con cabeceras en la parte alta del volcán que se extiende al sur de la CA2 hasta las confluencias de los ríos Pantaleón y Coyolate y de los ríos Democracia, Guacalate y Achiguate (entre 40 km al suroeste y 35 km al sur del volcán). En los sectores norte y este, los límites del área de influencia sobre las laderas del volcán de Agua se tomaron del área señalada como de amenaza baja por flujos piroclásticos del mapa de amenaza del INSIVUMEH, elaborado en junio de este año (10 km hacia el este y 5-6 km hacia el norte de la cima del volcán).

En esta área extendida pueden diferenciarse desde el cráter del volcán una zona proximal (~10 km) con amenaza alta y muy alta a la actividad eruptiva (efusiva y explosiva) y a lahares, que correspondería a las cuencas altas; una zona intermedia (~20-22 km, hasta el trazado de la CA2) con amenaza alta de lahares y media-baja a los impactos directos de la actividad eruptiva y una zona distal (hasta la confluencia de la red hídrica con los ríos Coyolate y Achiguate) donde la amenaza es baja a los efectos directos de la actividad eruptiva, pero media a los impactos de los lahares, asociados a la ocurrencia de flujos hiperconcentrados de gran magnitud generados por eventos meteorológicos extremos, pero principalmente a la mayor capacidad erosiva de los cursos fluviales cargados de sedimentos después de la ocurrencia de lahares.

La exposición en cada una de estas zonas es distinta, tanto con relación en el número de comunidades y personas que las habitan, como en la cantidad y tipo de infraestructura, así como en el tipo de uso de suelo y recursos naturales.

A partir de datos del Censo 2002 del INE, proyectados para el año 2010, se han contabilizado un total de 419 centros de población en esta área de influencia. Un primer análisis de exposición se realizó contabilizando únicamente la cantidad de población asentada a diferentes distancias del área fuente de la amenaza (cima del volcán de Fuego), con base en la definición de las zonas descritas previamente (Tabla 8). Se consideraron los radios de 5, 10, 15, 20 y >20 km del cráter del volcán, tanto para la amenaza de caída de piroclastos y cenizas (zonas radiales), como para las amenazas de flujos piroclásticos y lahares (zonas en el área de influencia según criterios geomorfológicos y geológicos). La población expuesta a caída de piroclastos y ceniza hasta el radio de 20 km, donde este fenómeno puede ser más intenso, es de 345,000 personas (Tabla 8). La población expuesta a la amenaza de flujos piroclásticos, lahares e inundaciones es de 284,000 personas. Cabe resaltar las más de 40,000 personas que residen en el radio igual o menor a 10 km de la cima del volcán y que están expuestas a flujos piroclásticos y a todas las amenazas derivadas de la actividad eruptiva y de lahares.

TABLA 8

Población en el área de influencia del volcán de Fuego.

Zona / Radio	Caída de piroclastos y ceniza			Flujos piroclásticos y lahares	
	Área radial entorno al cráter (km ²)	Población por zonas (núm. habitantes)	Núm. edificaciones (datos SE-CONRED)	Área extendida según red hidrográfica (km ²)	Población por zonas (núm. habitantes)
5	85	0		78.5	0
5-10	246	68,000	7,373	165.5	42,227
10-15	410	94,841	3,401	199	19,107
15-20	645	181,542	6,515	215	52,245
> 20*				366.8	170,526
	1,386	344,383	17,289	1,205	284,105
*Área de análisis de este estudio					

Es importante señalar que el censo del que se dispone está desactualizado (no registra el crecimiento de población y asentamientos de los últimos 15 años), incompleto (se encuentran varias entradas sin datos de población) y presenta errores (asignación de comunidades a municipios diferentes a los de su ubicación, p. ej. en el caso de Siquinalá). Aun así, puede dar una idea de los lugares donde los riesgos son más apremiantes y donde es prioritario realizar acciones para su reducción.

El Geoportal de la Coordinadora Nacional para la Reducción de desastres (CONRED) (<https://conred.maps.arcgis.com/home/index.html>), donde se despliegan los datos del censo en forma dinámica, asocia la base de datos del censo del INE a otros atributos como tipo de población y distancia al cráter del volcán, que pueden visualizarse en un web-map. De esta forma es posible contabilizar el número de habitantes y el número de infraestructuras presentes en zonas determinadas, aunque para algunos atributos la información no es completa en toda el área de influencia delimitada en este estudio.

No fue posible acceder a los archivos originales de estos datos, por ello en este trabajo se realizó un tratamiento similar, asociando la base de datos de población del INE (POB_TOTAL_EDAD) a la capa de información de tipo vector “poblados” del Sistema de Información Geográfica (SINIT) de la SEGEPLAN. En primer lugar, se realizó un control de calidad de las bases de datos y una corrección de algunos problemas en los campos en los que existían caracteres no identificados (Ñ y acentos). A continuación se identificaron los campos en común de ambas bases de datos, que son varios (DEPARTAMENTO, MUNICIPIO, LUGAR_POBL Y CATEGORIA), pero que en su mayoría presentan repeticiones, es decir multitud de entradas para cada campo con el mismo dato. Se encontró que el elemento que comparten y que es único para cada entrada es el del código de las poblaciones (COD_CENSO), de forma que fue posible integrar el resto de los elementos y campos de ambas bases de datos (censo y capa de información) en un solo archivo (POBLADOS-FGOCENSO-IRRE-RADIOS-PESOS-PONDERADOS).

Con el fin de ponderar los niveles de exposición (poblaciones y personas), en cada una de las zonas del área de influencia del volcán de Fuego se estableció una clasificación de las poblaciones en función de dos factores principales:

Cantidad de población

Los datos de cantidad de población en cada entrada del censo de 2002 se actualizaron mediante la función $X \cdot 1.22$, utilizada para la proyección 2010 de los datos de población municipal (INE). Posteriormente, se normalizaron los valores de población total para cada entrada de la base de datos, dividiéndolos por el valor promedio de población del conjunto de la base de datos (530 personas). De esta forma se obtienen valores en un rango de 0.005 a 54, indicando que existen poblaciones donde el número de habitantes es 54 veces mayor al promedio.

Tipo de población

Las categorías de tipos de población en la base de datos del censo se basan principalmente en la cantidad de infraestructura y servicios presentes en estos asentamientos. Se estableció una escala del 1 al 10 (Tabla 9) para las diferentes categorías encontradas.

TABLA 9 Clasificación por tipo de población (asignación de un factor para la ponderación)

Factor	Categoría	Factor	Categoría	Factor	Categoría
1	OTRA	4	RANCHERIA	6	BARRIO
1	PARAJE	4	ALDEA	6	CANTON
2	LABOR	4	FINCA	7	PUEBLO
2	LOTIFICACION	4	FINCA / HDA.	8	RESIDENCIALES
2	PARCELAMIENTO	4	HACIENDA	9	COLONIA
3	ASENTAMIENTO	5	CASERIO	9	CONDOMINIO
3	GRANJA	5	COMUNIDAD	10	CIUDAD
3	MICROPARCELAM	5	VILLA		

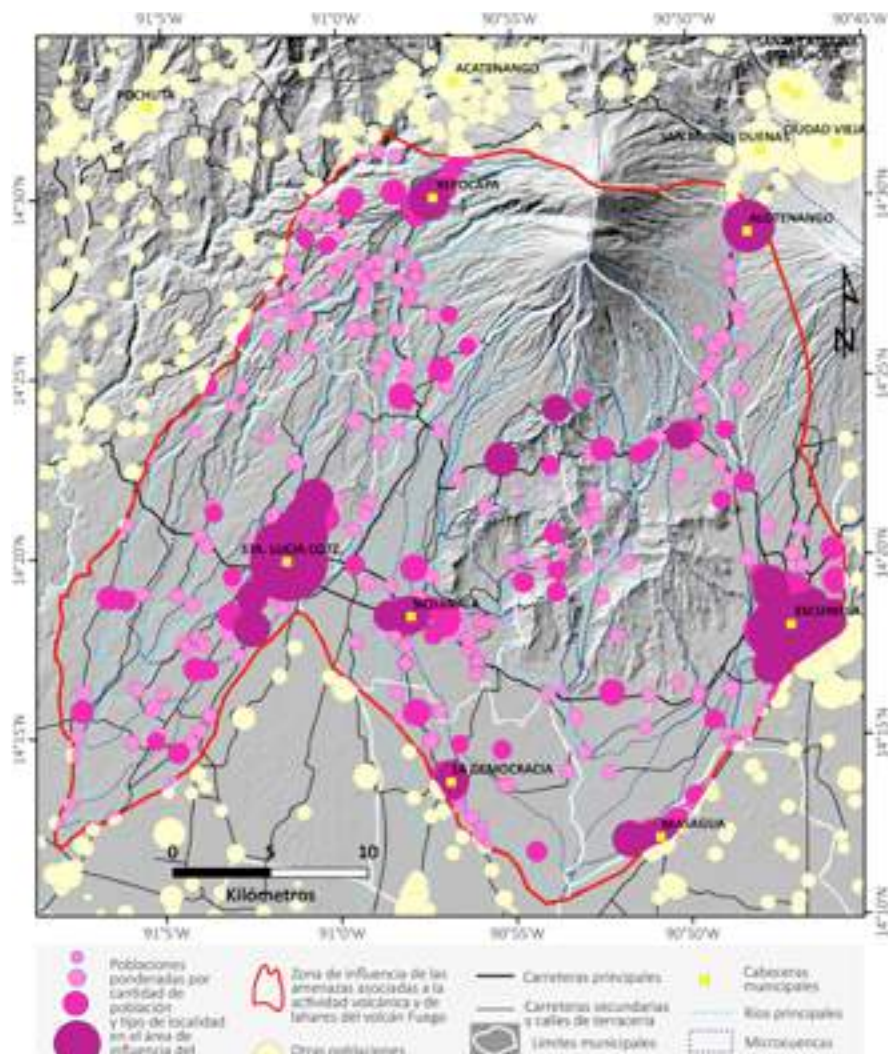


Con el fin de poder visualizar los datos de exposición en función de estos factores y con el objetivo de obtener un mayor contraste entre las variables, los factores de cantidad de población (total de población actualizada) y categoría de la población se ponderaron en un 70% y 30 % respectivamente, se sumaron y finalmente se aplicó una función exponencial X^2 . Para poder desplegar los datos espacialmente, en mapas, donde fuera posible visualizar la localización de las poblaciones, pero también el peso de los factores considerados, para cada asentamiento se generó un polígono de tipo circunferencia y cuyo radio representa este peso. Se establecieron cuatro grupos de polígonos de tipo circunferencia, donde los más pequeños indican poblaciones con menor población e infraestructura y los más grandes indican poblaciones de tipo pueblo, colonia, condominio o ciudad con una mayor cantidad de infraestructura y servicios (Figura 31).

Asentamientos y población en el área de influencia de las amenazas del volcán de Fuego, ponderada según cantidad y tipo de población. La línea color vino representa el área de influencia de las amenazas asociadas a la actividad eruptiva y de lahares del volcán de Fuego (1025 km²).

Posteriormente los datos de cantidad y tipo población ponderados se analizaron a partir de su ubicación en el interior del área de influencia y en función de la distancia al cráter del volcán de Fuego para 4 zonas: zona hasta 10 km, zona entre 10 y 15 km, zona entre 15 y 20 km y zona entre 20 km y el límite distal del área de influencia. La pertenencia o no a estas zonas también fue ponderada con un peso, que se combinó con el elaborado anteriormente para la cantidad y tipo de población. De esta forma, se busca visualizar y clasificar la exposición no solo por la cercanía a la fuente de amenaza, sino también por la cantidad y tipo de población e infraestructura presente en las poblaciones y comunidades en el área de influencia del volcán de Fuego (Figura 32).

