

(Re)Evaluación de la amenaza y el riesgo por lahares en volcanes activos de El Salvador y Guatemala, con nuevas herramientas de simulación

Participante:
Lucía Capra Pedol

El presente informe detalla las actividades realizadas en el marco del proyecto: “Reevaluación de la amenaza y el riesgo por lahares en volcanes activos de El Salvador y Guatemala con nuevas herramientas de simulación”, financiado por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) en la convocatoria de Proyectos de Asistencia Técnica 2020, durante el año y medio de implementación de la iniciativa, entre febrero de 2020 a junio de 2021.

Como se reportó en el primer informe parcial, presentado en agosto de 2020, los países latinoamericanos en general y El Salvador, Guatemala y México en particular, abordaron diferentes medidas de reducción de la movilidad y distanciamiento social por la contingencia sanitaria derivada de la pandemia por el nuevo coronavirus SARS-COV-2. Estas medidas se prolongaron hasta el primer trimestre de 2021 y en concreto la Universidad Nacional Autónoma de México no ha regresado a actividades de docencia e investigación presenciales hasta el momento de presentar este reporte. En este contexto, todas las actividades del proyecto se desarrollaron en la modalidad a distancia, a través de reuniones por videoconferencia y la asignación de tareas a los diferentes integrantes de los equipos de trabajo en los tres países, que cada uno realizó desde su domicilio o desde los diferentes centros de trabajo, cuando fue posible el regreso escalonado.

Las actividades de intercambio y asistencia técnica planteadas en la iniciativa (viajes de las especialistas mexicanas a los países y estancias de investigación de los profesionales salvadoreños y guatemaltecos a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) no pudieron realizarse tal y como estaban planteadas. Aun así, a través del trabajo en línea, se logró el objetivo general del proyecto: la mejora las capacidades de los observatorios de El Salvador y Guatemala para la caracterización, simulación y análisis de la amenaza por lahares y el fortalecimiento la red de colaboración entre especialistas centroamericanos y mexicanos en el ámbito del análisis de amenazas volcánicas.

Modificación de las áreas de estudio

En la propuesta del proyecto GEOF-06 se consideró trabajar en el Cerro El Picacho del volcán de San Salvador en El Salvador, y en el volcán de Fuego en Guatemala.

Para ambos países, durante las reuniones iniciales del proyecto, se analizó que existían un conjunto importante de trabajos previos o bien iniciativas en desarrollo, que, si bien no eran exactamente iguales en los objetivos planteados, sí tenían como meta obtener avances en la caracterización de lahares y/o en la elaboración de mapas de peligro por lahares. Con el proyecto IPGH, el observatorio de El Salvador solicitó trabajar en el volcán de San Vicente (Figura 1a), situado en la parte central del país, donde, en 2009, el impacto de la depresión tropical Ida generó lahares de moderada y gran magnitud que afectaron las poblaciones de Guadalupe y Verapaz, al norte del edificio volcánico, con la pérdida de decenas de vidas humanas y severos daños a la infraestructura de estas poblaciones. De forma similar, en Guatemala, los técnicos del INSIVUMEH plantearon la posibilidad de trasladar la iniciativa IPGH del volcán Fuego al volcán Santiaguito (Figura 1b), uno de los volcanes más peligrosos y riesgosos del país y del mundo (Ranking de volcanes de Guatemala, INSIVUMEH, 2019), en el que durante las últimas cuatro décadas se registraron eventos de gran magnitud y que en años recientes ha presentado eventos de lahar casi anualmente, también con impactos severos a poblaciones cercanas.

Para el volcán de San Vicente (El Salvador) existe un mapa de peligros por lahares elaborado en 2001 por el Servicio Geológico de los Estados Unidos en 2001, que se busca actualizar con este proyecto y otras iniciativas de los años recientes. Para el caso del volcán Santiaguito (Guatemala) existe un mapa elaborado por la Comisión Nacional de Reducción de Desastres (CONRED) y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) basado en datos de campo y orientado a mostrar rutas de evacuación, pero que no es propiamente un mapa de peligros volcánicos.



Figura 1. a) Ladera norte del volcán de San Vicente en el sector central de El Salvador. En primer plano la ciudad de Verapaz afectada por los lahares ocurridos en 2009. b) Volcán de Santiaguito, a los pies del volcán Santa María. En primer plano el cauce del río Nimá II, parcialmente relleno de depósitos de flujos de escombros.

Por otra parte, la finalidad principal de la iniciativa era trasladar y capacitar en metodologías para la simulación de lahares en volcanes activos. A la conclusión del proyecto, los integrantes de los observatorios cuentan con herramientas para

la simulación, con productos preliminares de evaluación de amenaza por lahares en los volcanes estudiados y serán capaces de reproducir las metodologías de trabajo en cualquier área volcánica de sus países.

Modificación del cronograma de actividades y de ejecución de los fondos

El proyecto GEOF-06 aprobado por el IPGH se implementó entre febrero de 2020 y junio de 2021, en la modalidad en línea. La iniciativa, aprobada inicialmente por un año, se extendió por seis meses (de febrero a julio 2021) después de solicitar la prórroga a la Comisión de Geofísica y la Secretaría General del IPGH en agosto de 2020.

La prórroga se solicitó con el fin de poder reprogramar las actividades de intercambio: capacitación en campo y estadía de personal de los observatorios al Centro de Geociencias en México durante la primera parte del año 2021. Sin embargo, no fue posible realizar actividades presenciales debido a que la Universidad Nacional Autónoma de México continuó trabajando en la modalidad en línea durante 2021 y desincentivó la movilidad de los integrantes de la comunidad universitaria. Por otra parte, aunque los observatorios de El Salvador y Guatemala regresaron escalonadamente a actividades presenciales, la incidencia de la pandemia en estos países, además de la ocurrencia de varios fenómenos geológicos e hidrometeorológicos (erupción del volcán Pacaya (Guatemala), flujo de escombros de Nejapa (El Salvador) requirieron la atención del personal de los observatorios en sus países.

