MAPA DE PELIGROS VOLCÁNICOS POTENCIALES DEL VOLCÁN SUMACO

1RA. EDICIÓN - 2022

Como citar el mapa:
IG-EPN, IGM, IRD (2022), Mapa de Peligros Volcánicos Potenciales del Volcán Sumaco 1ra. Edición, Quito - Ecuador.
Prohibida la reproducción y reimpresión de este mapa sin permiso escrito de IG-EPN/IGM

Instituto Geofísico

ELABORACIÓN:

ESTUDIO VULCANOLÓGICO

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
Josué Salgado, Marco Córdova, Patricia Mothes, Pedro Espín
Silvia Vallejo, Jorge Aguilar, Elizabeth Gaunt, Edwin Telenchana

COLABORACIÓN TÉCNICA

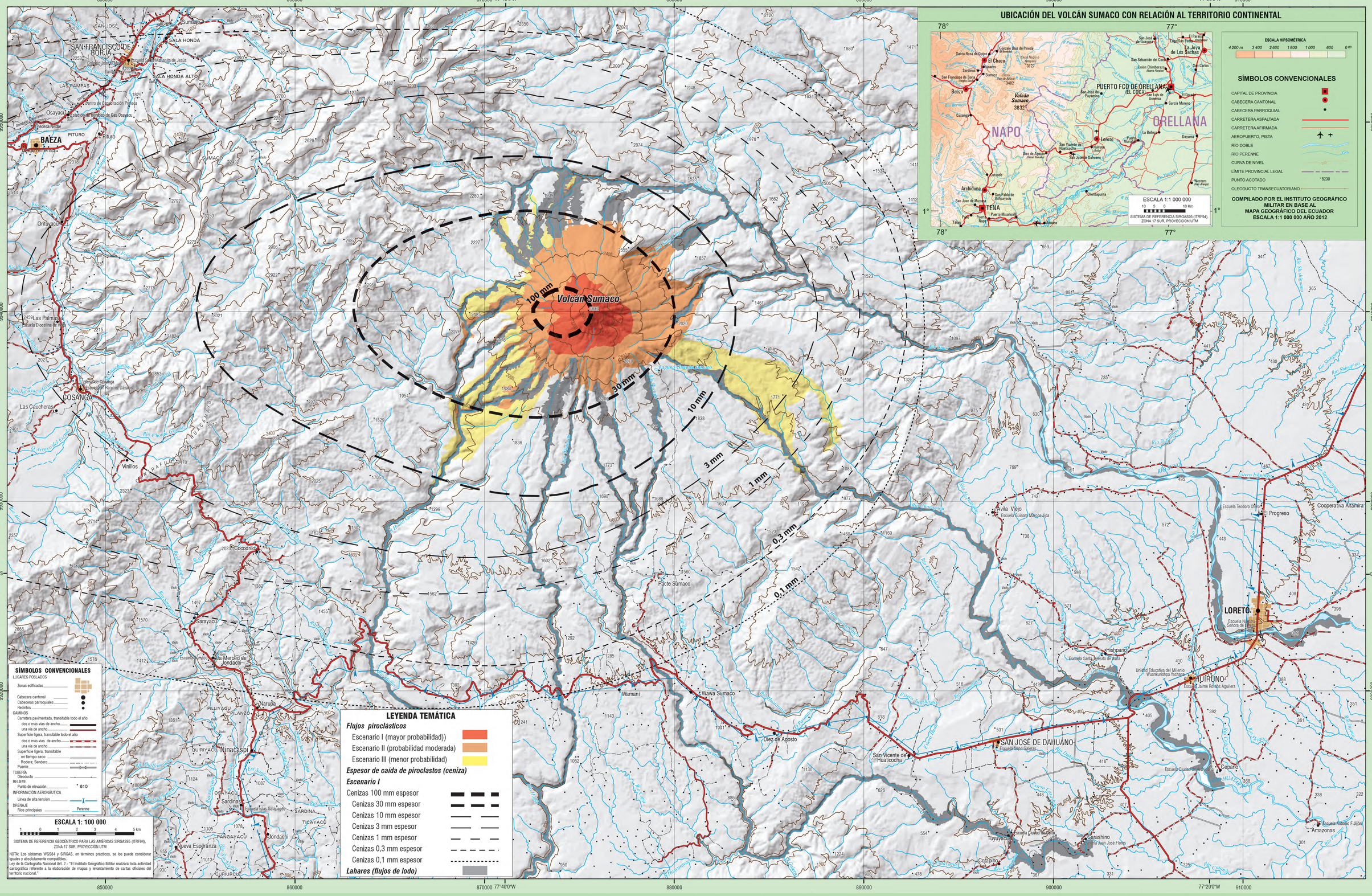
IRD Institut de Recherche pour le Développement FRANCE
Pablo Samaniego