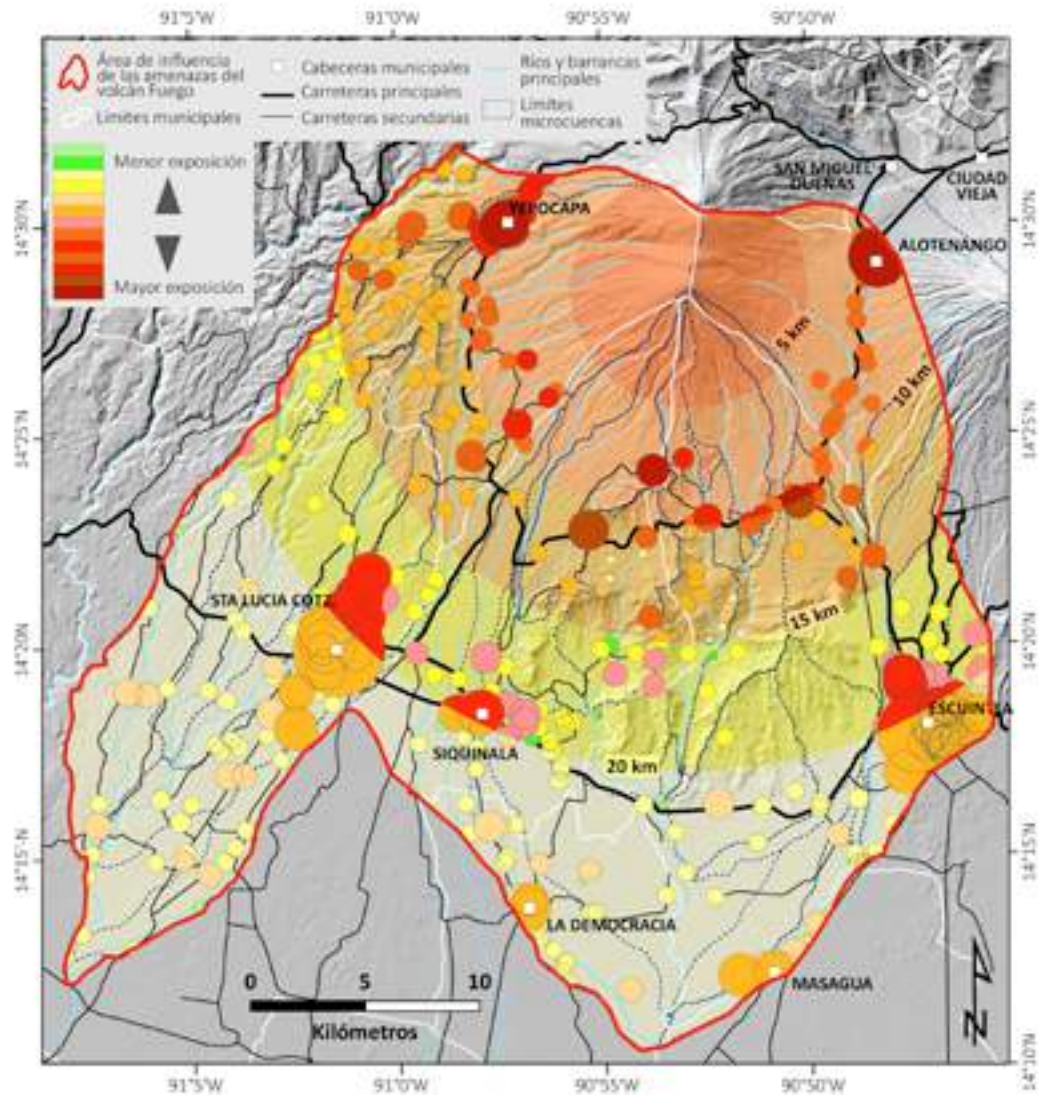
FIGURA 31



Clasificación cualitativa de la exposición de la población según la cantidad de población, tipo de asentamiento y distancia al cráter en el área de influencia de las amenazas del volcán Fuego. La escala de colores con la que se representan los polígonos circulares de los asentamientos indica de más intenso a más pálido poblaciones con mayor a menor cantidad de población, mayor a menor cantidad de infraestructura y mayor a menor cercanía a la fuente de la amenaza.

En el interior del radio de 5 km, que incluye la cima del volcán vecino de Acatenango, la exposición permanente de personas es nula, tanto si se considera el área de amenaza por flujos piroclásticos, como si se considera el peligro por caída de ceniza. Esta zona de amenaza muy alta tiene muy baja exposición, ya que no existen asentamientos de población permanentes.

FIGURA 32



En la zona entre los radios de 5 a 10 km, están asentadas más de 42,000 personas en las cabeceras municipales de Yepocapa y Alotenango y en asentamientos de tipo comunidad, hacienda, aldea, caserío, además de otras más pequeñas (categorías del 1 al 5 en Tabla 10). Cabe destacar que algunas de ellas, como La Rochela, la Comunidad Agraria Ceilán, La Reunión, San Francisco Panimaché y Panimaché II se ubican solo a 7 km del cráter del volcán de Fuego.

Otras comunidades grandes como Guadalupe-El Zapote, La Trinidad, La Reyna, Santa Rosa, El Rodeo y San Jacinto Miramar, en el Departamento de Escuintla, se encuentran en el radio entre 9 y 10 km de la cima del volcán; así como las comunidades de Morelia, Las Mercedes, Montevideo-Sangre de Cristo, Santa Emilia, El Niagara, San Gabriel, La Conchita, Monte Los Olivos, Ojo de Agua, Santa Isabel, San Pedro Yepocapa, Pamuc, Montellano, Chicalvario, La Cruz, Quisajche, entre otras, en el Departamento de Chimaltenango y las comunidades Candelaria, El Porvenir, La Unión, Santa Clara y San José Las Lajas, además de diversas fincas cercanas a la carretera RN14, del Departamento de Alotenango.

La mayor parte de estas comunidades tienen iglesias y escuelas. Algunas de ellas también disponen de centros comunitarios y solamente 4 de ellas disponen de centros de salud en las cabeceras municipales de Alotenango y Yepocapa y en las comunidades Guadalupe-El Zapote y Morelia-El Provenir (Figura 33). En el radio de 10 km también se localizan diversos tramos de la calle de terracería núm. 6 (núm. 5 en algunos mapas) y de las carreteras RN14 al este y RN11 al oeste, además de diversas calles de terracería secundarias que conectan estas poblaciones con las cabeceras municipales de Escuintla, Alotenango y Yepocapa. Estos sectores de las vías de comunicación terrestre están altamente expuestos al impacto de flujos piroclásticos, como se constató durante la erupción del 3 de junio de este año y al impacto de lahares de pequeña y moderada magnitud, que ocurren anualmente.



Esta zona entre 5 y 10 km de radio del cráter del volcán de Fuego puede clasificarse de muy alta exposición, debido a que se encuentra en prácticamente toda su extensión en el área de amenaza alta de flujos piroclásticos.

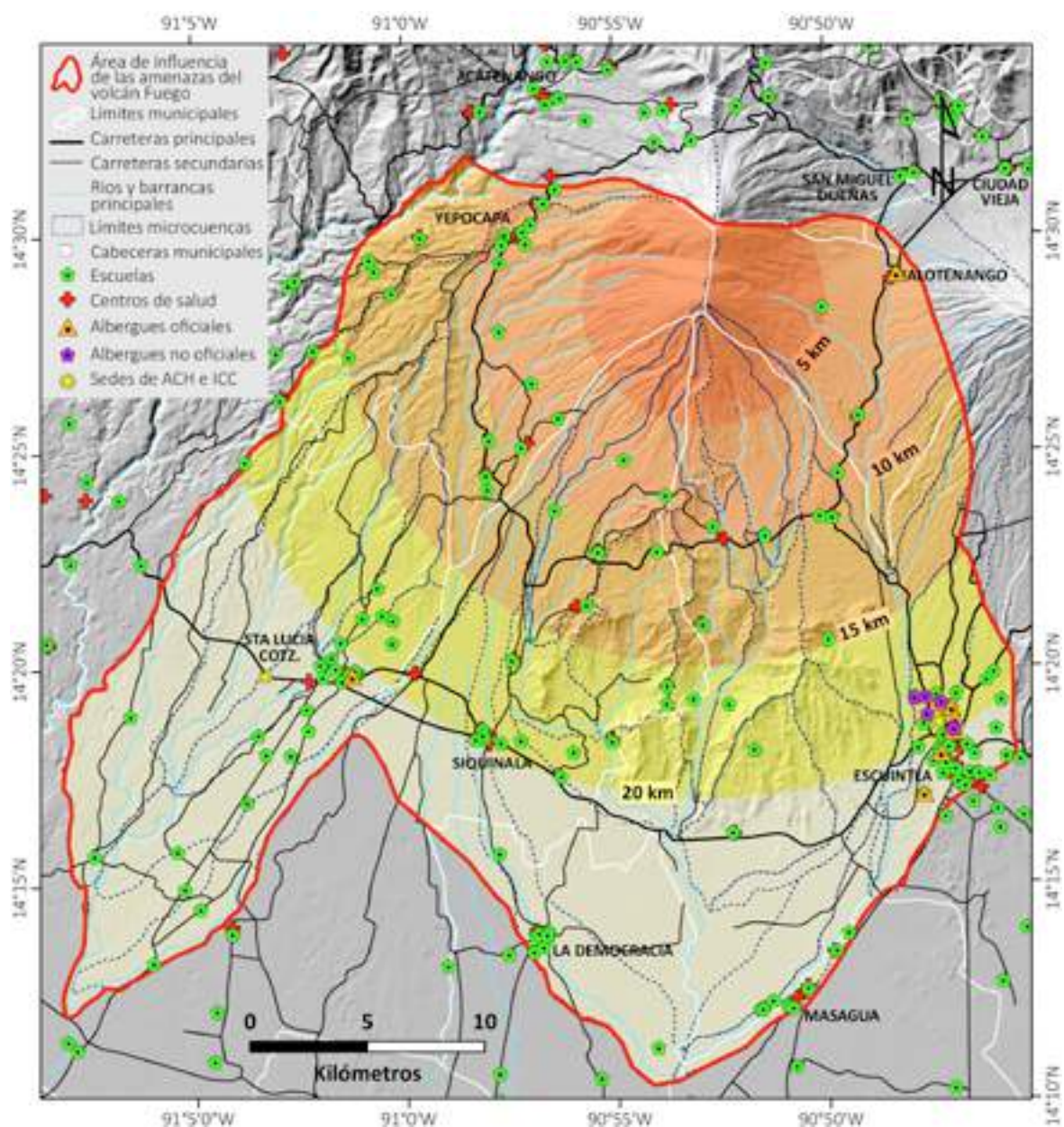
En la zona entre los 10 y 15 km viven más de 71,000 personas, distribuidas en asentamientos de diversas categorías (de 1 a 8 en tabla 10), desde pequeños como fincas y haciendas, hasta cantones y pueblos, como San Andrés Osuna. Otras comunidades grandes en esta zona son Chuchu, San Diego, Nueva Primavera en el Departamento de Escuintla y Bethania, Santa Sofia, Los Yucales y la comunidad Hermógenes López en el Departamento de Chimaltenango. Es en estas comunidades donde se encuentran las escuelas de este sector y solamente cuatro de ellas tienen centro de salud (Figura 33). También se encuentra en este sector el tramo de la carretera de terracería núm. 6 que cruza la barranca Cenizas.

Aunque en esta zona la exposición a la amenaza de flujos piroclásticos es menor que en el caso de la zona con radio de 10 km, la exposición es muy alta a la amenaza por lahares, especialmente en las comunidades asentadas en las márgenes de los ríos Pantaleón y barranca Ceniza al suroeste y de las barrancas Trinidad, Las Cañas y El Jute hasta su confluencia con el río Achiguate, así como el tramo del río Guacalate que recibe los aportes de las barrancas Las Lajas y Honda.



FIGURA 33

Localización de los centros de salud y escuelas en el área de influencia de las amenazas del volcán (capas de información obtenidas del SINIT-SEGEPLAN). Se indica también la ubicación de algunos albergues oficiales (en naranja) y no oficiales (en morado), la mayor parte de ellos en la ciudad de Escuintla; así como la sede de Acción Contra el Hambre en Escuintla y del Instituto Privado de Investigación en Cambio Climático en Santa Lucía Cotzumalguapa.





En la zona entre los 15 y 20 km de la cima del volcán residen más de 52,000 personas ubicadas principalmente en las cabeceras municipales de Escuintla, Siquinalá y en las colonias y comunidades colindantes. En estas ciudades se concentra la mayor parte de la infraestructura vial, social (escuelas y centros de salud), administrativa y de servicios del Departamento de Escuintla. La carretera CA2 une estas poblaciones y cruza los principales ríos y barrancas que desde el volcán drenan hacia el sur, a través de puentes.

En la situación actual, después de la erupción del 3 de junio, aunque la exposición a los impactos directos de la actividad volcánica es baja (con excepción de la caída de cenizas), la exposición a amenaza por lahares e inundaciones es alta, especialmente en la población de Siquinalá y en la parte noroccidental de la cabecera municipal de Escuintla. También se incluyen en esta zona de alta exposición la Finca Pantaleón y las poblaciones al norte de Santa Lucia Cotzumalguapa (Figura 32). Para esta zona es especialmente importante la exposición de los puentes de la carretera CA2 y puentes en vías secundarias que cruzan los ríos y barrancas más activas (Guacalate, Achiguate, Ceniza, Pantaleón y Cristóbal).