Durante la ejecución del proyecto, en las reuniones por videoconferencia, el curso *on-line* y los trabajos de análisis de eventos y simulación de lahares en cada uno de los centros de trabajo, se ejecutaron parcialmente los fondos aportados por las entidades copatrocinadoras de la iniciativa, aproximadamente en un 70%.

La aportación del IPGH, destinada inicialmente a las actividades de intercambio de experiencias, fue reasignada a la compra de insumos para el desarrollo de la iniciativa. Estas compras fueron gestionadas directamente por la Secretaría General del IPGH, a solicitud de la responsable del proyecto y con la aprobación del coordinador de la Comisión de Geofísica, a través de dos desembolsos (Tabla 1).

- Con los fondos del primer desembolso se adquirió una licencia permanente del software FLO2D para los observatorios de El Salvador y Guatemala. Esta licencia es perpetua y permite el uso por parte de diversos usuarios, de aplicaciones no solo en el campo de la geología, sino también de hidrogeología y el acceso a materiales de formación continua a través de la página web e intranet de la compañía que lo comercializa.
- Con el segundo desembolso se adquirieron tres imágenes estereoscópicas de satélite Pleiades con 50 cm de resolución del volcán Santiaguito. A partir de estas imágenes se obtuvieron un modelo de elevación digital (DEM) y un modelo de superficie (DSM) de alta resolución (2 m), insumos principales para la realización de simulaciones con el software FLO2D. Una vez adquiridas

las imágenes fueron tratadas en UN-SPIDER de las Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior (UNOOSA), en Bonn (Alemania) para la obtención del DEM y el DSM. El Salvador contaba con un DEM de alta resolución (Lidar con resolución de 5 m) del área del volcán de San Vicente, que estuvo disponible para la realización del proyecto.

Tabla 1. Aprovechamiento de los recursos otorgados por el IPGH

<i>Fecha</i>	<i>Ejecución</i>	<i>Acceso a los productos para los observatorios</i>
25 de febrero de 2020	Compra del software FLO2D	Entrega de los códigos de acceso a los observatorios
octubre de 2020	Compra de imágenes satelitales Pleiades	Drive compartido con INSIVUMEH

Objetivos planteados y alcances de la iniciativa

El objetivo general planteado en la iniciativa era mejorar las capacidades de los observatorios de El Salvador y Guatemala para la caracterización, simulación y análisis de la amenaza por lahares, a través del uso de herramientas especializadas de cómputo, específicamente el software FLO2D y de la transferencia y adaptación de las metodologías implementadas en diversos volcanes mexicanos para la elaboración de mapas de amenaza.

Al término de la iniciativa se mejoraron las capacidades de los observatorios para la simulación del fenómeno de lahares, tanto en términos de recursos de cómputo, con la adquisición del software para los observatorios y de la imagen satelital para la elaboración de un modelo de elevación digital de buena resolución para el volcán Santiaguito, como de recurso humano, a través de las capacitaciones y reuniones de trabajo para su uso. Si bien, no se lograron finalizar todas las etapas para la elaboración de los mapas de amenaza por lahares, si se tuvo un buen avance en la calibración del software para las zonas de trabajo (volcanes de San Vicente y Santiaguito), que permitirá en relativamente poco tiempo abordar la elaboración de los mapas.

De los objetivos específicos planteados en la iniciativa, se abordaron la mayor parte de ellos y se obtuvieron los alcances de la Tabla 1.

Durante la ejecución del proyecto, el uso de las herramientas de simulación mencionadas permitió obtener información de las áreas susceptibles a ser inundadas en el flanco norte del volcán de San Vicente (El Salvador) bajo las actuales condiciones de las barrancas en un escenario similar al de 2009. De forma similar, para el volcán Santiaguito se obtuvieron las áreas susceptibles de ser inundadas en las barrancas San Isidro, Cabello de Ángel, Nimá I y San José. Estos resultados podrán integrarse en mapas de amenaza preliminares una vez

realizadas otras series de simulaciones en aquellas barrancas, de ambos volcanes, que no fueron consideradas durante la etapa de calibración del software. Los mapas que se elaboren deberán ir acompañados de una memoria que explique la metodología de elaboración.

El desarrollo del proyecto en la modalidad a distancia no permitió ahondar en el objetivo de capacitar al personal de los observatorios en la identificación y reconocimiento de depósitos de lahar en campo. Esta limitante trató de solventarse, al menos parcialmente, con la descripción e interpretación de depósitos de flujos de escombros e hiperconcentrados en fotografías de buena resolución durante las capacitaciones en línea. En los proyectos de colaboración planteados para los próximos años con ambos observatorios se ha considerado continuar trabajando en este aspecto, una vez la situación de contingencia sanitaria en cada país lo permita.

Tabla 1

<i>Objetivos específicos</i>	<i>Alcances</i>
Revisar y compilar la información existente sobre eventos de lahares (geológicos e históricos) en los volcanes de San Vicente (El Salvador) y Santiaguito (Guatemala) y los productos de evaluación de amenazas ya existentes (investigaciones y mapas previos)	<ul style="list-style-type: none"> • Compilación de todos los trabajos previos, de los modelos de elevación digital disponibles, de datos de espesores, granulometría y distribución de depósitos de lahar recientes, de fotografías y de datos de lluvia para el volcán de San Vicente • Compilación de fotografías y datos de campo de eventos de lahar recientes para el volcán Santiaguito • Identificación de la necesidad de contar con un modelo de elevación digital de buena resolución para el volcán Santiaguito
Establecer escenarios de amenaza por lahares para las dos áreas de trabajo según tipos y volúmenes de material volcánico susceptible de ser removilizado y según los regímenes de lluvia en la región	<ul style="list-style-type: none"> • Se describieron y establecieron las características de un escenario de amenaza por lahares en cada una de las zonas de estudio, como punto de partida para la calibración del software. Para el caso de El Salvador, la ocurrencia de un evento de lahar en caso de lluvias intensas asociadas a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos (depresión tropical o huracán), similar al de 2009. Para el caso del volcán Santiaguito en Guatemala, se estableció como escenario para la calibración el de un evento similar al de los lahares ocurridos en 2019
Capacitar a personal de los observatorios centroamericanos en el uso del código computacional FLO2D para la simulación de lahares	Adquisición de una licencia permanente del software FLO2D para el INSIVUMEH en Guatemala y el Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales de El Salvador Capacitación en la modalidad a distancia del personal de los observatorios y de entidades socias (universidades)Un técnico de cada observatorio capacitado y entrenado en el uso del software FLO2D