BASE CARTOGRÁFICA, DISEÑO E IMPRESIÓN

Instituto Geográfico Militar
Rosa Cuesta, Danny Lincango, Xavier Vivas

CON EL AVAL DE:

Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias
ECU 911
NAPO
GADPO
Ministerio del Ambiente



I Introducción

Un mapa de peligros volcánicos constituye una herramienta integral que muestra las zonas de posible afectación por los fenómenos eruptivos asociados a la actividad de un volcán específico. Los fenómenos eruptivos que son generados comúnmente por los volcanes en el Ecuador continental son: caídas de ceniza y proyectiles balísticos, flujos piroclásticos (corrientes de densidad piroclásticas), flujos de lava, domos de lava, flujos de lodo o lahares, avalancha de escombros y otros tipos de deslizamientos, emisión de gases y actividad sísmica. La elaboración de un mapa de peligros requiere inicialmente un trabajo de campo a detalle para identificar y mapear la presencia de depósitos de los fenómenos eruptivos en el terreno. Por tal razón se estudian los vestigios de los depósitos *in situ* alrededor del volcán para conocer su alcance y magnitud. Adicionalmente, se estima la frecuencia de las erupciones por medio de información obtenida en registros históricos y/o dataciones radiométricas. Finalmente, se emplean programas computacionales especializados para modelar los fenómenos en un modelo digital de terreno (MDT), con el fin de conocer las zonas de influencia frente a una erupción de diferente magnitud.

II Escenarios eruptivos

Según el alcance y potencia de los depósitos encontrados en los alrededores de un volcán, se puede estimar que la actividad del mismo ha presentado, a través del tiempo, erupciones de diferentes magnitudes y VEI (Índice de Explosividad Volcánica). Para el volcán Sumaco se determinaron tres escenarios eruptivos ante una posible actividad eruptiva futura. Los datos utilizados en la elaboración de estos escenarios están basados en: 1) los tipos de erupciones que podrían originarse en el volcán (dinamismos eruptivos), 2) la magnitud de sus erupciones y distribución de los productos volcánicos de sus erupciones volcánicas pasadas, 3) de los estudios de campo y 4) de los resultados del modelamiento computacional que permitieron simular los fenómenos más representativos. Es necesario tomar en cuenta que la morfología actual del cráter es un factor que incide directamente en la distribución de los productos volcánicos como flujos piroclásticos y flujos de lava, en este sentido se debe considerar que la morfología actual es diferente a la que produjo erupciones pasadas por lo que la distribución de estos productos en el futuro no necesariamente corresponderá a los depósitos encontrados en el campo (e.g. depósitos de flujos piroclásticos en la zona sur del volcán).

Para la definición de los escenarios eruptivos más probables se escogieron tres erupciones representativas de los diferentes tipos de actividad eruptiva que este volcán ha experimentado: 1) escenario pequeño (Escenario I) con una ocurrencia cada 100 - 300 años, 2) escenario grande (Escenario II) con actividad cada 2,000 años y 3) escenario muy grande (Escenario III), con un único registro de ocurrencia, cada 10,000 años.