Finalmente, la zona entre los 20 km y la parte más distal del área de influencia es de media a baja con relación en la amenaza por actividad volcánica y lahares, que podrían alcanzar esta zona solamente en caso de ser de gran magnitud (provocados por eventos hidrometeorológicos extremos). Sin embargo, las cabeceras municipales de Santa Lucía Cotzumalguapa, La Democracia y especialmente Masagua están altamente expuestas a la amenaza por inundaciones.

La exposición es el factor de riesgo fundamental en el caso de la amenaza por flujos piroclásticos. Es decir, la protección de la vida y los bienes en las zonas que pueden ser impactadas por este tipo de fenómeno depende casi exclusivamente de reducir la exposición a cero. Ello implica la necesidad de aplicar políticas de planificación y ordenamiento territorial intensivas para la reubicación de las comunidades más expuestas o en su defecto desincentivar su crecimiento y fortalecer las capacidades institucionales y locales para asegurar el acceso a la información oportuna, la disponibilidad de recursos y la organización para realizar evacuaciones temporales.

Para otros tipos de amenaza (como la caída de ceniza o los lahares), además de la ubicación de la población y las comunidades respecto a las fuentes de las amenazas que pueden producirse en el territorio, otros aspectos como el tipo y condición de las viviendas e infraestructura, conforman la vulnerabilidad física en su conjunto. La protección de la vida, los bienes y las condiciones de vida dependerá también de reducir las vulnerabilidades económicas y sociales, pero principalmente de mejorar la concientización, formación y organización de la población con relación a la naturaleza del territorio y a los peligros que puede enfrentar.

Un análisis exhaustivo de la vulnerabilidad queda fuera del alcance de este trabajo, tanto por la diversidad de factores que la componen (vulnerabilidad física, económica, social, institucional, política), por la necesidad de aplicar metodologías especializadas para su análisis (entrevistas, grupos de enfoque, análisis de bases de datos, construcción de indicadores) y por su variabilidad en función de la dimensión que se considere (población, técnicos en instituciones para la gestión de riesgo, tomadores de decisiones, infraestructura, recursos naturales).

Las consideraciones que se recogen a continuación están tomadas de algunos trabajos existentes de análisis de la percepción del riesgo en la zona del volcán de Fuego (Escobar, 2013), de discusiones con algunos investigadores del grupo de expertos, así como de valoraciones personales obtenidas durante las visitas de campo realizadas a finales del mes de junio, con la limitante de ser muy puntuales y parciales. Estas observaciones se centran en la zona de exposición alta y muy alta (radio de los 10 km desde el cráter del volcán), considerando de este a oeste, las comunidades asentadas en la carretera RN14, la calle de terracería núm. 6 y la RN11, desde la zona 0 de la erupción del 3 de junio de 2018 hasta las comunidades de Sangre de Cristo y Niagara en las cercanías de Yepocapa; donde las amenazas por la actividad eruptiva y por la ocurrencia de lahares son altas y muy altas.

Un primer aspecto a resaltar es que estas comunidades, aun estando asentadas en el mismo entorno natural, en las laderas del volcán, altamente expuestas a las amenazas derivadas de la actividad volcánica y en su mayoría separadas unas de otras por pocos kilómetros o por las barrancas principales que drenan el edificio volcánico, presentan condiciones y modos de vida, de infraestructura y recurso económico, de nivel organizativo y de concientización de los peligros que enfrentan muy diversos. Por ejemplo, la comunidad Don Pancho, ubicada en la margen derecha del río Las Cañas, trabaja fincas de café y milpas propias en los terrenos sobre de la comunidad, en organización cooperativa con la comunidad La Trinidad. Esta organización normalmente tiene influencia sobre todos los aspectos de la vida de la comunidad (salud, educación, religión, etc.) y también sobre la disponibilidad de recursos para enfrentar la crisis volcánica (autoevacuación a un albergue privado en Palín), así como para gestionar nuevos recursos para una posible reubicación. Muy cerca otros asentamientos más pequeños, como el caserío El Rancho, en la margen izquierda de la barranca Las Cañas, trabaja milpas de infrasubsistencia y reúne familias de escasos recursos que no poseen tierras. Otro ejemplo puede ser la respuesta a los mensajes de alerta y evacuación entre las comunidades cercanas de La Reyna y de San Miguel Los Lotes, la más afectada por la erupción del 3 de junio de 2018. La Reyna es predominantemente agrícola y ha fortalecido su organización comunitaria con apoyo de la CONRED y el INSIVUMEH, de forma que existía en la comunidad un mejor conocimiento de las amenazas y liderazgo para la transmisión de los avisos de evacuación. En cambio, en el caso de San Miguel los Lotes, conformada mayoritariamente por familias con ingresos del sector servicios y cuyo quehacer diario se repartía entre la comunidad y los lugares de trabajo ubicados en la RN14, Alotenango, Ciudad Vieja y hasta Antigua Guatemala, quizá la menor dependencia del entorno natural como medio de vida y la carencia de organización comunitaria, fue determinante para el desarrollo de la crisis y del desastre.





Esto indica que las vulnerabilidades en el nivel local son altamente variables y específicas y que las acciones que puedan emprenderse para su reducción deben considerar estas especificidades en un área geográfica relativamente reducida.

Otro aspecto a resaltar es que aquellas comunidades, o más bien, grupos de personas en las comunidades con las que la CONRED o el INSIVUMEH tienen trabajo conjunto para la instalación y mantenimiento de equipos de radiocomunicación, equipos de monitoreo y/o conformación de COCODES, entre otros, tienen una muy buena comprensión sobre los fenómenos volcánicos, la amenaza que representan y su potencial de daños. El problema de los liderazgos y de los recursos de estos grupos de personas sobre el conjunto de la comunidad, para ser considerados como autoridad en la materia, es un aspecto que deberá tenerse en cuenta al emprender acciones o procesos de fortalecimiento comunitario.

Si bien es cierto que el continuo nivel de actividad del volcán de Fuego pudo influenciar la respuesta de las comunidades y de las instancias de protección civil durante la crisis del 3 de junio de 2018, no lo es que exista un total desconocimiento por parte de los actores en el volcán sobre los peligros que enfrentan. La actividad continua del volcán durante los últimos quince años, aunado a la necesidad de permanecer en el territorio en el que y del cual se vive probablemente fueron las causas de una falsa sensación de seguridad y de la subestimación del riesgo (persistió la idea de que el nivel de actividad del volcán era el mismo que el experimentado durante los últimos años). Las debilidades institucionales tanto para el monitoreo del fenómeno y su interpretación, pero sobre todo de la transmisión y recepción de los mensajes de alerta, también constituyeron un factor determinante en el desarrollo de la crisis. Sin embargo, existe en los actores locales y regionales, tanto institucionales como comunitarios una clara percepción del riesgo.



Escobar (2013) realizó entrevistas con cuatro grupos focales de actores vinculados a las crisis en el volcán de Fuego: población local, autoridades locales, técnicos de la CONRED y vulcanólogos. Las entrevistas indagaban sobre el conocimiento general y la percepción del riesgo volcánico, las creencias o ideas sobre lo que podría esperarse durante una crisis volcánica futura y en las opiniones con relación al manejo de las crisis. La mayoría de los encuestados pensaban que el volcán de Fuego tenía el potencial para producir una erupción de gran magnitud e incluso catastrófica durante sus vidas. Sin embargo, solamente las personas entrevistadas en las comunidades con experiencias previas en crisis eruptivas (como p.ej. 1974) reconocían como principal amenaza la ocurrencia de flujos piroclásticos de gran volumen que podían desbordarse en sus márgenes, mientras que las personas más jóvenes, que no habían experimentado erupciones grandes antes, no lo hacían. De forma generalizada las personas en los diferentes grupos focales pensaban que un sistema de alerta temprana era el único el único medio posible para el manejo de una crisis, pero cada grupo mostraba diferentes grados de optimismo y escepticismo sobre si era posible hacer funcionar correctamente un sistema de este tipo. Las respuestas sobre cuando y como realizar evacuaciones muestran que son diversos los factores que influyen en la toma de decisión: la información disponible sobre la evolución de la actividad eruptiva, la disponibilidad de recursos para movilizarse, la certeza de encontrar albergue y de forma preponderante la seguridad de que las pertenencias que se dejan en las comunidades tendrán el resguardo correcto. Las respuestas también mostraron una amplia gama de puntos de vista sobre quien decide la evacuación en las comunidades (cada familia, el líder comunitario, la iglesia, etc.), así como quien debería proveer los recursos para realizarlas.

De este trabajo se desprende que con probabilidad la crisis del 3 de junio incrementó de forma muy significativa la percepción de riesgo y los niveles de concientización sobre el volcán y sus amenazas. Debe aprovecharse esta situación para iniciar o fortalecer procesos informativos y formativos que integren a los diferentes actores en las comunidades (líderes, grupos de mujeres, comunidad educativa, comunidades religiosas), pero también en las instituciones municipales y regionales (alcaldía, sedes de gobierno en Escuintla, Alotenango y Chimaltenango, entre otros). Otro aspecto que deberá fortalecerse son los recursos logísticos y organizativos para asegurar un correcto funcionamiento de los sistemas de alerta temprana y de las evacuaciones.



ZONIFICACIÓN PRELIMINAR DE RIESGOS



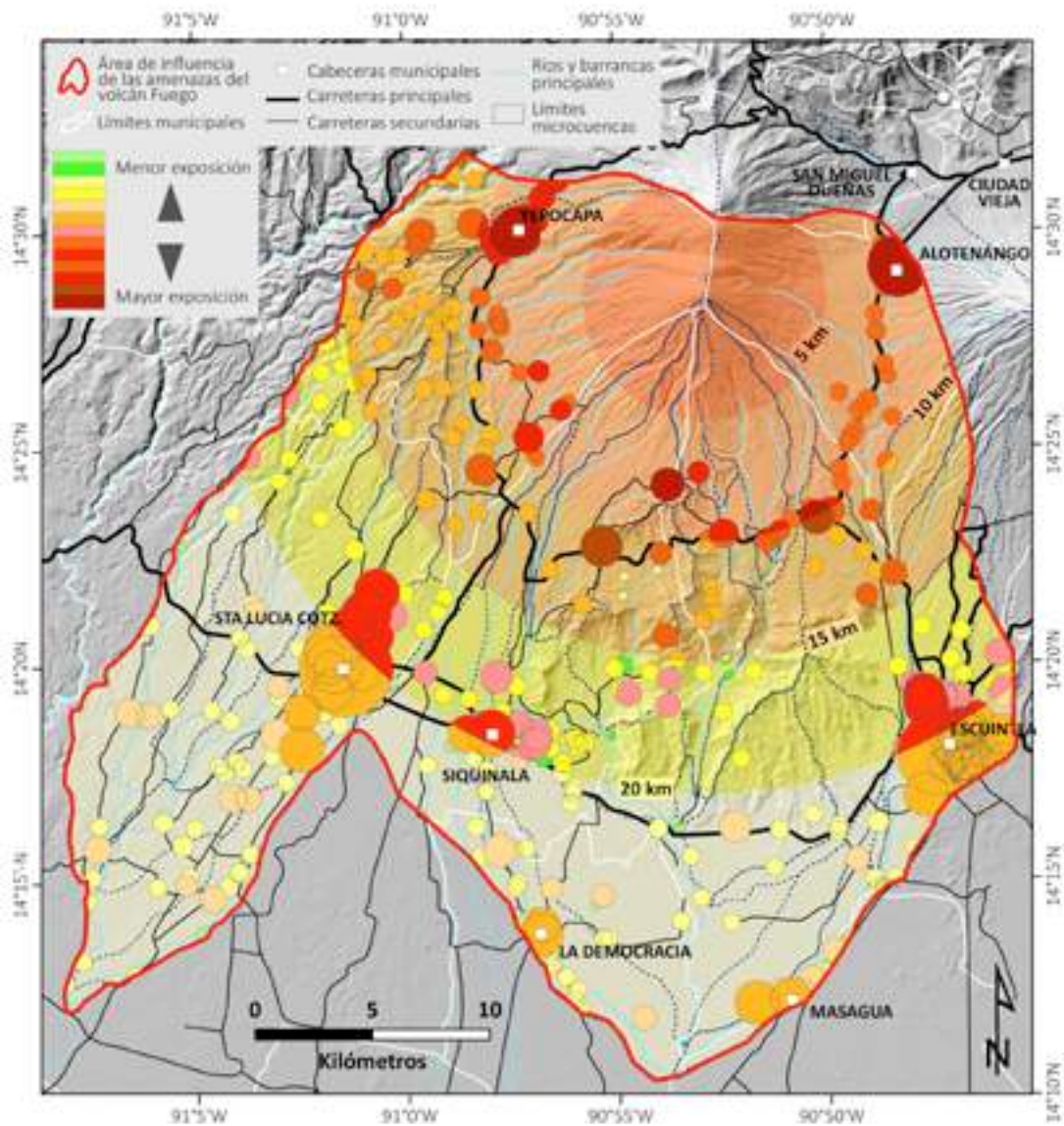
Los datos disponibles sobre la amenaza y sobre la exposición se organizaron en capas de información en un sistema de información geográfico (SIG_FUEGO) que acompaña a este informe. De esta forma fue posible integrar las capas con la información sobre amenazas por flujos piroclásticos y por lahares, proporcionados por INSIVUMEH, con las capas correspondientes sobre cantidad y tipo de población (datos ponderados del censo 2002 del INE). A partir de esta sobreposición se señalaron aquellas comunidades con un riesgo más alto a ser afectadas por el fenómeno de flujos piroclásticos (Figuras 34).