<i>Objetivos específicos</i>	<i>Alcances</i>
<p>Preparar la información necesaria para la alimentación de los parámetros de entrada del software (modelos de elevación digital, volúmenes de material volcánico susceptible a ser removilizado y condiciones de lluvias) y desarrollar series de simulaciones para cada escenario establecido</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Preparación de datos para su uso como parámetros de entrada (límites de cuenca, lluvias, coeficiente de Manning, infiltración, entre otros) y preparación de los dominios de simulación a partir de los modelos de elevación digital de diferentes resoluciones • Realización de series de simulaciones de lluvia-escorrimento para las cuencas de interés identificadas • Calibración del software FLO2D para el volcán de San Vicente (El Salvador): se reprodujeron con éxito los lahares ocurridos durante el evento hidrometeorológico Ida en 2009 • Adquisición de 3 imágenes satelitales Pleiades del volcán Santiaguito. Las imágenes fueron obtenidas por el satélite en diciembre del 2020 • Obtención de un DEM de alta resolución (2 m) a partir del procesamiento del triplete estereoscópico a 50 cm de resolución • Calibración del software FLO2D para el volcán Santiaguito: se reprodujeron con éxito los alcances y las trayectorias de los lahares que se formaron en los drenajes principales durante 2020
<p>Generar los mapas de susceptibilidad a inundación por lahares para los volcanes de San Vicente (El Salvador) y Santiaguito (Guatemala)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Obtención de información de las áreas susceptibles a ser inundadas en el flanco norte del volcán de San Vicente (El Salvador) bajo las actuales condiciones de las barrancas, en un escenario similar al de 2009 (lluvias extremas), para algunas cuencas seleccionadas • Obtención de áreas susceptibles de ser inundadas en el volcán Santiaguito, en un escenario que corresponde a eventos de lluvias de 60-100 mm de acumulación
<p>Fortalecer la red de colaboración entre especialistas centroamericanos y mexicanos en el ámbito del análisis de amenazas volcánicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se ha establecido colaboración con los departamentos de vulcanología y geología de INSIVUMEH y del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales de El Salvador para la formulación de nuevos proyectos con objetivos complementarios a los de la presente iniciativa
<p>Formar estudiantes de ingeniería y carreras afines de El Salvador y de geología en Guatemala en el análisis de amenazas volcánicas, en colaboración con universidades salvadoreñas (Universidad Nacional de El Salvador) y guatemaltecas (Universidad de San Carlos)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Participación de estudiantes de la Universidad Nacional de El Salvador (UES) y del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala (CUNOR-USAC) en las capacitaciones desarrolladas en el marco de la iniciativa • Incorporación de 3 estudiantes de la UES (El Salvador) en el proceso de trabajo del observatorio, realizando tareas de preparación de datos para las simulaciones de lahares • En Guatemala, INSIVUMEH ha incorporado y capacitado a estudiantes de la CUNOR

Cabe señalar, además, que los observatorios centroamericanos debieron atender sus tareas habituales de vigilancia de fenómenos naturales en el contexto de la pandemia (home-office, dificultad para salidas de campo). Estas labores se intensificaron durante la segunda parte del año 2020 por la temporada de lluvias especialmente intensa y en el primer trimestre de 2021, por la erupción del volcán Pacaya en Guatemala, además de un evento eruptivo del volcán de Fuego con emisión de corrientes de densidad piroclástica en febrero. Por todo ello el avance durante la segunda parte del proyecto fue más lento.

Actividades realizadas

Para la consecución de estos objetivos se desarrollaron capacitaciones estructuradas en un curso corto y reuniones para el trabajo colaborativo mediante videoconferencias. A continuación, se presenta en la Tabla 2 el detalle de estas actividades:

Tabla 2

<i>Descripción de actividad</i>	<i>Fecha prevista</i>	<i>Reprogramación</i>
1. Preparación del plan de trabajo y discusión sobre las áreas de estudio. Compilación de información y trabajos previos en las áreas de trabajo	febrero-marzo de 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Dos reuniones por videoconferencia: 16 de febrero de 2022 con El Salvador y el 17 de febrero de 2020, con Guatemala para la presentación de todos los miembros de la iniciativa, la preparación de la solicitud del primer desembolso de fondos y la discusión sobre las áreas de trabajo • Creación de un espacio de trabajo compartido en drive
2. Presentación del proyecto a las direcciones de los observatorios	1-4 abril de 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Videoconferencia el día 13 de mayo de 2020 para presentación del proyecto a las nuevas autoridades del INSIVUMEH
3. Preparación de bases de datos: 1) de eventos geológicos e históricos de lahar en las áreas de estudio; 2) características y volúmenes de materiales volcánicos involucrados y 3) de precipitaciones (pluviometría).	abril-mayo 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Recopilación de información sobre trabajos previos disponibles, sobre eventos de lahar históricos y recientes, de datos de lluvia y de modelos de elevación digital, que han alimentado el espacio de drive compartido • Dos reuniones por videoconferencia: 20 de mayo de 2020 (DGOA- MARN) y 21 de mayo de 2020 (INSIVUMEH) para la presentación por parte de los observatorios de eventos de lahar y trabajos previos en las áreas de estudio