Escenarios eruptivos probables del volcán Sumaco

Escenario I: Puede generar caídas de piroclastos (ceniza, lapilli y bloques), las cuales estarían concentradas en los flancos del volcán, cuya dispersión dependerá de la dirección del viento. Registros de erupciones pasadas muestran depósitos de ceniza en la Laguna Guagua Sumaco (flanco sur-suroriental) con un espesor aproximado de 4 cm que habría afectado a la población más cercana al volcán. Se han identificado al menos 6 episodios en los últimos 400 años. Es factible que este escenario sea similar a las erupciones recientes de los volcanes Tungurahua (1999 - 2016) o El Reventador (2002 - 2022) (VEI 1-2).

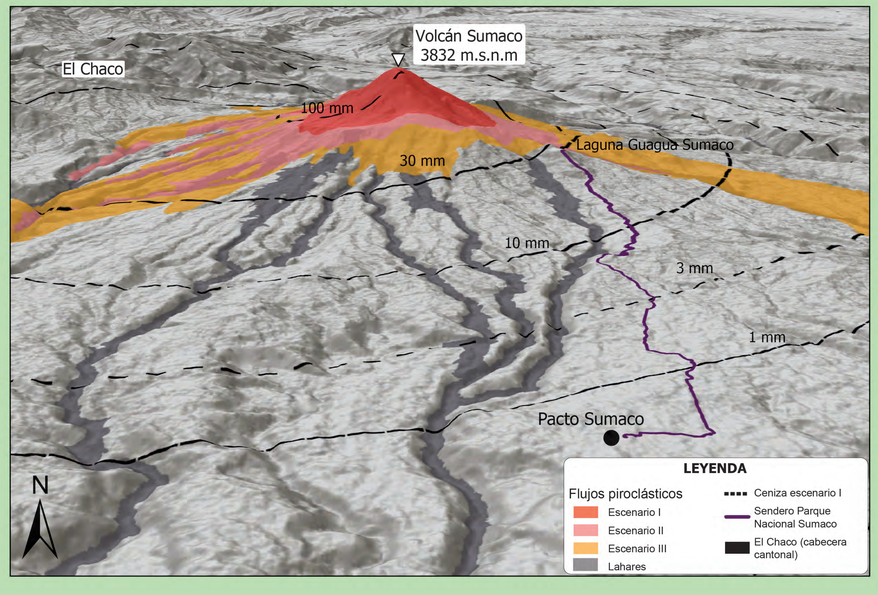
Escenario II: Considerado como una erupción grande, se estima que las caídas de piroclastos podrían alcanzar entre 10 y 15 km desde el cráter con dirección predominante al occidente. Erupciones antiguas habrían generado la acumulación de piroclastos de hasta 150 cm, las cuales afectaron fuertemente a las zonas de las actuales poblaciones de Pacto Sumaco, Guamaní y Guagua Sumaco. Los resultados de las simulaciones numéricas y depósitos en el campo muestran que los flujos piroclásticos cubrirían casi todo el edificio del volcán. Es factible relacionar este escenario con la erupción del volcán Tungurahua 2006 (VEI 3).

Escenario III: Corresponde a una erupción muy grande y muy poco frecuente en la cual la caída de piroclastos (pómez y líticos) tuvo un alcance muy amplio hacia el occidente. El depósito de caída cuenta con un espesor de hasta 40 cm en la zona de Vinillos, cerca de Cosanga (25 km de distancia del volcán). Se estima que en las zonas cercanas al volcán los espesores sobrepasaron los 150 cm de espesor. Sin embargo, no hay evidencias claras. Por su parte los depósitos de flujos piroclásticos han sido mapeados hasta 21 km aguas abajo del cráter sobre el río Guamaní, en la comunidad de Orituyacu, sobre el río Sapo (14 km desde el cráter), en el flanco suroriental en el río Suno, y en el río Chacayacu dejando depósitos transportados a hasta 4 km aguas abajo de la ciudad de Loreto. Respecto a los depósitos de lahares secundarios se encontró en los ríos Suno (sobre el puente de la ciudad de Loreto), Guamaní, Pucuno y Chacayacu, drenajes principales de los flancos sur y suroriental del Sumaco. En el río Hollín no ha sido posible encontrar o mapear vestigios de lahares, es posible que los depósitos no se hayan preservado por el fuerte caudal y la pendiente del terreno. Se calcula que el colapso de la columna eruptiva fue desde una altura de ~1,000 m sobre el nivel del cráter (Figura 1). Este escenario puede ser relacionado con los eventos eruptivos de 1877 AD del volcán Cotopaxi y 2002 del volcán El Reventador (i.e. VEI 4).