Es importante destacar que este proceso no constituye un análisis de riesgo exhaustivo, por una parte porque todos los datos en las capas de información son preliminares o incompletos y especialmente porque no se consideran en este análisis, los factores de vulnerabilidad social e institucional (conocimiento de la amenaza, organización comunitaria, existencia de planes de emergencia, funcionamiento de los sistemas de alerta temprana), que como se comprobó durante la crisis del 3 de junio son determinantes en el desarrollo del desastre.

Como se mencionó, por la naturaleza del fenómeno, la exposición a flujos piroclásticos determina que en todas las laderas altas del volcán Fuego, además de los cursos de las barrancas más activas y sus zonas colindantes constituyan zonas de alto riesgo de pérdida de vidas humanas y de daños severos al medio natural, a las poblaciones y a la infraestructura. En el área indicada como de amenaza baja de flujos piroclásticos, el riesgo de pérdidas y daños se clasificó como medio (Figura 34). Esto aplica siempre que se considere un escenario de riesgo generado por una erupción de la magnitud de la del 3 de junio de este año, pero debe tenerse en cuenta que el volcán Fuego tiene potencial para producir erupciones de mayor magnitud, como la de 1974.

FIGURA 34

Riesgo de pérdida de vidas y de infraestructura por el impacto de flujos piroclásticos en el área de influencia del volcán Fuego. Se muestran las áreas de amenaza alta y baja por flujos piroclásticos delimitadas por el INSIVUMEH en el mapa elaborado recientemente. Los niveles de riesgo para las poblaciones se representan en diferentes colores..



En la zona señalada como de riesgo alto y medio de pérdida de vidas humanas por el impacto de flujos piroclásticos, el riesgo por impacto a la infraestructura es también muy alto, no solo por los flujos, sino también por la caída de piroclastos y ceniza. En erupciones como la del 3 de junio y de mayor magnitud pueden depositarse varios centímetros de ceniza sobre los techos de las viviendas y provocar su colapso, especialmente si está húmeda y si se trata de viviendas de tipo mixto (lámina, madera, etc.). En la zona de riesgo medio y bajo por flujos piroclásticos, pero con alta exposición al impacto de lahares, la vivienda también puede ser impactada por inundación, soterramiento e impacto de grandes bloques. Esto podría ocurrir en caso del desvío de los cauces a nuevos canales que transcurrieran más cercanos a centros de población.



Otros impactos a la infraestructura son la afectación de flujos piroclásticos y lahares sobre las carreteras de terracería, especialmente donde estas cruzan las barrancas, ya sea a nivel del suelo (Figura 35) o a través de puentes. La mejora de esta infraestructura es una reclamación permanente de las comunidades en las zonas de riesgo alto y medio, ya que al ser afectadas por lahares quedan inhabilitadas durante algunos días o semanas, prácticamente todos los años, provocando en ocasiones que algunas de estas comunidades queden aisladas. En la zona de riesgo la calle de terracería núm. 6 constituye la única vía de evacuación posible para comunidades como La Rochela, Guadalupe-El Zapote, La Trinidad, Don Pancho, Santa Rosa, La Reyna y El Rodeo (Figura 35), por lo que mientras las comunidades permanezcan en la zona es urgente acondicionarla. En caso de planificar la construcción de puentes sobre estos pasos requiere que estos sean diseñados tomando en cuenta la diferente magnitud de los flujos de escombros que pueden ocurrir.

FIGURA 35

Cruces de la carretera de terracería núm. 6 a su paso por las principales barrancas que drenan las laderas oeste y sur del volcán Fuego: a) Barranca Ceniza a la altura de la comunidad Las Palmas; b) Barranca Las Cañas; c) Barranca La Trinidad y d) Barranca Mineral.



Otras infraestructuras estratégicas que pueden ser afectadas por la actividad volcánica son los sistemas de monitoreo del INSIVUMEH en el volcán Fuego y la red de estaciones de radiocomunicación de los observadores locales del INSIVUMEH y de los enlaces de la CONRED en las comunidades. En las instalaciones existentes y en las que se planee instalar en un futuro deberá considerarse, en la medida de lo posible, medidas o sistemas de protección para los equipos, paneles solares y antenas, frente a la caída de ceniza y a la posibilidad de que nuevos flujos piroclásticos se desborden de las barrancas principales.

Finalmente, un aspecto que es difícil representar en los mapas de amenaza y de riesgo son las zonas críticas donde los cursos de los ríos y barrancas principales pueden rellenarse por la ocurrencia de sucesivos lahares y modificar su cauce hacia otras zonas que no habían sido activas en el pasado. Para cada río o barranca deberán identificarse estas zonas críticas y realizar un monitoreo visual a través de cámaras o de visitas de campo periódicas durante la época de lluvias. Otro método que ayudaría a este fin es la adquisición y procesamiento de imágenes satelitales de buena resolución.

En el capítulo II de este informe se analizan con más detalle algunos de los aspectos mencionados y se sugieren algunas acciones para el fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana y de las capacidades locales para la prevención y mitigación de desastres.





II

LA GESTIÓN DE RIESGO DE DESASTRES EN EL VOLCÁN DE FUEGO



La gestión de riesgo de desastres es un proceso cíclico y dinámico de toma de decisiones y de acciones que realizan de forma coordinada los diversos actores comunitarios, locales, regionales y nacionales de un territorio antes, durante y después de la ocurrencia de un evento o fenómeno natural peligroso con capacidad de producir pérdidas y daños; para hacerle frente, reducir sus impactos y evitar, en la medida de lo posible, que constituya un desastre, es decir que supere las capacidades de respuesta y recuperación de la comunidad.

El riesgo se construye por la combinación de la naturaleza geológica, geomorfológica e hidrogeológica de un territorio, donde pueden producirse fenómenos naturales peligrosos de diferente magnitud y recurrencia (erupciones volcánicas, precipitaciones intensas, deslizamientos y flujos de escombros, sismos, entre otros), la exposición de comunidades en el área de influencia de estos fenómenos y la vulnerabilidad física, económica, social e institucional de la población en estas comunidades. La exposición y la vulnerabilidad son los únicos factores de esta ecuación que puede reducirse y minimizarse. Pero el monitoreo, vigilancia y conocimiento de la naturaleza, dinámica y evolución de los fenómenos y de las amenazas es de vital importancia para anticiparse a su ocurrencia y delimitar las áreas que pueden resultar afectadas. La gestión de riesgos por tanto se orienta a estos fines, con acciones previas a la ocurrencia del fenómeno peligroso para la prevención y mitigación de sus efectos, para la mejora de la capacidad de respuesta y atención a emergencias durante su ocurrencia y para la recuperación y reconstrucción de las comunidades afectadas después del impacto; cuidando que, al diseñarlas, planificarlas e implementarlas no se incrementen los factores de riesgo, es decir no incrementen el riesgo socialmente construido.

El riesgo de pérdidas y daños en el área de influencia del volcán de Fuego es en general muy alto por la configuración multiamenaza (presencia de actividad eruptiva casi permanente, relieves de alta pendiente y precipitaciones intensas durante las épocas de lluvia anuales), aunado a la exposición de numerosas comunidades en el radio de 10 km de la cima del volcán, muchas de ellas sin el conocimiento y preparación suficiente para hacer frente a los impactos de los fenómenos naturales y proteger los bienes y la vida y/o con recursos insuficientes para retirarse de las zonas de peligro temporal o definitivamente.

La erupción del 3 de junio de 2018, de mayor magnitud que las ocurridas habitualmente en las dos últimas décadas, generó impactos severos en los municipios de Escuintla y Siquinalá (Departamento de Escuintla), Alotenango (Departamento de Sacatepéquez) y Yepocapa (Departamento de Chimaltenango). Provocó la muerte o desaparición de cientos de personas en la comunidad San Miguel los Lotes, la destrucción total de viviendas e infraestructura vial (puentes) y la reubicación de casi 13,000 habitantes de diversas comunidades asentadas en los flancos oeste, sur y este del volcán (Figura 36). Afectó de forma directa o indirecta a más de 1,700,000 personas por los impactos de la caída de cenizas y los flujos piroclásticos a vías de comunicación terrestre (RN14), vivienda, infraestructura (escuelas, puentes, centros de salud), a los campos y fincas agrícolas y a los cauces de barrancas y ríos que desde el volcán drenan hacia el sur.



En el volcán de Fuego, donde la actividad eruptiva es permanente y donde en cada período de lluvias ocurren lahares, debe considerarse la etapa post-desastre, donde las acciones para la recuperación y reconstrucción son prioritarias, como la etapa previa a la ocurrencia del siguiente fenómeno peligroso. Por tanto, es necesario que la recuperación y reconstrucción contemplen los riesgos por erupciones y por lahares a los que estará expuesta la población en la zona y que de forma paralela se trabaje en acciones de prevención, mitigación y de fortalecimiento de capacidades locales para la respuesta, con el fin de desarrollar una efectiva gestión de riesgos.

En este sentido, la SE-CONRED, auspiciada por la ONG PCI y con financiamiento de USAID, en coordinación con el INSIVUMEH, el IGN, el INE, la Fundación para el Patrimonio Natural y Cultural Maya (PACUNAM) y el ICC han formulado la propuesta para el “Monitoreo, vigilancia e instalación de sistema de alerta en el volcán Fuego para el fortalecimiento de la capacidad de respuesta de las poblaciones afectadas”, orientada a identificar las necesidades para el fortalecimiento y ampliación del Sistema de Alerta Temprana (SAT) por lahares y por erupciones en el volcán de Fuego a través de acciones en cuatro componentes: 1) Conocimiento del Riesgo, 2) monitoreo y difusión de alertas, 3) Comunicación y 4) Capacidad de respuesta instalada en el territorio.



Aunque puede existir la limitante de pensar solamente en la componente instrumental de los SAT's (equipos para el estudio del fenómeno y equipos para la emisión de algún tipo de alerta sonora o visual), en realidad su parte más importante es la componente social: por una parte la del mensaje a transmitir (claridad, relevancia, certidumbre, confiabilidad) a través de estos equipos; por otra de las capacidades institucionales de los emisores y de los receptores para elaborar y comprender los mensajes y de su nivel de preparación y coordinación para emprender acciones de respuesta, orientadas a la reducción de pérdidas y daños.

Así, con base en las componentes del proyecto mencionado, a continuación, se identifican las acciones de prevención, mitigación, fortalecimiento de la capacidad de respuesta y atención de emergencias en desarrollo por parte de las instancias con competencias en la gestión de riesgos en Guatemala o aquellas faltantes o posibles para una efectiva gestión del riesgo de desastres en el área de influencia del volcán de Fuego.

FIGURA 36

Informe general de la SE-CONRED del 29 de agosto de 2018 con el consolidado de datos de pérdidas y daños provocados por la erupción del 3 de junio de 2018.



1

CONOCIMIENTO DEL RIESGO

En esta componente se integra la mejora del conocimiento de las amenazas (fenómenos naturales peligrosos), de la exposición y de la vulnerabilidad, para determinar los niveles de riesgo para las diferentes comunidades y zonas de influencia del volcán de Fuego.