<i>Descripción de actividad</i>	<i>Fecha prevista</i>	<i>Reprogramación</i>
4. Capacitaciones sobre el software de simulación (FLO-2D) y el uso de otras herramientas para la obtención de los datos de entrada (cálculo de volúmenes y construcción de hidrogramas)	8-19 junio 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Curso corto (cuatro sesiones) sobre caracterización de lahares, su monitoreo y la evaluación de peligrosidad, con énfasis en el uso de simuladores para la elaboración de mapas de amenaza y la introducción al simulador FLO2D (ver programa del curso en Anexo 1). Participaron técnicos de los observatorios vulcanológicos y personal de universidades y entidades socias (23 personas, lista de asistencia en Anexo 2) • Para esta parte del proyecto se utilizó la licencia del software disponible en el Centro de Geociencias de la UNAM
5. Informe parcial de actividades	julio de 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Presentación del informe durante la primera quincena de agosto 2020
6. Preparación de parámetros de entrada para las simulaciones de calibración (DEM, lluvia-escurrimiento, infiltración, coeficiente de Manning)	agosto-noviembre de 2020	<ul style="list-style-type: none"> • 1-2 reuniones de trabajo por videoconferencia para la discusión de avances y la distribución de tareas entre los equipos de trabajo mixtos de los observatorios y de la UNAM • Series de simulaciones con diferentes parámetros de entrada para cuencas seleccionadas en las áreas de trabajo
7. Adquisición del software	septiembre-octubre de 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Compra de licencia perpetua del software FLO2D por parte de la Secretaría General del IPGH con el 1r desembolso de fondos del proyecto. • Entrega a los observatorios de El Salvador y Guatemala
8. Adquisición de insumos para elaboración de DEM de alta resolución	noviembre de 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Adquisición de imagen satelital del volcán Santiaguito por parte de la Secretaría General del IPGH con el segundo desembolso de fondos del proyecto
9. Elaboración del DEM de alta resolución para el volcán Santiaguito.	Diciembre de 2020 y mayo-junio de 2021	<ul style="list-style-type: none"> • Procesamiento de imagen satelital Pleiades para elaboración de un DEM de alta resolución del área de trabajo en el volcán Santiaguito.
10. Calibración del software FLO2D para las áreas de estudio	febrero-junio de 2021	<ul style="list-style-type: none"> • Series de simulaciones para la reproducción de eventos de lahar en las áreas de estudio. • Obtención de áreas preliminares susceptibles a ser inundadas por eventos de lahar, en el marco de un escenario similar a los seleccionados para la fase de • calibración

<i>Descripción de actividad</i>	<i>Fecha prevista</i>	<i>Reprogramación</i>
11. Participación en la Reunión de la Comisión de Geofísica del IPGH 2021	junio de 2021	• Presentación del seminario "Sistema de monitoreo y alerta temprana de lahares" en la reunión de la Comisión de Geofísica del IPGH en Lima (Perú)
12. Informe final	junio-julio de 2021	• Preparación de informe final de la implementación de la iniciativa

Resultados técnicos preliminares

1. Volcán de San Vicente (El Salvador)

El volcán San Vicente o Chichontepec es uno de los 21 volcanes activos del arco volcánico Centroamericano en El Salvador, situado 50 km al este de la ciudad capital San Salvador. No hay registrada actividad volcánica histórica en este volcán, sin embargo, por su envergadura (2,180 m), sus empinadas laderas y la presencia de materiales alterados, sí ha presentado diferentes eventos de deslizamientos y ocurrencia de lahares intra-eruptivos. Se han identificado depósitos de lahares geológicos e históricos, en muchas de las barrancas y quebradas que surcan el conjunto de sus laderas, algunos con volúmenes de más de 100,000 m³ y alcances de más de 6 km. Los eventos históricos más importantes ocurrieron en 1774, 1934, 1996, 2001 y 2009, desencadenados por sismos y/o por precipitaciones intensas. Las características y los depósitos de este último evento, ocurrido en noviembre de 2009, se tomaron de referencia para la calibración del software FLO2D en El Salvador.

1.1. Selección de cuencas de interés y simulaciones de lluvia-escurrimiento

Con relación a este último evento, después del paso del huracán Ida por la costa atlántica de América Central, en noviembre de 2009, un sistema de baja presión con su origen sobre el Pacífico se movió hacia la parte central de El Salvador. Según información del Servicio Nacional para Estudios Territoriales (actual observatorio de Amenazas y Recursos Naturales), este sistema de baja presión provocó lluvias muy intensas durante la noche del sábado 7 de noviembre y madrugada del domingo 8 de noviembre, descargando alrededor de 355 mm de lluvia; 80% de los cuales precipitaron en un lapso de 6 horas. Estas lluvias causaron enormes pérdidas y daños por inundaciones en la cuenca del río Lempa y deslizamientos y flujos de escombros en diversas partes del territorio de El Salvador. La zona más afectada se localizó en las subcuencas con origen en la ladera norte del volcán de San Vicente (Figura 2a), que afectaron los municipios de Guadalupe y Verapaz. La entrada de los lahares al caso urbano de Verapaz (Figura 2b) provocó la pérdida de vidas humanas, numerosos damnificados y cuantiosas pérdidas materiales.

Los deslizamientos principales ocurrieron a una cota topográfica de 1800 msnm en el volcán y los flujos de escombros se desarrollaron al menos en cuatro quebradas en el flanco norte: El Derrumbo, en dirección a la ciudad de Guadalupe; La Quebradona, en dirección a la ciudad de Verapaz; El Infiernillo y Amate Blanco, ambas en dirección a la ciudad de Tepetitán (Figura 2a) Los flujos observados tuvieron la capacidad de ensanchar y profundizar los cauces preexistentes de las quebradas (SNET-MARN, 2009).