Escenario	*VEI	Tipo de actividad	Altura de la columna eruptiva (km s.n.c.)	Fenómenos Eruptivos	Espesor capa de ceniza(cm)	Probabilidad de ocurrencia
I Pequeño	1 - 2	Estromboliana Ejemplo: Tungurahua 1999-2016 El Reventador 2002-2022	2-4	Caídas de piroclastos (ceniza, lapilli y bloques)	3-4	Alta
II Grande	3	Vulcaniana violenta Sub-Pliniana Ejemplo: Tungurahua 2006	10-20	Caídas de piroclastos (ceniza, lapilli y bloques) Flujos piroclásticos Flujos de lava	100-150	Media
III Muy Grande	≥4	Pliniana Ejemplo: Cotopaxi 1877 AD El Reventador 2002	>20	Caídas de piroclastos (ceniza, lapilli y bloques) Flujos piroclásticos	>150	Baja

*VEI o Índice de Explosividad Volcánica (Acrónimo de Volcanic Explositiv y Index), es una escala que permite estimar cuán grande es la actividad explosiva de una erupción volcánica considerando varios parámetros vulcanológicos.
* km s.n.c., altura en kilómetros sobre el nivel de la cumbre.

VOLCÁN SUMACO: MAPA DE PELIGROS - VISTA 3D



MAPA DE PELIGROS VOLCÁNICOS POTENCIALES DEL VOLCÁN SUMACO

1RA. EDICIÓN - 2022

Como citar el mapa:
IG-EPN, IGM, IRD (2022), Mapa de Peligros Volcánicos Potenciales del Volcán Sumaco 1ra. Edición, Quito - Ecuador.
Prohibida la reproducción y reimpresión de este mapa sin permiso escrito de IG-EPN/IGM

Instituto Geofísico

ELABORACIÓN:
ESTUDIO VULCANOLÓGICO
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
Josué Salgado, Marco Córdova, Patricia Mothes, Pedro Espín, Silvia Vallejo, Jorge Aguilar, Elizabeth Gaunt, Edwin Telenchana

COLABORACIÓN TÉCNICA
Institut de Recherche pour le Développement FRANCE
Pablo Samaniego

BASE CARTOGRÁFICA, DISEÑO E IMPRESIÓN
Instituto Geográfico Militar
Rosa Cuesta, Danny Lincango, Xavier Vivas

CON EL AVAL DE:
Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias
ECU 911
GADPO
Ministerio del Ambiente

III Breve descripción del volcán Sumaco

El volcán Sumaco se encuentra a 105 km al oriente de Quito en la zona SubAndina, entre las provincias de Napo y Orellana. Las ciudades de Loreto, San Francisco de Borja, Archidona y Puerto Francisco de Orellana (El Coca) se destacan por su cercanía relativa al volcán (Mapa regional).

El volcán Sumaco (3.830 msnm) es un estratocono joven con 2,2 km de relieve sobre su base, y cuyo diámetro es aproximadamente 20 km (Figura 1). La forma de su cono es casi perfecta, resaltándose prominentemente sobre la selva SubAndina. El edificio actual es el más joven, dado que hay evidencia de dos colapsos de cono previos, los cuales dejaron cicatrices morfológicas en las partes altas del edificio actual (Figura 1). Estos colapsos dejaron potentes depósitos de brechas volcánicas en las faldas sur y norte, las mismas que están visibles en varios lugares de la carretera Narupa-Loreto (sobre los ríos Guamaní y Pucuno) o en la zona de San José de Payamino al norte. Erupciones en los últimos miles de años se han generado desde el cráter central que tiene un diámetro de 100 metros.