1.1 LAS AMENAZAS

La actividad eruptiva y la generación de lahares son las dos amenazas principales en el área de influencia del volcán de Fuego, directamente vinculadas, ya que la primera es la responsable del aporte de materiales volcánicos sueltos en las partes altas del volcán, que son removilizados posteriormente durante las épocas de lluvia. La Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos del INSIVUMEH es la responsable del análisis y caracterización de las amenazas volcánicas, de operar los equipos de vigilancia y monitoreo en los principales volcanes activos del país y de elaborar los productos informativos y divulgativos dirigidos a diferentes actores (a la CONRED en primera instancia y a la población en general) sobre el estado de actividad de los volcanes y los peligros asociados, para responder a tres preguntas fundamentales: ¿Cuándo?, ¿Cómo? y ¿Dónde? pueden ocurrir los fenómenos peligrosos. La vigilancia y monitoreo volcánico y meteorológico, puede dar respuesta en el corto plazo a la primera de estas preguntas, mientras que los estudios geológicos y la construcción de mapas de amenaza volcánica están orientados a aportar información para la gestión del riesgo en el medio y largo plazo sobre cómo puede desarrollarse la actividad eruptiva, con qué niveles de magnitud y donde puede impactar, señalando las áreas potencialmente afectables por los distintos fenómenos que pueden ocurrir.





La Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos del INSIVUMEH estaba conformada por cuatro técnicos en el momento de concluir este informe, tres de los cuales se incorporaron en años recientes, además del volcán de Fuego, trabajan en los volcanes Pacaya y Santiaguito; los tres con altos niveles de actividad eruptiva. Aunque estos técnicos tienen un alto expertise en el volcán de Fuego y se apoyan en la red de observadores locales en el volcán y con otros técnicos de las unidades de sismología y meteorología del INSIVUMEH, el recurso humano de la Unidad de investigación y Servicios Volcánicos para atender el análisis de la actividad volcánica del país es claramente insuficiente. Es por ello que desde la creación de la Unidad, en 1973, se han establecido redes de colaboración con centros de investigación y universidades internacionales, especialmente con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y con la Universidad Tecnológica de Michigan (MTU, con el Dr. William Rose y Dr. Rudiger Escobar, entre otros), a través de proyectos de cooperación o académicos, que permitieron el desarrollo de diversos trabajos de investigación vulcanológica y la ampliación de las redes de monitoreo en el volcán. Fruto de estas colaboraciones se publicó el informe: “Peligros volcánicos en Fuego y Acatenango” por parte del USGS en 2001 (Vallance et al., 2001), que incluye los mapas de peligros volcánicos del volcán de Fuego disponibles hasta la crisis del 3 de junio de 2018. Cabe mencionar también la tesis doctoral del Dr. Rudiger Escobar: “Volcanic processes and human exposure as elements to build a risk model for Volcan de Fuego, Guatemala”, donde se analizan los tipos de actividad, los niveles de magnitud y las características y alcance de los productos volcánicos de las erupciones ocurridas en el periodo actual de actividad, desde 1999 hasta 2013 (Escobar, 2013). En la última década, también colaboraron con el INSIVUMEH diversos grupos de investigación de otras universidades en Estados Unidos, Reino Unido y el Caribe principalmente, entre las que cabe mencionar la Universidad de Edimburgo (Dra. Eliza Calder) para el estudio de los flujos piroclásticos y las condiciones de riesgo, de la Universidad de Bristol (Dr. Matt Watson) para el monitoreo con sensores remotos y de la Universidad de Puerto Rico (Dra. Lizzette Rodríguez) para el monitoreo de gases a partir de campañas anuales con equipos multigas (cámara ultravioleta y espectrómetro infrarrojo).

Estos investigadores se integraron en una red de 23 expertos (Estados Unidos, Reino Unido, México, Italia, Ecuador), a partir del 4 de junio, coordinados por el Dr. Rudiger Escobar, para dar asistencia técnica vía remota a la Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos del INSIVUMEH y elaborar algunos productos indispensables para el manejo de la crisis suscitada por la erupción del 3 de junio. La red se organizó en cuatro comisiones: 1 Vigilancia y Monitoreo, 2 Mapas de peligros por flujos piroclásticos, 3 Mapa de peligro por lahares y 4 Árbol de probabilidad de eventos volcánicos. Como se detalla a continuación, las tres primeras comisiones han participado activamente en la mejora de las redes para la vigilancia y monitoreo y en la actualización de los mapas de amenazas por flujos piroclásticos y por lahares, durante los meses de junio a agosto de 2018. Este grupo continúa trabajando y ha integrado a varias personas de la CONRED y del ICC.

Paralelamente a las actividades para la vigilancia volcánica descritas en el siguiente apartado, la Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos del INSIVUMEH realiza estudios de campo y recopila datos sobre el alcance y volumen de los depósitos volcánicos y efectos de las erupciones, que se integran parcialmente en los boletines diarios y especiales de actividad del volcán de Fuego. Sin embargo, en función de la carga laboral no siempre es posible compilarlos en su totalidad y de forma sistemática. Esta información se transcribe en listados, pero no está organizada en bases de datos, que permita la cuantificación automática del volumen y áreas afectadas por la actividad eruptiva y por los lahares. Sería importante, sistematizar la recolección de esta información, tomando como punto de partida y referencia metodológica el trabajo de Escobar (2013) donde se analizan las erupciones y productos volcánicos emitidos durante el actual ciclo de actividad hasta el año 2013. Cabe señalar, que al no ser posible salir al campo después de cada evento eruptivo para la toma directa de los datos (carga laboral, condiciones meteorológicas, peligrosidad por actividad eruptiva en curso), la consecución de estas actividades depende de la implementación de un monitoreo térmico y de sensores remotos vía satélite permanente, del que actualmente no se dispone.



Para la crisis del 3 de junio de 2018 se recopilaban datos de presencia y espesores de caída de ceniza que se publicaron en un mapa preliminar en la página web del INSIVUMEH. También se recopilaban datos de los alcances y volúmenes estimados de los depósitos de flujo piroclástico en las barrancas del volcán que fueron afectadas, aunque esta información, por ser preliminar, no ha sido publicada. El Dr. Rudiger Escobar y el INSIVUMEH, con financiamiento de la National Science Foundation de los Estados Unidos, desarrollan actualmente un proyecto de investigación para la caracterización de los depósitos y el estudio de la dinámica de la erupción del 3 de junio de 2018.

Por el abundante historial de erupciones del volcán de Fuego se dispone de un conocimiento bastante amplio sobre los tipos de actividad volcánica, de los niveles de magnitud posibles de las erupciones (escenarios eruptivos) y de los fenómenos asociados a ella (caída de ceniza, emisión de balísticos, flujos de lava, flujos piroclásticos, ondas de choque y lahares). La crisis del 3 de junio de 2018 puso evidencia dos aspectos relevantes: en primer lugar, las carencias para el pronóstico de esta actividad, asociadas a multitud de factores (pocos equipos, funcionamiento deficiente de algunos de ellos, limitaciones para el análisis de la información, sobrecarga laboral del personal del INSIVUMEH), entre los cuales cabe destacar la complejidad del fenómeno eruptivo en sí mismo, en un volcán de conducto abierto como Fuego, que no siempre permite anticiparse a la actividad eruptiva por la falta de precursores claros; y por otra parte la carencia de mapas de amenaza volcánica actualizados y socializados que permitieran a los diferentes actores que viven y trabajan en el volcán de Fuego conocer las áreas de posible afectación de los fenómenos asociados a la actividad eruptiva.





A raíz de la crisis del 3 de junio de 2018 se generaron mapas de amenaza volcánica actualizados para los fenómenos de flujos piroclásticos y de lahares. Las comisiones de la red de expertos internacional dedicadas a la elaboración de los mapas de amenaza, en las que participa el INSIVUMEH, generaron el Mapa Preliminar de Amenaza por Flujos Piroclásticos (Crisis Volcán de Fuego, junio 2018) y los Mapas preliminares de amenaza de lahares (Crisis eruptiva del volcán Fuego, junio 2018) para los escenarios (A) lluvias moderadas y (B) lluvias muy intensas (descritos en el capítulo I de este informe). Los mapas están disponibles en formato imagen en la página web del INSIVUMEH desde finales del mes de junio, pero no fue hasta hace pocas semanas que estas imágenes son de alta resolución. Los mapas también pueden visualizarse en 3D en un web-map elaborado por la ONG MapAction, como apoyo al INSIVUMEH y al proyecto Hazmap (en formulación) de la Universidad de Edimburgo. Aunque existe una versión antigua de mapas de amenaza por caída de ceniza (Rose e al., 1988, ver capítulo I de este informe), por el momento, no se han elaborado mapas de amenaza actualizados por caída de ceniza, por emisión de fragmentos balísticos y por flujos de lava en el volcán de Fuego.

Es importante señalar que la construcción de estos tipos de mapas normalmente conlleva el trabajo de varios especialistas durante meses, incluso años, para el análisis de la actividad eruptiva, la definición de escenarios eruptivos, la reproducción de depósitos volcánicos conocidos con software de simulación y finalmente la simulación de los diferentes escenarios seleccionados, además del proceso de edición posterior del mapa para su publicación. Los mapas de amenaza para la crisis volcánica de Fuego se elaboraron en un tiempo inferior a las cuatro semanas, por lo que se consideran preliminares y no tienen por el momento una memoria técnica acompañante que describa la metodología utilizada para su construcción y los resultados desplegados. Sin embargo, debe ponerse en valor que están sustentados por el consenso de un número grande de especialistas del INSIVUMEH, del VMAP, del USGS, de la Universidad de Edimburgo, de la Universidad de South Florida y de la Universidad Tecnológica de Michigan y que delimitan las áreas con amenaza alta y baja por flujos piroclásticos y por lahares, aspectos prioritarios para la planeación de acciones de gestión de riesgo y desarrollo durante la presente etapa de reconstrucción.



El uso de estos mapas por parte de otras instancias participando en la gestión de la crisis (SE-CONRED, UPV, COE-Escuintla, ICC, ONG's, entre otras) ha sido por el momento muy limitado, por diversas razones, pero probablemente por tres principales: el grado de confiabilidad y relevancia de los productos, las limitaciones para la comprensión de su construcción y contenido y finalmente por la imposibilidad de obtener los productos con buena resolución y en un formato que permita el análisis combinado con otras capas de información. Es de vital importancia explicar cómo se han elaborado estos mapas y lo que significan, ponerlos en valor y posicionarlos como herramientas oficiales de base para todo el sistema de protección civil, instancias gubernamentales y de cooperación internacional para realizar cualquier análisis de riesgo, recomendación o acción. Un aspecto que podría ayudar a este fin es que estos mapas estuvieran disponibles en formato "shape-file"(.shp o .kmz para Google Earth y Google Maps) para que los diferentes organismos e instituciones pudieran integrarlos a sus sistemas de información geográfica. Por el momento, en el geoportal de la SE-CONRED los mapas de amenaza desplegados para el análisis de la crisis son los del USGS de 2001.

Más allá del producto en sí mismo, es necesario que las diferentes instancias del sistema de protección civil respeten las funciones sustantivas de cada institución y comprendan que la evaluación de las amenazas y la construcción de los mapas no puede realizarse exclusivamente con base en la observación visual, los registros de precipitación o la observación de los depósitos en campo, datos muy importantes pero no suficientes, sino que requieren de un análisis más complejo y multiparamétrico, el uso de herramientas especializadas y la formación y experiencia de los especialistas en vulcanología.

Sin embargo, las sinergias que el INSIVUMEH pueda establecer con otros actores nacionales con capacidad para el análisis de amenaza y muy especialmente con el ICC deben potenciarse, para aunar esfuerzos y recursos que pueden traducirse en mejores productos. Personal del ICC trabajó durante la crisis en la producción de mapas de amenaza por lahares (a partir de simulaciones con el software LaharZ; Davis, 2018), obteniendo un producto similar al que produjo el INSIVUMEH con apoyo del grupo de expertos internacional, pero que requiere ser validado tanto en su contenido (volúmenes simulados y valores de H/L) como en su diseño, por personal de la Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos del INSIVUMEH, con el fin de no duplicar esfuerzos y principalmente de no confundir a los potenciales usuarios con dos productos parecidos. Con este tipo de colaboraciones, podría reducirse parcialmente la dependencia de la asistencia técnica internacional, que por otra parte es importante y relativamente sencilla de mantener (a través de comunicación on-line), ya que supone una fortaleza para el grupo de vulcanología en Guatemala. El trabajo coordinado entre el ICC e INSIVUMEH ya es una realidad en el ámbito del monitoreo hidrometeorológico y podría ampliarse a aspectos de análisis de amenazas geológicas e hidrometeorológicas. Sería de especial interés en esta etapa de la crisis la evaluación de los pronósticos climáticos y meteorológicos regionales y locales para disponer de datos más precisos sobre los máximos de precipitación esperados en el volcán de Fuego para lo que resta de la temporada de lluvias, y de esta forma conocer el volumen de los lahares que pueden formarse.