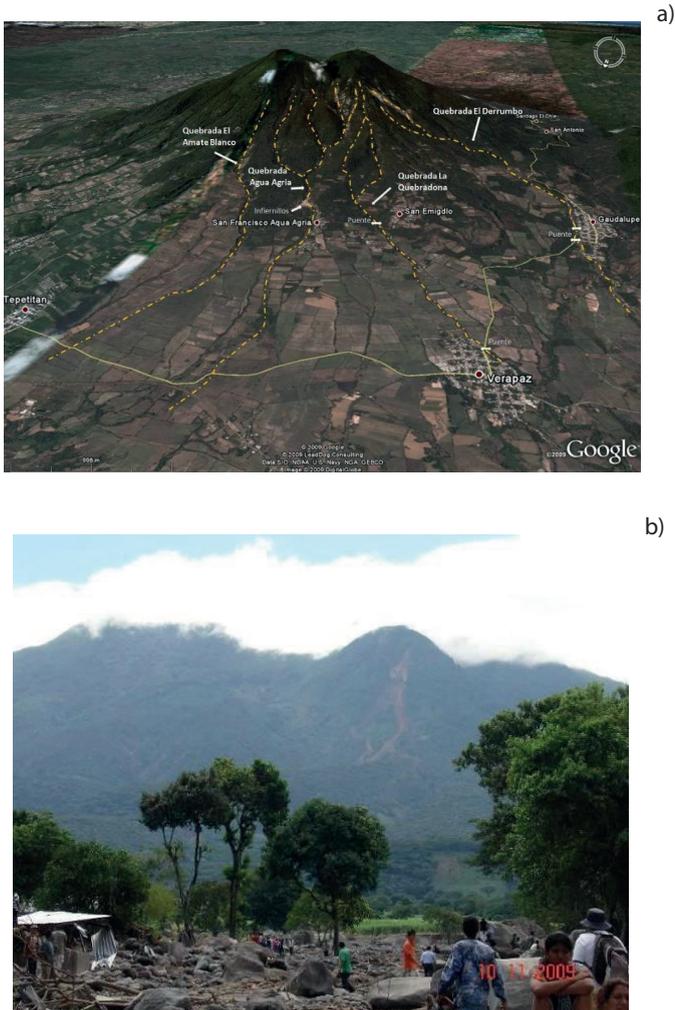


Figura 2. a) Quebradas de la ladera norte del volcán de San Vicente donde se desarrollaron flujos de escombros durante el evento de noviembre de 2009. b) El flujo de escombros desarrollado en la quebrada La Quebradona inundó el casco urbano del municipio de Verapaz (imágenes del informe técnico preliminar realizado por SNET-MARN en noviembre de 2009).

Se seleccionaron e integraron en única área de trabajo (dominio computacional) las subcuencas de La Quebradona y El Derrumbo para la realización de simulaciones de lluvia-escorrimento, primera etapa para la calibración del software FLO2D (Figura 3). El observatorio de El Salvador proporcionó los modelos de elevación digital (Lidar con resolución de 5 m y otro previo con resolución de 10 m obtenido de la topografía 1:50,000) y los datos de precipitaciones obtenidos de la estación San Vicente, ubicada en la cota 2100 msnm. Se calculó una lluvia total acumulada de 484 mm que precipitó entre las 7h del día 6 de noviembre a las 19 h del día 8 de noviembre.

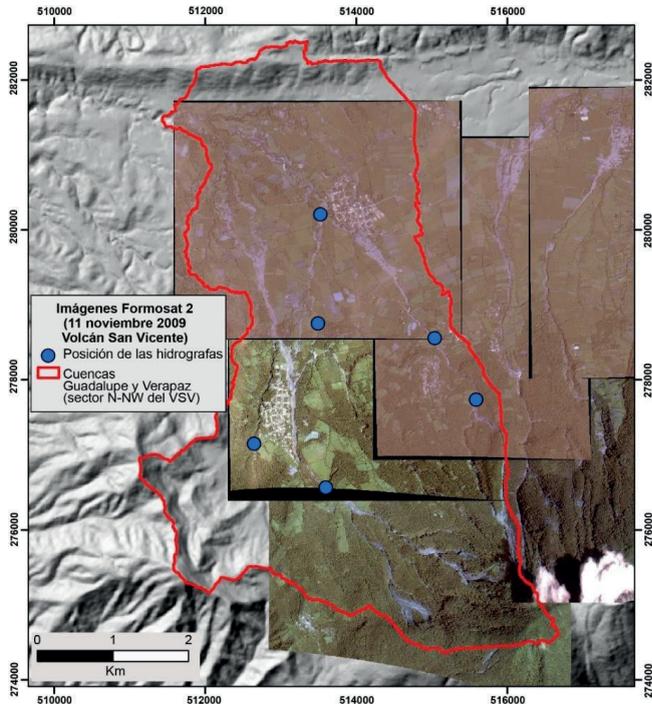


Figura 3. Subcuencas La Quebradona y el Derrumbo en el sector norte del volcán de San Miguel, sobre las imágenes satelitales Formosat 2 obtenidas pocos días después de los eventos de flujos de escombros de noviembre de 2009 y donde pueden observarse sus alcances y áreas de inundación. Las subcuencas se integraron en un único dominio computacional para las simulaciones de lluvia-escorrimento para 5 hidrógrafas en diferentes puntos de la red de drenaje.

En la red hidrográfica de las subcuencas consideradas se calcularon cinco hidrógrafas con el objetivo de tomar en cuenta todos los aportes de escorrentía que pudieron haber influido en la ocurrencia, desarrollo y coalescencia de los flujos de escombros que alcanzaron el casco urbano de Verapaz (Figura 3). En la Figura 4 se muestran las hidrógrafas calculadas.