Varios ríos nacen en las partes altas del edificio del Sumaco, estos son el río Suno en el norte que luego fluye hacia al sureste y atraviesa la cabecera cantonal Loreto. Los ríos Chacayacu y Huataracu nacen en el flanco oriental e igual como el río Suno desembocan en el río Napo. Por su parte, los ríos Hollín, Guamaní y Pucuno drenan los flancos sur, suroccidental y finalmente desembocan en el río Napo después de fluir hacia al sur. La generación de lahares o flujos de lodo secundarios post-eruptivos han sido comunes a lo largo de estos ríos, producto de la re-movilización de materiales volcánicos por fuertes lluvias depositados en los cauces de los ríos.

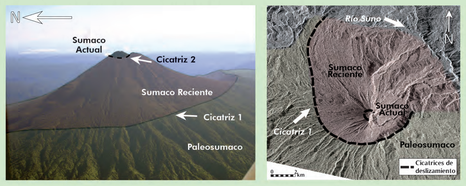


Figura 1: Vista aérea del flanco noroccidental del volcán Sumaco (izquierda), imagen satelital (derecha). En ambas imágenes se distinguen rasgos morfológicos de las 3 etapas de formación del edificio actual.

IV Historia eruptiva del volcán Sumaco

Los magmas asociados al volcán Sumaco son de composición variable, es decir, su contenido de sílice (SiO_2) varía entre 43 y 62 wt% SiO_2. Los magmas que brotan son categorizados como tefrifonolitas y tienen un alto contenido de azufre los cuales tienden a subir rápidamente desde una gran profundidad. Adicionalmente, se caracterizan por contener cristales de haüyna de color zafiro azul y de tamaño milimétrico. Este mineral no se forma en magmas de otros volcanes del Ecuador y su formación se asocia a: 1) la composición alcalina de los magmas del Sumaco ricos en potasio, sodio y con un fuerte enriquecimiento en elementos incompatibles, 2) altas temperaturas y 3) presiones bajas en el reservorio magmático (Garrison et al., 2018).

El bajo contenido de sílice hace que sus flujos de lava sean muy fluidos, encontrándose que la mayoría de sus lavas han fluido hasta 15 km de distancia desde el cráter. Por otro lado, las erupciones que producen flujos piroclásticos cuyos depósitos contienen pómez y su alcance es de por lo menos 14 o más km desde el cráter, tiene un contenido de SiO_2 >60 wt%. Esta variación composicional influye en el nivel de explosividad, el cual varía entre bajo (erupciones que producen lavas) a moderado (erupciones con generación de flujos piroclásticos). Las erupciones cuyas cenizas fueron encontradas en una perforación realizada en la Laguna Guagua Sumaco, (5,5 km desde la cumbre) (Figura 2) debieron ser imperceptibles por las poblaciones de los alrededores del volcán, debido a que no han sido reportadas ni mencionadas en los relatos o crónicas de la época Colonial. Sin embargo, Colony y Sinclair mencionan una leve caída de ceniza en el año de 1928.

Las capas de cenizas encontradas en la Laguna Guagua Sumaco, estudiadas por Salgado (2019) y Salgado et al (2021) son depósitos de pequeño espesor y son categorizados como Escenario I (Figura 2).

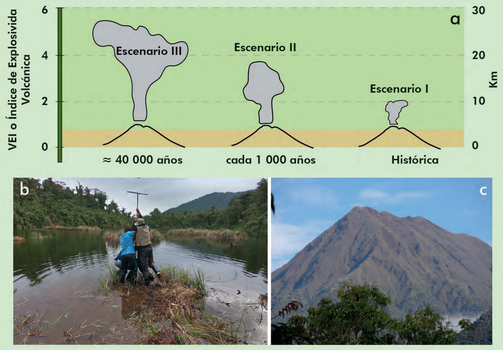


Figura 2: a) Esquema de la magnitud de las erupciones categorizadas (Escenarios I, II, III) en el volcán Sumaco en función del Índice de Explosividad Volcánico (VEI); b) perforación realizada en la Laguna Guagua Sumaco para analizar los sedimentos y capas de ceniza recuperados en el testigo de perforación; c) vista del flanco sureste del volcán desde las cercanías de la Laguna Guagua Sumaco.