Actualmente el grupo de expertos internacional está elaborando una nueva versión de los mapas de amenaza de lahares, una vez analizados y estimados los volúmenes de material volcánico disponibles en las barrancas del volcán por la erupción del 3 de junio y una vez obtenidos los DEM de mejor resolución para algunas de las barrancas en el volcán. Por el momento se están realizando simulaciones con el software LaharZ (Schilling, 1998), ya utilizado para el mapa disponible actualmente y por otra INSIVUMEH trabaja con la Dra. Lucia Capra del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (CGEO-UNAM) realizando simulaciones con el software FLO-2D (O'Brien et al., 1993), herramienta que considera la concentración de los flujos y la dinámica de incorporación de materiales durante el transporte. Los resultados de las simulaciones permiten obtener, además de las áreas de inundación, otros datos relevantes para el análisis de amenazas, como el espesor de los flujos y la fuerza de impacto para un área en específico.

Como se mencionó en el capítulo I de este informe, la disponibilidad de información topográfica actualizada y la obtención de DEM's o de imágenes de alta resolución que reflejen los cambios morfológicos en el volcán a consecuencia de su continua actividad es fundamental para el análisis de amenazas, especialmente en la etapa de simulación de cualquier tipo de flujo (Stevens et al., 2002; Capra et al., 2011) y en el análisis de la dinámica fluvial y de áreas críticas donde la sedimentación de lahares puede generar la modificación de los cauces. El estudio de la distribución y volúmenes de nuevos depósitos de material volcánico y la actualización de los mapas de amenaza (mapas dinámicos) dependerá de poder sistematizar el acceso y análisis de imágenes satelitales (algunas de uso libre, la mayoría comerciales) y de poder obtener periódicamente (cada 2 o 5 años) nuevos DEM's (levantamiento y procesamiento de datos).

Para las áreas críticas (ver capítulo 1 de este informe) se sugiere un seguimiento más frecuente (cada año antes y después de la temporada de lluvias), con levantamientos de poca extensión ($<1 \text{ km}^2$), ya sea a través de drones o con métodos topográficos estándar (estación total).

Para el caso de volcán de Fuego, en el momento de la erupción del 3 de junio de 2018, se disponía de dos DEM: uno con resolución de 20 m del año 2006 y uno posterior, con resolución de 12.5 m, del año 2011 (ALOS2). Por tanto, no incluían los cambios de topografía generados por la actividad eruptiva y de lahares de los últimos años.

A raíz de la crisis del 3 de junio de 2018 se realizaron diversos esfuerzos por parte de las instituciones académicas del grupo de expertos y de la iniciativa privada para la obtención de imágenes de alta resolución, satelitales o con drones, que permitieran la elaboración de DEM actualizados de algunas de las barrancas principales donde el emplazamiento de flujos piroclásticos había sido más importante. El primero de ellos fue el levantamiento fotográfico con naves no tripuladas a 600 m de altura realizado por Aerobots, S.A.(Guatemala) el lunes 4 de junio de 2018 en la zona de impacto de la erupción. A partir de las fotografías se elaboró un ortomosaico de 0.3 m/pixel y un DEM con resolución espacial de 1 m/pixel. Posteriormente también se utilizaron imágenes satelitales libres del Open Data Program de Digital Globe y de otros satélites como Sentinel2 del programa Copernicus.

El levantamiento topográfico con tecnología LIDAR, aunque sería de mucho interés obtenerlo para todo el volcán, tiene un altísimo costo, que difícilmente es asumible por alguna de las instituciones u organismos que trabajan en la zona en solitario. En caso de ser posible realizar levantamientos parciales se recomienda priorizar las zonas de la barranca Las Lajas hasta su confluencia con el río Guacalate y más al sur hasta el paso de este río por Escuintla y el cauce del río Ceniza desde su cabecera hasta la zona de Las Palmas o de ser posible hasta la carretera CA2. La barranca Seca y el río Pantaleón también son importantes a considerar.

Otras zonas de interés, tanto para el levantamiento de la topografía de detalle, como para la realización de análisis de detalle sobre amenaza por actividad eruptiva, lahares e inundaciones, son aquellas donde se planea realizar intervenciones de reconstrucción y/o reubicación de la población que actualmente permanece en los albergues temporales o de transición unifamiliar (ATUs).



1.2 LA EXPOSICIÓN

La actualización de la información relativa a la cantidad y distribución de personas, bienes e infraestructura es un aspecto que debe abordarse con urgencia, para poder analizar correctamente los niveles de riesgo para la población en el volcán de Fuego y para la planificación de acciones de respuesta y atención a emergencias en caso de una futura crisis volcánica.

La información sobre la población disponible corresponde a la del Censo de Población 2002 y para los consolidados municipales a la de las proyecciones para 2010 del INE. Es importante señalar que esta información está desactualizada (no registra el crecimiento de población y asentamientos de los últimos 15 años), incompleta (se encuentran varias entradas sin datos de población) y presenta errores (asignación de comunidades a municipios diferentes a los de su ubicación, p. ej. en el caso de Siquinalá). En el censo, las diferentes comunidades son clasificadas como ciudades, pueblos, caseríos, aldeas, fincas y granjas en función de la infraestructura de servicios de la que disponen, más que a rangos de número de población. Especialmente para aquellas categorías que corresponden al entorno rural, como en el caso de la zona proximal del volcán Fuego, la ausencia de datos es una constante.



Parte de los datos (tipo de población e infraestructura vial y educativa) se encuentra en algunas capas de información en el repositorio del Sistema Nacional de Información Territorial (SINIT) de la Secretaría de Planeación y Programación de la Presidencia (SEGEPLAN, <http://www.segeplan.gob.gt/nportal/index.php/ide-descargas>), que se han utilizado en este informe. Estas capas de información no incluyen los datos de cantidad de población para cada tipo de asentamiento.

El INE está levantando actualmente datos para un nuevo censo nacional, los cuales serán procesados y estarán disponibles aproximadamente dentro de un año. Existe la duda si en la actual situación de crisis en el área de influencia del volcán, con parte de la población reubicada, el levantamiento del censo en este sector podrá ser completado. Por ejemplo, algunas comunidades asentadas sobre la carretera núm. 6, autoevacuaron por algunos días, el día de la erupción y posteriores, pero a finales de julio y desde hacía algunas semanas habían regresado y permanecían en la zona (p. ej. Don Pancho, La Reyna, El Rodeo), mientras que otras permanecían reubicadas (p. ej. La Trinidad) principalmente en la cabecera municipal de Escuintla, ya sea en los albergues oficiales o los no oficiales. Por otra parte, los datos del número de personas y familias en estos dos tipos de albergues varían en función de la fuente que se consulte (geoportal de SE-CONRED, SOSEP y OIM).





El geoportal de la SE-CONRED despliega los datos de número de habitantes e infraestructura para cada asentamiento, información que resulta del trabajo de su Área de Sistemas de Información Geográfica de vincular la capa de información de poblados de SEGEPLAN con los datos del censo del INE. Sin embargo, para las visualizaciones “Arcos de Decisión” y “Cuadro de mando” los datos son parciales, mostrando principalmente los de los Departamento de Escuintla y Sacatepéquez y parecen no haber sido actualizadas en las últimas semanas. La visualización “Búsqueda de Personas” es la más completa para la zona de influencia del volcán de Fuego y permite contabilizar el número de personas y también de estructuras, pero sin diferenciar su tipo. Por otra parte, la SE-CONRED y específicamente su Unidad de Prevención de Volcanes (UPV) y el COE Departamental de Escuintla disponen de algunos datos de mayor detalle sobre los asentamientos en el volcán de Fuego (cuenca alta), a los cuales no se ha podido tener acceso, pero estos no están organizados para generar capas de información para un sistema de información geográfico y parecen ser variables según las diferentes áreas de la CONRED con las que se consulta. También otras instancias como el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación disponen de datos de algunas de las comunidades donde desarrollan intervenciones, pero normalmente organizada por número de familias, sin un mayor detalle del número de personas.



En la propuesta para el fortalecimiento del SAT-Lahares se contempla el levantamiento de información para la actualización del censo en el área de influencia del volcán, actividades que corresponderían específicamente al INE y al IGN. Sería importante que estos levantamientos de información incluyeran además del número de personas (por edad, género, datos de su procedencia de origen), de sus modos de vida y de la infraestructura disponible en las comunidades (vivienda, centros comunitarios, centros de salud, escuelas y centros de culto), información sobre las zonas de paso e infraestructura vial sobre ríos y barrancas. Deberían georreferenciarse también los recursos de comunicación en las comunidades (radios, antenas para telefonía móvil, etc.) y la totalidad de albergues temporales y de transición unifamiliar.

Sería importante también unificar criterios sobre la delimitación de las áreas de exposición o de influencia de las amenazas en el volcán de Fuego, atendiendo en primer lugar a criterios geomorfológicos, geológicos e hidrogeológicos y en segundo lugar a criterios geográficos y demográficos (concentraciones de población y recursos, infraestructura vial y de comunicaciones estratégica); con el fin de priorizar y tipificar las acciones necesarias para la preparación de la población y la reducción de riesgos. Como se mencionó en el capítulo I de este informe las áreas de exposición son diferentes según la amenaza considerada: en el caso de la caída de piroclastos y ceniza o la emisión de fragmentos balísticos es adecuado delimitar círculos concéntricos en torno al cráter del volcán; sin embargo para las amenazas asociadas a flujos piroclásticos o a lahares el área de exposición abarca todas las laderas del volcán, extendiéndose al suroeste, sur y sureste hasta el sur de la CA2, especialmente en los márgenes de los principales ríos y barrancas.

1.3 LA VULNERABILIDAD

Dentro de esta área de influencia, la zona de exposición alta y muy alta definida en el capítulo I de este informe deben priorizarse las acciones de organización y fortalecimiento comunitario, entre ellas la preparación de planes de prevención y mitigación comunitarios elaborados a través de un proceso participativo que identifique las amenazas, vulnerabilidades, riesgos y recursos de cada comunidad; así como de mejora de los sistemas de comunicación para la transmisión y recepción de alertas (SAT). En el medio-largo plazo deberá priorizarse esta zona en términos de gestión territorial y ambiental, desincentivando el crecimiento de la población en esta zona de alta y muy alta exposición.

Los datos de un censo más completo podrían arrojar mejor información y más completa sobre diversos aspectos de vulnerabilidad física: número de personas, tipos de vivienda, localización de infraestructura social, entre otros datos. Podría también aprovecharse el levantamiento de censos de detalle para indagar sobre otros aspectos de vulnerabilidad social como organización, participación de las mujeres, conocimiento de los fenómenos peligrosos, disponibilidad de planes de desarrollo, etc.



En las zonas de alta y muy alta amenaza de los fenómenos asociados a la actividad eruptiva, específicamente los flujos piroclásticos, la exposición es el factor determinante de configuración de riesgo. La reducción de la exposición de forma permanente, es decir la reubicación de las comunidades asentadas en el radio de 10 km del cráter del volcán, sería la vía más efectiva para evitar futuros desastres. Aunque con probabilidad la reubicación de todas las comunidades en esta zona de alta amenaza y alta exposición no es una posibilidad real, ni tan siquiera en el medio-largo plazo, sí debería incentivarse en el caso de aquellas comunidades que estén dispuestas a llevarla a cabo. Una de las condiciones que deberá asegurarse es la continuidad en el uso de las tierras de cultivo. A este respecto existe preocupación por parte de las autoridades de protección civil de que, en el medio plazo, una vez reubicadas las comunidades, estas se re-asienten o dupliquen, incrementando nuevamente la exposición. La regulación mediante legislación de uso de suelo, ambiental y urbanística es la única vía para evitar esta situación.

Tanto si es posible o no la reubicación de algunas de estas comunidades, la implementación de un sistema de alerta temprana efectivo en el corto plazo, que sea capaz de anticipar la salida de la población a la ocurrencia de las fases paroxísmicas, más intensas de la actividad eruptiva, es fundamental para la reducción del riesgo. Además del correcto funcionamiento de los equipos de alerta (ver sección siguiente), deberá asegurarse la comprensión de los mensajes de alerta y alarma de los SAT, desde las instituciones a la población. Para ello, es imprescindible desarrollar programas de formación y concientización de la población sobre la naturaleza volcánica y los peligros asociados, orientada a la comprensión básica de los fenómenos, así como la elaboración de planes comunitarios de prevención y mitigación de riesgos, desarrollados de forma participativa, que incluyan la identificación de peligros, zonas vulnerables y de recursos para establecer zonas de albergue, rutas de evacuación y un plan de respuesta a emergencia. Se ha identificado que aquellas comunidades donde INSIVUMEH y CONRED tenían trabajo previo tienen un mejor conocimiento del riesgo. En el primer caso INSIVUMEH tiene estaciones y observatorios en La Reunión, Panimaché y Sangre de Cristo. En el caso de la CONRED el COE- Departamental tiene contacto directo con líderes de algunas de las comunidades más grande (p. ej. La Reyna), mientras que la UPV tiene contactos con diversas comunidades, algunas de ellas más aisladas como La Rochela.