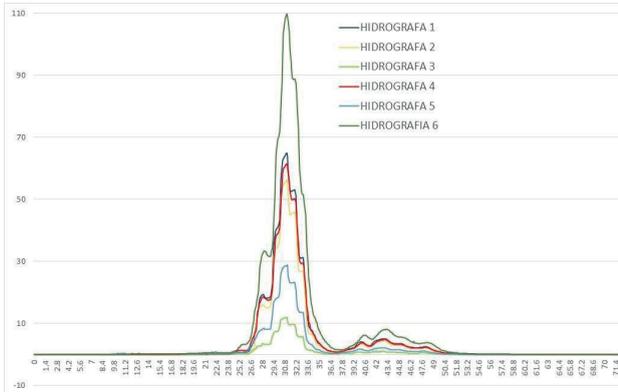


Figura 4. Hidrógrafas calculadas per el evento de los días 6 al 8 de noviembre de 2009. El eje “x” indica el tiempo (horas), el eje “y” muestra la descarga (m³/s) de agua en cada uno de los puntos de ubicación de las hidrógrafas.

1.2. Simulaciones de calibración con el DEM de 10 m de resolución

Una vez obtenidas las hidrógrafas se calcularon las curvas de descarga (incluyendo la carga de sedimento) y se realizaron una serie de simulaciones de prueba-error para reproducir los alcances y áreas inundadas del evento de flujo de escombros ocurridos la madrugada del 8 de noviembre de 2009.

Para estas simulaciones de calibración se utilizó el DEM de 10 m de resolución, ya que reproducía con mayor precisión la configuración de las barrancas en el sector norte del volcán de San Vicente, previa a la ocurrencia de los lahares en noviembre de 2009 durante el paso de la tormenta tropical Ida.

Se obtuvieron buenos resultados de las simulaciones en las barrancas que drenan el volcán hasta los municipios de Guadalupe y Verapaz, tal y como se muestra en la Figura 5. Sin embargo, estas simulaciones no lograron reproducir por completo el área de inundación de los flujos de escombros en el casco urbano de Verapaz. Se atribuye este problema al hecho que los modelos de elevación no reproducen de forma exacta la configuración de las barrancas en el momento de ocurrencia del evento de 2009.

1.3. Simulaciones para la obtención de posibles áreas de inundación con el DEM de 5 m de resolución

Se realizaron también series de simulaciones utilizando el DEM Lidar con resolución de 5m para obtener los alcances y áreas de inundación que tendrían flujos de escombros de magnitud similar a los ocurridos en 2009, en caso de producirse en un futuro cercano con la actual configuración de las barrancas y bajo el supuesto de un escenario de lluvias intensas similar. En la Figura 6 se muestran parte de los resultados de estas simulaciones.

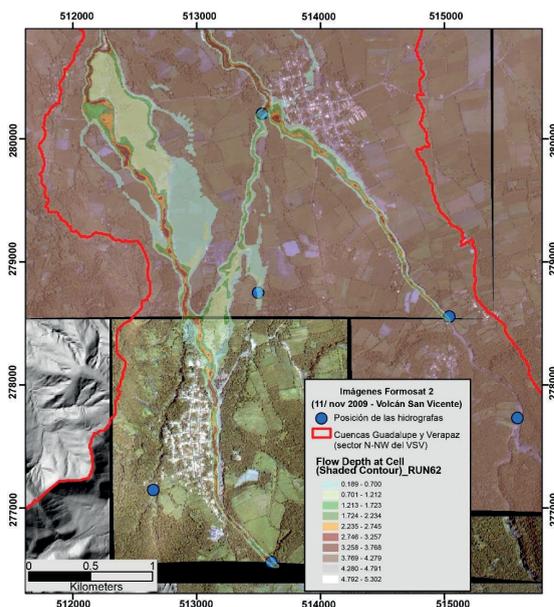


Figura 5. Mapa con las áreas de inundación obtenidas con el software FLO2D de la simulación sobre los depósitos previos.

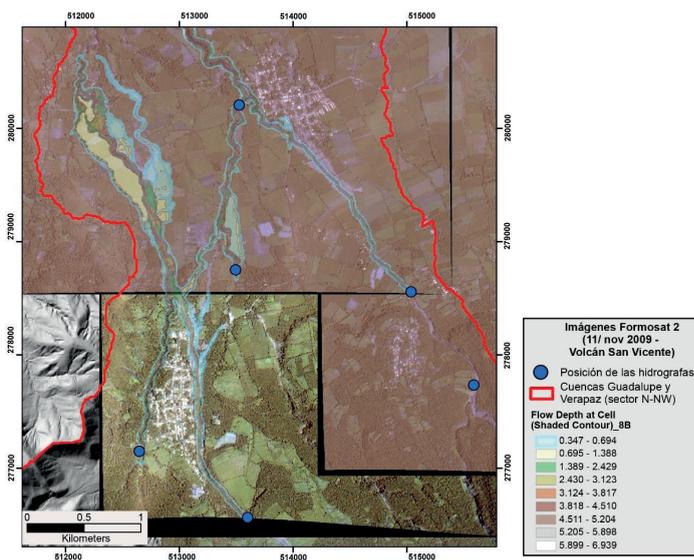


Figura 6. Mapa con las áreas de inundación obtenidas de las simulaciones realizadas con el software FLO2D utilizando el DEM Lidar de 5 m de resolución, que muestra la actual configuración de drenaje, y considerando un escenario de lluvias similar al del evento de noviembre de 2009.

Se tiene previsto continuar con el trabajo colaborativo entre la UNAM y el Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales de El Salvador, hasta finales de este año, para simular condiciones de diferentes escenarios de lluvias y en diferentes barrancas entorno al volcán.

2. Volcán Santiaguito (Guatemala)

El volcán Santiaguito se caracteriza por actividad volcánica efusiva y explosiva frecuente que da lugar a la generación de depósitos de flujos piroclástico en las principales barrancas que drenan hacia el sur del volcán (Figura 7). Este material es fácilmente removilizado durante los eventos de lluvia originando lahares, cuya magnitud depende principalmente del volumen de material disponible y del total de lluvia acumulada. Después de una erupción, la frecuencia y magnitud de estos eventos será mayor e irá disminuyendo de manera progresiva a medida que las laderas del edificio se estabilizan. Por la elevada dinámica del relieve, la morfología de las barrancas es muy cambiante, por lo que, para poder realizar simulaciones ante un posible escenario en las condiciones actuales, es necesario contar con un modelo de elevaciones del terreno lo más reciente posible y con alta resolución.