Erupciones grandes o de Escenario II llegaron plenamente al poblado de Pacto Sumaco y sus alrededores, donde los espesores de depósitos de ceniza varían entre 20 y 50 cm o más (Figura. 3), y hasta el recinto 8 de Diciembre ubicado a 25 km al oriente del cráter, donde las capas de depósitos de ceniza tienen un espesor entre 5 y 10 cm.

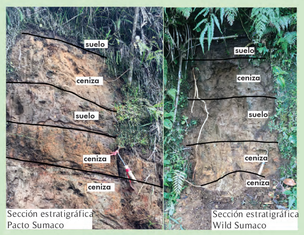


Figura 3: Fotos de los afloramientos y descripción de dos columnas estratigráficas elaboradas en las cercanías de la comunidad de Pacto Sumaco.

V Vestigios de las erupciones del volcán Sumaco

En base a investigaciones realizadas en los alrededores del volcán se ha encontrado amplia evidencia de depósitos de caídas de ceniza, lahares secundarios, flujos piroclásticos y flujos de lava relacionados con erupciones de este volcán. El depósito de caída asociada a las erupciones Escenario II (VEI 3), cuyos espesores sobrepasan 150 cm, es observable en las cercanías de Pacto Sumaco, en el flanco sur del volcán. Es posible distinguir fragmentos de cerámica sobre una o dos potentes capas de ceniza. Igualmente, se destaca la presencia de depósitos de flujos piroclásticos en las cercanías de la misma comunidad con espesores variables entre 1 a 3 metros (Figura 4).

Figura 4: Afloramiento de depósitos de flujos piroclásticos en el río Sapo (derecha), materia orgánica carbonizada (izquierda) .

Con respecto a los flujos de lava, estos han bajado por todos los cauces de los ríos del volcán y afloran en las partes altas del cono, de igual manera en zonas distales, como en el río Hollín, en la intersección con la carretera Narupa-Loreto (sector Cascada del río Hollín).

Los depósitos de lahares secundarios se encuentran en los lechos del río Suno, en el sector Karutambo y en las cercanías de Loreto. Igualmente, los ríos Huataracu y Chacayacu han acarreado dichos flujos, los cuales están depositados en las zonas de menor pendiente, como en las cercanías a la carretera lastrada que conduce al sur de la población de Ávila.

VI Fenómenos volcánicos potenciales más comunes asociados al volcán Sumaco

Un volcán puede generar diversos fenómenos volcánicos dependiendo del grado de actividad en el que se encuentre. Cada fenómeno tiene sus mecanismos de transporte y alcance diferentes, dependiendo del relieve y morfología del terreno, de las propiedades físicas y químicas del magma y de los volúmenes de magma involucrados. Las siguientes descripciones dan una idea de cuáles son estos fenómenos y cómo pueden impactar en los alrededores del volcán Sumaco. Para una mayor descripción e información de los fenómenos volcánicos favor dirigirse a la versión web de este mapa (https://www.igepn.edu.ec/amenaza-volcanica/mapa-amenaza-sumaco).

Gases volcánicos

Antes, durante y después de una erupción, los volcanes emiten cantidades importantes de gases, siendo en su mayoría vapor de agua, al cual se pueden sumar ciertas concentraciones de CO_2 (dióxido de carbono), SO_2 (dióxido de azufre) y HS (ácido sulfhídrico), entre otros. El contacto directo con altas concentraciones de gases volcánicos puede provocar irritación en los ojos y afectar el sistema respiratorio de personas y animales e incluso la destrucción de la vegetación. Ciertos gases volcánicos pueden reaccionar con el agua de la atmósfera y formar compuestos ácidos que pueden llegar a la formación de lluvias ácidas altamente corrosivas (Figura 5).