Deberá tratarse también la reducción de la vulnerabilidad institucional. Por una parte, es urgente la dotación de más recursos humanos y logísticos tanto a las áreas del INSIVUMEH, como de la CONRED que trabajan en la reducción del riesgo volcánico. Por otra parte, sería importante mejorar la comunicación y los planes de acción entre las áreas de estas instituciones, especialmente de la CONRED.

En el actual organigrama de la CONRED al menos tres áreas trabajan directamente en el volcán de Fuego: el área de Sistemas de Alerta Temprana, la Unidad de Prevención de Volcanes (UPV) y los COE departamentales (Escuintla, Acatenango y Chimaltenango). Entre estas áreas hay cierta duplicidad de funciones, o más bien una distribución de zonas o comunidades con las que se establece relación de trabajo, sobre todo en función de los recursos disponibles de cada una de las áreas de la CONRED para el desplazamiento hacia las poblaciones o para el contacto con ellas (algunos miembros de la UPV o del COE-Escuintla cubren de recursos personales el saldo de teléfonos celulares de líderes comunitarios para asegurar mantener la comunicación con comunidades). No es muy claro si la información que se recopila del monitoreo visual y de lluvias con los contactos en las diferentes comunidades se organiza en bases de datos y si estas son compartidas con el INSIVUMEH. Además de la carencia de recursos, la transferencia deficitaria de información entre las diferentes áreas de la CONRED y la sistematización de procesos de trabajo se identificó como una fuerte debilidad para la efectividad del sistema de alerta temprana. Un aspecto que quizá sería viable modificar en el corto plazo es la incorporación de personal de las áreas locales de la CONRED (COE Escuintla, UPV) en el planteamiento y formulación de los nuevos proyectos para el fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana que se están desarrollando.

La carencia de recursos humanos y logísticos suficientes obliga necesariamente al personal de las áreas de la CONRED con ámbito de trabajo local a tratar de comprender e individualizar los fenómenos peligrosos (flujos piroclásticos, lahares en cada barranca, inundaciones), requiriendo un nivel de detalle en los mapas de amenaza, que no es posible conseguir por la naturaleza de un volcán tan activo como Fuego. Es necesario entender el volcán como sistema y comprender que para algunos fenómenos no es posible identificar a priori cual sector del volcán puede resultar más afectado, por lo que una vez inicia la actividad eruptiva el sistema de alerta y protección civil debe ser capaz de alertar y acompañar al conjunto de la población en las comunidades en todas las laderas del volcán.



2

MONITOREO Y DIFUSIÓN DE ALERTAS

La vigilancia volcánica y de lahares consiste en la adquisición, procesamiento, análisis e interpretación de datos de precursores de actividad volcánica (visuales, sísmicos, de emisión de gases, de deformación del edificio volcánico, entre otros) e hidrometeorológica (cantidad e intensidad de la precipitación, dirección y velocidad de vientos), a través de diferentes equipos y técnicas, con el fin de comprender el comportamiento y evolución de la actividad eruptiva y de la generación de lahares y en la medida de lo posible anticiparse a su ocurrencia. Para una efectiva vigilancia volcánica, además del funcionamiento y mantenimiento de la red de instrumentación para la adquisición y transmisión de datos de calidad, son igualmente importantes los recursos de cómputo para su almacenamiento y procesamiento y los recursos humanos capacitados y entrenados para el análisis e interpretación de la información.

Tradicionalmente en el volcán de Fuego la vigilancia volcánica se ha realizado con el monitoreo visual y el monitoreo sísmico permanente y con el monitoreo de gases de forma discreta (con campañas periódicas o anuales). La adquisición de datos se realiza a partir de los equipos instalados en terreno, los cuales deben transmitir hacia la central de procesamiento (sede INSIVUMEH en Ciudad de Guatemala) en tiempo real o casi-real (por telemetría o internet), donde el personal de las Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos los analiza e interpreta para la redacción y emisión de boletines informativos, que publica en su página web. Otra fuente de datos es el contacto, a través de telefonía celular o radios, con los observadores locales, especialmente cuando la actividad eruptiva está en curso. Esta información también se integra al análisis y se utiliza para la redacción de los boletines. Desde la creación de la Unidad de Investigación y Servicios Volcánicos del INSIVUMEH, la configuración de las redes de vigilancia volcánica ha ido cambiando en el tiempo, pero en general ha sido escasa e insuficiente, y normalmente se ha ampliado con el apoyo de proyectos de cooperación o académicos, principalmente con el USGS y la Universidad Tecnológica de Michigan (Dr. William Rose y Dr. Rudiger Escobar).

Durante la erupción del 3 de junio de 2018, para el monitoreo visual se contaba con dos web-cam (una no transmitía y la otra fue afectada por la erupción) y con la información de observadores locales situados en la Aldea Panimaché (Observatorio OVFUEGO-1 al suroeste) y en Sangre de Cristo (Observatorio OVFUEGO-2 al oeste). Para el monitoreo sísmico se disponía de dos estaciones, una en el flanco sureste (Fuego 3) y otra en el flanco suroeste (Fuego 8), la cual registró la sismicidad previa y durante la erupción pero que no transmitió los datos a la central de registro, por carencia de mantenimiento en las cuotas de internet.



Adicionalmente, hasta la crisis del 3 de junio, el monitoreo de precipitaciones era relativamente escaso para el volcán de Fuego. Las unidades de meteorología e hidrología del INSIVUMEH operan la red de estaciones de esta institución (<http://www.insivumeh.gob.gt:8080/redhidromet/default1.aspx>), con dos equipos cercanos al volcán, uno en el flanco suroeste, en el observatorio volcánico del INSIVUMEH en Panimaché (estación VFUEGO/PANIMACHE) y otro en Antigua Guatemala (estación ANTIGUA GUATEMALA), 18 km al noreste. Aunque el mapa de la red de estaciones en la página del INSIVUMEH muestra la ubicación de otros equipos para el monitoreo climático e hidrometeorológico en Escuintla, en la sede del ICC en Santa Lucia Cotzumalguapa y en la cuenca media del río Achiguate, no es muy claro que estén operando correctamente, ya que no es posible acceder al registro de datos a través de la página web. El ICC también tiene cinco estaciones de su red (<https://redmet.icc.org.gt/>) cercanas al volcán, en la cuenca media de los ríos Cuyolate, Pantaleón, Achiguate y Guacalate. Concretamente son las estaciones Cengicaña en su sede de Santa Lucia Cotzumalguapa, El Bálsamo al suroeste de Siquinalá, Costa Brava en el municipio La Democracia, La Concepción al norte de la cabecera municipal de Escuintla y El Platanar en Acatenango. A excepción de esta última, el resto se encuentran en un radio de 20 km de la cima del volcán.

En las ocho semanas posteriores a la crisis del 3 de junio de 2018, se mejoró significativamente la red de instrumentación para la vigilancia y el monitoreo volcánico y de lahares en el volcán de Fuego y se establecieron colaboraciones para la mejora de la red de estaciones meteorológicas.



El Programa de Asistencia para Desastres Volcánicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (VDAP-USGS, por sus siglas en inglés), donó al INSIVUMEH los insumos para la instalación de tres estaciones multiparamétricas para el monitoreo volcánico y de lahares y para la transmisión de datos vía telemetría a la central de registro en Ciudad de Guatemala. Estas estaciones incluyen sensores para el registro de la sismicidad, de infrasonido, cámara para la adquisición de imágenes y pluviómetro. Durante la última semana de julio y el mes de agosto el INSIVUMEH, junto a personal del VDAP, instalar dos de estas estaciones en la Granja de cerdos Toledo (entre la barranca Las Lajas y el nuevo cauce hacia San Miguel Los Lotes) y en el cauce del río Guacalate a su llegada a la cabecera municipal de Escuintla. La tercera estación se instaló posteriormente en la Finca La Reunión ampliando y actualizando la estación sísmica (FUEGO-3) que se ubicaba en este lugar.

Además del monitoreo de lahares, estos equipos permitirán mejorar también la vigilancia de la actividad eruptiva. Con el monitoreo de la actividad sísmica, de infrasonido y visual se tiene la configuración básica necesaria para una correcta vigilancia de los fenómenos, aunque sería deseable que pudiera implementarse también el monitoreo permanente de gases, el monitoreo con cámaras térmicas y con sensores remotos vía satélite (análisis de imágenes GOES, OMI, entre otras). El monitoreo de la deformación del edificio volcánico, aunque sería relevante, plantea diversas dificultades, tanto por la accesibilidad a las zonas más altas del volcán donde deberían instalarse los equipos, como por la naturaleza de conducto abierto del volcán de Fuego que parece no deformarse significativamente antes de las erupciones (observaciones de deformación con técnica InSAR no han identificado inflaciones o deflaciones del terreno), a diferencia de otros volcanes como Pacaya o Santiaguito, por lo que se considera más prioritario implementar el monitoreo con sensores remotos vía satélite.

Uno de los grandes retos para el INSIVUMEH es asegurar la operación y mantenimiento de todos estos instrumentos y de los equipos para la telemetría, considerando que varios de ellos están altamente expuestos a los impactos de la actividad eruptiva y de los lahares y que es muy posible que se requiera reponerlos parcial o totalmente después de nuevas erupciones. La ubicación de los equipos en fincas privadas busca reducir la exposición al vandalismo, sin embargo es una problemática que también debe considerarse. De igual forma, existen necesidades para el almacenamiento y procesamiento adecuado de los datos de monitoreo, ya que se requiere mejorar la capacidad de la infraestructura y los equipos de cómputo para sustentar las bases de datos de monitoreo sísmico, visual (reportes de observadores locales) y de gases, el posible futuro procesamiento de imágenes satelitales y la instalación de los softwares de análisis de datos y de simulación de peligros volcánicos. Es necesario además que esta información tenga los respaldos adecuados para casos de crisis futuras. Además, como ya se ha mencionado, el trabajo en red es fundamental para la vigilancia y monitoreo volcánicos, de forma que se requiere conexión a internet con un ancho de banda suficiente.



Con la ampliación de la red de vigilancia, otro de los grandes retos para el INSIVUMEH es establecer la capacidad en recurso humano suficiente, tanto en número de personas como en su entrenamiento, para analizar e interpretar los datos procedentes de las diferentes técnicas de monitoreo que ya están funcionando y de aquellas que pudieran implementarse en el medio o largo plazo (monitoreo de gases, análisis de imágenes satelitales).

Con relación a la red de estaciones meteorológicas, el área de Sistemas de Alerta Temprana de la CONRED, junto al INSIVUMEH y el ICC realizó diversos recorridos de campo durante el mes de julio para la localización de sitios donde instalar nuevos equipos en los flancos del volcán de Fuego, más cercanas a su parte alta. Los criterios para la selección de los sitios eran localizaciones donde la CONRED tuviera capacidad ya instalada (observadores y radiocomunicación) para asegurar la transmisión de los datos a las sedes del ICC en Santa Lucia Cotzumalguapa y de la CONRED. Concretamente, el 24 de julio se participó en el recorrido para visitar posibles sitios de instalación en las comunidades Palo Verde y Sangre de Cristo (Figura 37), al oeste del volcán, en el municipio de San Pedro Yepocapa. Para asegurar una cobertura completa, sería necesario localizar otras ubicaciones en la cabecera de la barranca Ceniza y de las barrancas Trinidad o Las Cañas, en los flancos suroeste y sur del volcán, además de otra en la cuenca media del río Pantaleón, en el sector de la comunidad Las Palmas, al norte de Siquinalá. De igual forma, las instituciones responsables de los equipos de adquisición y transmisión de datos de precipitación deberán considerar los costos de su mantenimiento, para asegurar un monitoreo efectivo en el medio y largo plazo.

Tal y como se mencionó anteriormente, la colaboración y relaciones de trabajo entre el INSIVUMEH, la CONRED y el ICC debería fortalecerse en el ámbito del análisis de información hidrometeorológica, para asegurar la obtención de pronósticos de mayor detalle que permitieran conocer a priori el volumen de los lahares que es posible se desencadenen. Esta colaboración podría extenderse en el ámbito del monitoreo vulcanológico y de vigilancia de áreas críticas, aprovechando las capacidades del ICC para involucrar personal en los trabajos de simulación de fenómenos volcánicos, así como en el tratamiento y análisis de imágenes satelitales.