Figura 7. Imagen satelital del Complejo Santa María – Santiaguito, con la red de drenaje que discurre en sentido N-S, desde los domos del volcán Santiaguito hasta la planicie costera. Las simulaciones de calibración para el volcán Santiaguito se realizaron en las barrancas de los ríos San Isidro, San José y Nimá I. El recuadro en blanco marca la zona descrita en la Figura 8.

2.1. Entrenamiento del software con los DEM's disponibles

Las primeras simulaciones se realizaron en la segunda mitad de 2020 utilizando los modelos de elevaciones disponibles: DEM de 12.5 m de resolución de AlosPalsar

del 2011 y un DEM de 10 m de resolución elaborado por el INSIVUMEH utilizando un mosaico de datos adquiridos en tiempos diferentes. Los dos productos fueron procesados para definir la dirección y la acumulación en la red de drenaje (hidrografía). En ambos casos, los drenajes calculados no reproducen las corrientes principales, sobre todo en la parte alta de las cuencas y a lo largo del río San Isidro. Se realizaron algunas simulaciones de prueba y no se logró reproducir la trayectoria de los lahares en la zona próxima al volcán. Por lo anterior fue necesario la adquisición de un producto satelital que permitiera obtener un modelo de elevación de alta resolución, pero, sobre todo, que pudiera reproducir la red de drenaje actual (Figura 8).

2.2. Preparación de un DEM de alta resolución

Se adquirió un triplete estereoscópico de imágenes Pleiades, tomadas por el satélite en diciembre del 2020. Estas imágenes reproducen la configuración actual de Volcán Santiaguito, ya que desde la adquisición a la fecha no se ha registrado el emplazamiento de flujos de lava o de depósitos de flujos piroclásticos y/o lahares. Las imágenes tienen una resolución de 50 cm y fueron procesadas para la preparación de un Modelo Digital de Superficies (MDS). Considerando el tamaño de la imagen y la capacidad de cómputo disponible se optó por procesar los datos para obtener un MDS a 2 m de resolución. El MDS fue tratado posteriormente para eliminar la vegetación (5-10m) y producir así un Modelo Digital de Elevación (MDE o DEM) a una resolución de 5m.

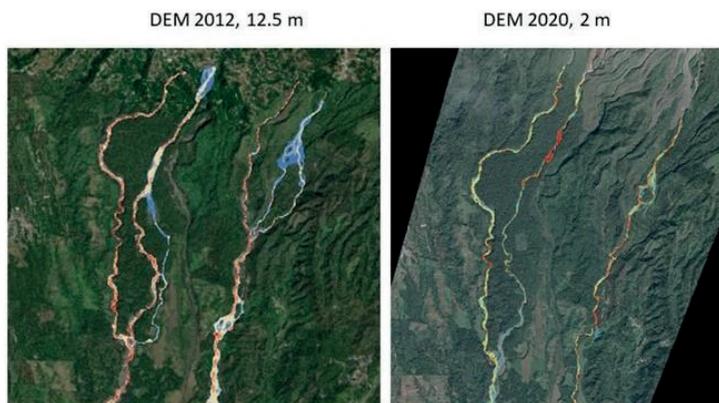


Figura 8. Ejemplo de simulaciones realizadas utilizando el DEM del 2012 (izquierda) y el DEM obtenido a partir de las imágenes Pleiades adquiridas en el 2020 (derecha).

2.3. Simulaciones para la calibración

Para la calibración de las simulaciones con el código FLO2D se decidió trabajar con los eventos de lahar registrados durante la temporada de lluvia del año 2020. Para la construcción de la curva hidrográfica se utilizaron los datos de la estación de

lluvia Desarenador Concepción, localizada hacia el SW del volcán y muy cerca de la barranca San Isidro (Figura 9a), en donde se detectaron los eventos en los meses de junio y agosto del 2020. Con los datos disponibles (Figura 9b) fue posible definir una curva de descarga (Figura 10) que reprodujo las profundidades observadas en varios puntos a lo largo del río San José.

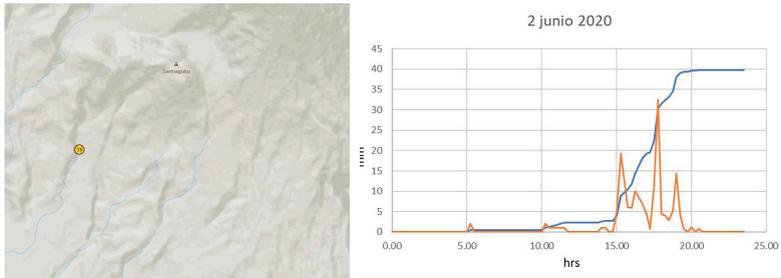


Figura 9. a) Localización de la estación de lluvia Desarenador Concepción (izquierda) y b) Lluvia registrada el 2 de junio del 2020 (línea naranja) y lluvia acumulada (línea azul) utilizada para definir la curva de descarga para el evento observado en el río San Isidro (derecha).

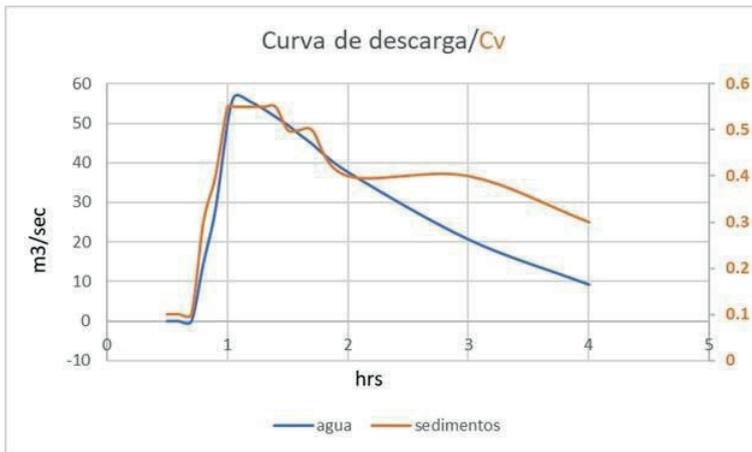


Figura 10. Curva de descarga calculada per el evento del día 2 de junio del 2020.