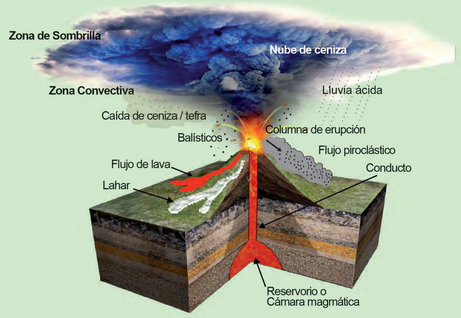


Figura 5. Esquema resumen de la generación de los fenómenos volcánicos más comunes asociados al volcán Sumaco.

Caídas de piroclastos (ceniza, lapilli y bloques)

Durante las erupciones volcánicas explosivas los gases y materiales piroclásticos (tefra, fragmentos de roca, piedra pómez, cascajo) son expulsados desde el cráter y forman parte de la columna eruptiva que puede alcanzar varios kilómetros de altura y sostenerse por minutos u horas. Los fragmentos más grandes siguen trayectorias balísticas y caen cerca del cráter. En cambio, las partículas más pequeñas suben a mayor altura y son llevadas por el viento. La caída de ceniza puede alcanzar lugares lejanos, cubriendo áreas muy extensas y dejando una capa de varios milímetros o centímetros de espesor. En nuestro país, la mayor parte del año, los vientos soplan predominantemente de oriente a occidente. Este fenómeno tiene impacto directo sobre la distribución de tefra y por ende en la agricultura, ganadería y reservorios de agua. También puede generar problemas respiratorios en las personas y animales, y en caso de acumularse en gruesos espesores puede provocar el colapso de techos de viviendas con mala calidad de construcción. Alrededor del volcán Sumaco se encuentran depósitos piroclásticos de caída, varios de ellos relacionados a la actividad volcánica histórica. Por ello, no se descarta la presencia de dicho fenómeno en caso de una nueva reactivación del volcán Sumaco (Figura 6).

Flujos y domos de lava

Los flujos de lava son derrames de roca fundida o parcialmente fundida de alta temperatura (750 - 1100 °C), originados en un cráter o en fracturas en los flancos del volcán y que han perdido la mayor parte de los gases disueltos del magma. Los flujos descienden por los flancos y las quebradas con velocidades variables dependiendo de su composición y que generalmente son controladas por la pendiente. Dada la composición química de los magmas recientes del volcán Sumaco, es muy probable que en una próxima erupción de este volcán se generen flujos de lava. Por otro lado, los domos son acumulaciones de lava viscosa, mayormente desgasificada, que pueden formarse en el cráter, en fisuras ubicadas en la cumbre o en los flancos superiores del volcán. En el cráter del volcán Sumaco se puede apreciar remanentes de pequeños domos de lava formados en la finalización de erupciones anteriores. Generalmente su morfología es circular en vista aérea. Los domos anteriores formados en este volcán seguramente fueron destruidos por explosiones en al cráter y generaron flujos piroclásticos que probablemente descendieron por el río Suno (Figura 6).

Flujos piroclásticos (Corrientes de densidad piroclásticas)

Son mezclas muy calientes (>500 °C) de gases, ceniza y fragmentos de roca que descienden por los flancos del volcán a velocidades entre 50-150 km/h. Se generan en erupciones explosivas, arrasando y quemando todo a su paso. Estos flujos constan de una parte inferior, muy rica en materiales sólidos que se desplaza por el fondo de los valles, y una parte superior mucho más diluida y pobre en materiales sólidos. En el volcán Sumaco se encuentran depósitos de flujos piroclásticos principalmente en los sectores sur-surorientales. Los asentamientos cercanos a los ríos Pucuno, Chacayacu, Huataracu y Suno, por ejemplo, Pacto Sumaco, Ávila, Ávila Viejo, Karutambo y 8 de Diciembre por el flanco norte-oriental, son los más cercanos al cráter y por lo tanto están potencialmente expuestos a este fenómeno. Los depósitos de estos flujos se encuentran hasta 15 km desde el cráter y en las orillas de los mencionados ríos (Figura 6).