Los datos de la vigilancia y monitoreo volcánico e hidrometeorológico deben transformarse en mensajes de aviso, alerta y alarma para el sistema de alerta temprana. Para ello es fundamental que se establezcan umbrales o indicadores de la actividad (determinado número y tipo de señales sísmicas, niveles de la altura de la columna eruptiva, determinado alcances de los primeros flujos piroclásticos, corroboración con datos del monitoreo visual, por ejemplo) para la emisión de estos mensajes. Los niveles de magnitud de la actividad eruptiva del 3 de junio de 2018 deberían ser considerados por el INSIVUMEH y la CONRED como el escenario mínimo para rediseñar y reorganizar el sistema de alerta temprana. Es urgente que INSIVUMEH, junto a CONRED establezcan o mejoren el protocolo de acción y actuación con base en los indicadores que la ampliación del sistema de vigilancia y monitoreo permitan identificar. Este protocolo debe asociar los niveles de actividad volcánica, con los mensajes de aviso, alerta y alarma (boletines, ver sección siguiente), así como con las acciones para la evacuación de las comunidades.



FIGURA 37

a) Antena de radio de la CONRED en la comunidad Sangre de Cristo, entre las barrancas Seca y río La Playa donde se estudió instalar una nueva estación meteorológica. b) La comunidad, conformada por 34 personas de una misma familia, auto evacuó a la comunidad Concepción después de la erupción del 3 de junio de 2018. A finales de julio solamente algunas personas visitaban la zona para cuidar sus pertenencias y ganado durante el día y se retiraban en la noche al lugar de reubicación. c) Don Inocente es el enlace de la Unidad de Prevención de Volcanes de la CONRED y del INSIVUMEH en esta comunidad y describió con precisión cada uno de los fenómenos volcánicos ocurridos el día 3 de junio.



3

COMUNICACIÓN

En este rubro deben considerarse tanto la elaboración de los mensajes de aviso, alerta y alarma, como asegurar su transmisión y recepción por parte de la población expuesta.

La permanente actividad del volcán de Fuego y la repetitividad en la información contenida en los boletines del INSIVUMEH causó cierta “fatiga” en su lectura y en la subestimación del nivel de aviso que contenían, especialmente en el caso de la crisis del 3 de junio del presente año. La redacción de los boletines del INSIVUMEH es un aspecto fundamental que debe cuidarse. Las acciones que el resto de las instituciones del sistema de protección civil tomen en consecuencia a lo expresado en estos comunicados depende en gran medida de mejorar el grado de confiabilidad entre estas y el INSIVUMEH, así como de haber trabajado previamente un protocolo y plan de acción.

La ampliación y mantenimiento de los sistemas de radiocomunicación, u otros como campanas o mensajes de telefonía celular es vital para el funcionamiento del SAT.

Sin embargo, la población receptora deberá reconocer al emisor de estas alertas como autoridad en la materia. En el momento actual parecería que cada comunidad reconoce solamente como autoridad al personal del INSIVUMEH o del área de la CONRED con la que está en contacto.



4

CAPACIDAD DE RESPUESTA INSTALADA EN EL TERRITORIO

La elaboración de planes de prevención y mitigación de riesgos a nivel comunitario, preparados de forma participativa, deberá identificar los recursos disponibles y los faltantes para emprender futuras evacuaciones. En este sentido la metodología de mapeo comunitario ha sido muy útil en otras zonas volcánicas con problemáticas de riesgos similares a las del volcán de Fuego.

Pero debería buscarse que la elaboración de estos planes de prevención y mitigación constituyeran procesos formativos para la comprensión de los tipos de fenómenos volcánicos y sus impactos, así como para identificar medidas de protección. Estos procesos formativos podrían complementarse con diferentes actividades o programas en los diferentes ámbitos de la comunidad:

■ Programas de escuelas-observatorio con la comunidad educativa. Conjunto de actividades con la población escolar para el mejor conocimiento del volcán (paneles para datos de observación visual, pluviómetros elaborados por los propios estudiantes, entre otros).

■ Programas de difusión radiofónica. Deberían identificarse las emisoras de radio más escuchadas por la población en las diferentes zonas del volcán e implementar una serie de mensajes sobre el volcán y su actividad.

■ Trabajo con líderes comunitarios o comunidades religiosas.

Por otra parte, es importante fortalecer el sistema de la CONRED, especialmente en el nivel local (COE departamentales, alcaldías e instituciones de gobierno en las cabeceras departamentales) en la comprensión de los fenómenos volcánicos, su desarrollo y sus posibles impactos, así como en el entendimiento de cómo se elaboran los mapas de amenazas, su significado y sus limitantes.



REFERENCIAS

■ Alatorre-Ibargüengoitia, M.A., Delgado-Granados H., Dingwell, D.B., 2012. Hazards map for volcanic ballistic impacts at Popocatepetl volcano (México). *Bulletin of Volcanology*, 74, 2155-2169. doi: 10.1007/s00445-012-0657-2.

■ Blong, R.J., 1984. *Volcanic Hazards. A sourcebook on the effects of eruptions*. Academic press, Sydney, pp. 424.

■ Branney, M.J., Kokelaar, B.P., 2002. Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. *Geological Society of London*, 27.

■ Capra, L., Manea, V.C., Manea, M., Norini, G., 2011. The importance of digital elevation model resolution on granular flow simulations: a test case for Colima volcano using TITAN2D computational routine. *Natural Hazards*, 59, 665-680.

■ Davis, R., 2018. Modelación de zonas de amenaza de inundación por lahares, volcán de Fuego, Guatemala, C.A. Informe interno del Instituto Privado para el estudio del Cambio Climático. Julio 2018. pp. 5.

■ Escobar, R., 2013. Volcanic processes and human exposure as elements to build a risk model for Volcan de Fuego, Guatemala. PhD Thesis. Dissertations, Master's Theses and master's Reports. Michigan Technological University, EE. UU. pp. 207. Disponible en: <http://digitalcommons.mtu.edu/etds/638>.

■ Escobar, R., 2018. Some ideas for discussion and inputs for the current lahar hazard assessment at Fuego volcano. Informe interno para el INSIVUMEH y el grupo internacional de expertos en vulcanología. pp. 23.

■ Fagents, S. A., Baloga, S. M., 2006. Toward a model for the bulking and debulking of lahars. *Journal of Geophysical Research*, 111, B10201.

■ Fisher, R. V., 1995. Decoupling of pyroclastic currents: hazards assessments, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66 (1), 257–263.

■ INSIVUMEH, 2012. Volcán de Fuego. Folleto informativo. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Ministerio de Comunicaciones, Transportes y Vivienda, Guatemala. Disponible en: www.insivumeh.gob.gt.

■ INSIVUMEH, 2018. Reposrtes especiales: Erupción del 03/06/2018 del volcán de Fuego, Guatemala (Dulce González, Francisco Juárez, Gustavo Chigna y Carla Chun). Gaceta de la ALVO. Informativo de la Asociación Latinoamericana de Volcanología, núm. 4, julio 2018. pp. 14. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1OWBb5tUaL47FkuFk3sQ4gLKsdATHcsRe/view>.

■ Iverson, R. M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245-296.

■ O'Brien, J., Julien, P., Fullerton, W., 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraul Engineering-ASCE*, 119, 244-261.

■ Patra, A., Bauer, A., Nichita, C.C., Pitman, E.B., Sheridan, M.F., Bursik, M.I., Rupp, B., Webber, A., Stinton, A.J., Namikawa, L., Renschler, C., 2005. Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 1-21.

■ Pierson, T. C., Scott, K. M., 1985. Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research*, 21, 1511-1524.

■ Pierson, T.C., Costa, A., John, E., 1987. A rheologic classification of subaerial-water flows: Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*, Volume VII: 1-12.

■ Rose, W.I., Mercado, R., Matías, O., Girón, J., 1988. Volcanic Hazards of Fuego Volcano, Guatemala. Informe preliminar. INSIVUMEH (Guatemala).

■ Shilling, S.P., 1998. GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. USGS Open-files, 98-638. Vancouver, Washington, USA.

■ - Siebert, L., Simkin, T., Kimberly, P., 2010. *Volcanoes of the World*, 3rd Edition. University of California Press, Ltd., London, England, pp. 551.

■ Simkin, T., Fiske, R.S., 1983. Krakatau 1883, the volcanic eruption and its effects. Smithsonian Institution Press, Washington DC, 464 pp.

■ Spence, R.J.S., Kelman, I., Baxter, P.J., Zuccaro, G., Petrazzuoli, S., 2005. Residential building and occupant vulnerability to tephra fall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 477-494.

■ Stevens, N.F., Manville, V., Heron, D.W., 2002, The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119, 89-105.

■ Tilling, R. I. (editor), 1993. Los peligros volcánicos. World Organization of Volcano Observatories, Estados Unidos, 125 pp.

■ Vallance, J.W., Schilling, S.P., Matías, O., Rose, W.I., Howell, M.M., 2001. Volcano hazards at Fuego and Acatenando, Guatemala. U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Open-File Report 01-431. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/0431/>

RECURSOS EN LÍNEA

■ Earth Observatory, NASA, 2018. Disponible en: <https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=92235>

■ Organización Internacional para las Migraciones (OIM). Matrices de Seguimiento de Movilidad Humana (DTM) para Volcán de Fuego, Guatemala, 2018. Disponible en: <https://mic.iom.int/webntmi/>

■ Portal de la Coordinadora Nacional para la Reducción de desastres (CONRED). Disponible en: <https://conred.maps.arcgis.com/home/index.html>

■ Red de estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Disponible en: <http://www.insivumeh.gob.gt:8080/redhidromet/default1.aspx>

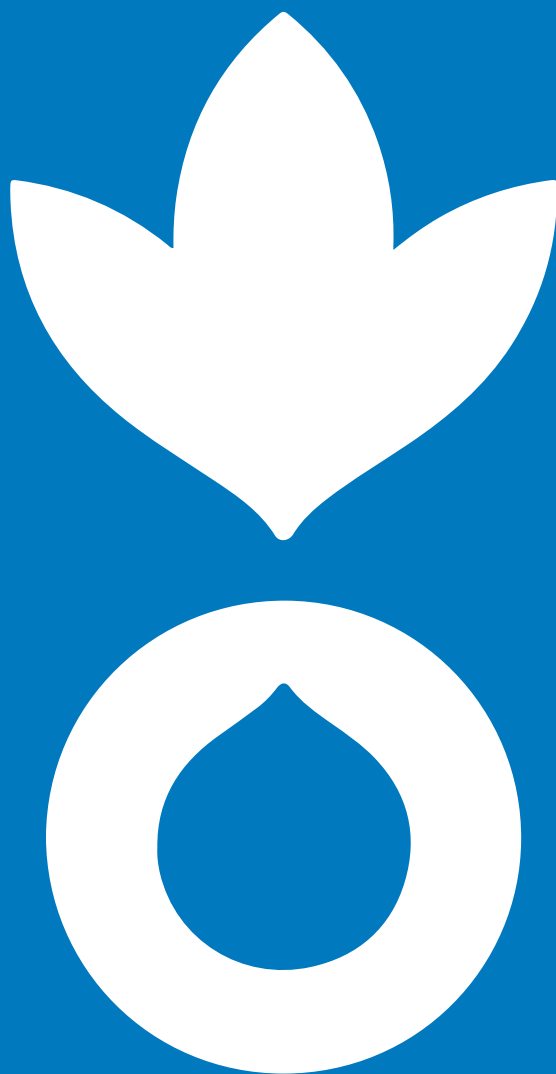
■ Red de estaciones meteorológicas del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). Disponible en: [https://redmet.icc.org. gt /](https://redmet.icc.org.gt/)

■ Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia (SEGEPLAN). Repositorios de información geográfica. Disponible en: <http://www.segeplan.gob.gt/nportal/index.php/ide-descargas>

■ Smithsonian Institution. Global Volcanism Program. Disponible en: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=342090>).

■ Secretaría de Obras Sociales de la Esposa del Presidente (SOSEP). Página de información sobre la Emergencia del volcán Fuego. Disponible en: http://www.losep.gob.gt/?page_id=3064

■ Washington Volcanic Ash Advisory Center. Disponibles en: <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/ARCH18/FUEG/2018F031922.html> y <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/messages.html>



Acción contra
el Hambre Guatemala



achguatemala



achguate