A partir de los resultados preliminares y con el DEM del 2020 a alta resolución, ya se cuenta con las bases para poder realizar simulaciones para otros escenarios syn- y pos eruptivos observados en la historia eruptiva reciente del volcán Santiaguito, así como eventos asociados a fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios como han sido los huracanes Stan, Mitch y ETA, entre otros.

Consideraciones finales

El presente proyecto ha sido de suma importancia para fortalecer las colaboraciones entre México, Guatemala y El Salvador para el estudio y evaluación de la amenaza por lahares, fenómeno natural que, por la posición geográfica y las características geodinámicas, son eventos muy frecuentes en Centro América y que, en años pasados, han provocados ingentes daños y pérdidas humanas. A pesar de las restricciones para la realización de estancias académicas, la nueva planeación de las actividades, y la autorización para un uso alternativo de los recursos, ha permitido lograr los objetivos principales del proyecto. Actualmente el personal de El Salvador y del INSIVUMEH cuentan con los insumos y las herramientas necesarias para poder seguir con la evaluación de la amenaza por lahares en ambos países. El éxito alcanzado con este primer proyecto asienta las bases para poder seguir colaborando entre las partes, en la propuesta de nuevos proyectos de colaboración, así como en el acompañamiento para dar continuidad a la evaluación de la amenaza por lahares y en la construcción de los mapas de amenaza.

Anexo 1.

Sesiones de capacitación (curso corto, junio de 2020)

Sesiones de capacitación sobre lahares y su simulación
Horario: de 14h a 16h (hora de Guatemala y El Salvador), 15h a 17h (México)

<i>Sesión</i>	<i>Contenidos</i>	<i>Fechas*</i>	<i>Impartida por:</i>
Lahares: clasificación, dinámica y depósitos	Nomenclatura y clasificación Dinámica de los lahares Características principales de los depósitos de flujo de escombros e hiperconcentrados	17 de junio de 2020	Lizeth Caballero Dolors Ferrés
Monitoreo de lahares	El uso de imágenes satelitales (fuentes de datos, métodos de tratamiento y principales aplicaciones) Monitoreo de Lahares en el volcán de Colima	19 de junio de 2020	Lucía Capra Norma Dávila
Simulación de lahares	Tipos de códigos. Ventajas y limitaciones. Parámetros relevantes para la reproducción de la trayectoria de lahares. Importancia de la resolución de los DEM	24 de junio de 2020	Lizeth Caballero Dolors Ferrés
Flo2D	Instalación del programa* Módulos del programa Parámetros de entrada Aplicaciones en volcanes mexicanos	26 de junio de 2020	Lucía Capra Lizeth Caballero

Sesiones teóricas de 2-2.5 h, que incluyeron la exposición de contenidos y su discusión con base en las preguntas de los participantes. En cada sesión se propusieron actividades prácticas.

Las sesiones se desarrollaron en la plataforma Zoom. Se enviaron los enlaces para la conexión a los coordinadores del proyecto en El Salvador y Guatemala (Mario Reyes y Amílcar Roca), que los hicieron llegar al resto de participantes en cada país.

La instalación del programa FLO2D se realizó previo al inicio de la 4ª sesión (sesión de la licencia del CGEO). Fue necesario revisar los requerimientos del sistema para la instalación y valorar si en la situación actual (trabajo desde los domicilios) era viable el trabajo remoto.

Anexo 2.

Participantes

#	Nombre	Puesto	Institución
EL-SALVADOR			
1	Mario Reyes	Técnico en geología	MARN
2	Cecilia Polio	Técnico en monitoreo geológico	MARN
3	Rodolfo Castro	Técnico en monitoreo geológico	MARN
4	Valeria García	Geóloga	MARN
5	Francisco Montalvo	Vulcanólogo	MARN
6	Jacqueline Rivera	Especialista en pronóstico por impactos	MARN
7	Rodrigo Alfaro	Estudiante de Geofísica	UES/MARN
8	José Alexander Chávez	Especialista ambiental	OPAMSS
9	Ingrid Alfaro	Jefe Unidad Ambiental	OPAMSS
10	Alonso Alfaro	Especialista de la Subdirección de Geotecnia	MOP
11	Mónica Gutiérrez	Especialista de la Subdirección de Geotecnia	MOP
GUATEMALA			
12	Peter Darwin Argueta Ordoñez	Lic. Física. Área Vulcanología	INSIVUMEH
13	Gustavo A. Chigna Marroquín	Área de Vulcanología	INSIVUMEH
14	Edgar Roberto Mérida Boogher	Ingeniero Geólogo. Área de Vulcanología	INSIVUMEH
15	José Juan Ochoa Quezada	Geólogo. Área Vulcanología	INSIVUMEH
16	Amilcar Elías Roca Palma	Lic. Física. Área Vulcanología	INSIVUMEH
17	Fredy Daniel Monterroso Alonzo	Estudiante de Geología	Centro Universitario del Norte, CUNOR
18	María Moncada	Geóloga	ONG Vivamos Mejor
19	Daniel Secair	Máster en Geociencias	ONG Vivamos Mejor
20	Carla Ma Fernanda Chun Quinillo	Geóloga e Investigadora	Servicio Sismológico de Guatemala, Universidad Mariano Gálvez
21	Dulce Ma González Domínguez	Geóloga e investigadora	Servicio Sismológico de Guatemala, Universidad Mariano Gálvez
22	Amy Guicela Molina Estrada	Ingeniera Agrónoma	Instituto Privado de Cambio Climático (ICC)
23	Claudia Maricela Méndez de León	Ingeniera Agrónoma	Acción contra el Hambre (ACH)