Flujos de Lodo y Escombros (Lahares)

Los lahares primarios son mezclas de materiales volcánicos sueltos (rocas, piedra pómez, cascajo, ceniza) con agua proveniente de un río, fuertes lluvias, fusión de un casquete glacial o por la ruptura de un lago ubicado en el cráter. Los lahares pueden fluir ladera abajo por la fuerza de la gravedad siguiendo los drenajes naturales a velocidades de entre 10 - 70 km/h. La gran cantidad de material volcánico suelto dejado por erupciones pasadas ha sido fácilmente removible por lluvias intensas y/o sismos que han provocado la ocurrencia de lahares secundarios en el volcán Sumaco. Se ha encontrado evidencia de estos depósitos en los ríos Hollín, Guamaní, Pucuno, Chacayacu, Huataracu y Suno, el depósito encontrado en el río Suno sobre el puente de la ciudad de Loreto tiene una edad de 25,000 años AP, por lo que es posible que en futuras erupciones estos flujos desciendan por estos drenajes.

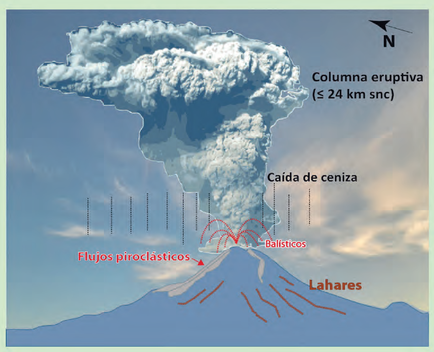


Figura 6: Representación hipotética del Escenario III (VEI ≥4), con la representación de los potenciales fenómenos asociados. Vista del flanco suroccidental del volcán Sumaco desde la cabecera cantonal de Archidona, una distancia de 45 km desde el cráter. (Foto: P. Mothes).

VII Modelamiento y Delimitación de los Fenómenos Volcánicos

Modelamiento de Flujos Piroclásticos (Corrientes de densidad piroclástica)

Para definir los límites de las zonas que podrían ser potencialmente afectadas por este tipo de flujos, se realizaron los controles de campo respectivos y se utilizaron dos metodologías empleadas en otros volcanes del mundo para elaborar mapas de peligros volcánicos. La primera metodología consiste en aplicar el concepto del "cono de energía" incluido en el programa LaharZ_py (Iverson et al., 1998) y la segunda en utilizar la herramienta VolcFlow que es un código para la simulación de flujos volcánicos utilizando ecuaciones de mecánica de medios fluidos (Kelfoun & Druitt, 2005).

El método del "cono de energía" considera que el alcance horizontal (L) de un flujo piroclástico es función de la diferencia de alturas (H) entre el punto de origen y el punto donde se detuvo el flujo. Así la relación H/L corresponde a una medida de la movilidad del flujo. La intersección entre el cono de energía y la topografía define la superficie que podría ser potencialmente afectada por flujos piroclásticos.

El modelo numérico VolcFlow toma en cuenta las propiedades reológicas del flujo (cohesión, densidad, viscosidad) y la topografía así como su volumen, el punto de origen y el tiempo en el cual ocurre dicho flujo. Para el caso del volcán Sumaco se utilizó un MDT de 12,5 m de resolución y se asumieron los parámetros reológicos usando parámetros previamente definidos en volcanes análogos como Tungurahua y El Reventador. Con esta información se procedió a realizar las simulaciones para cada uno de los escenarios previamente definidos. En el mapa principal se presentan las zonas potencialmente afectadas por flujos piroclásticos para los tres escenarios considerados.

Modelamiento de la Dispersión y Caída de Piroclastos (ceniza)

Para definir las zonas que podrían ser afectadas por posibles caídas de piroclastos del volcán Sumaco se utilizó el modelo numérico: "Ash3d" Modelo Atmosférico Euleriano de Transporte, Dispersión y Depositación de Tefra (Mastin et al., 2012). Las simulaciones están basadas principalmente en algunos parámetros propios de una erupción (altura de la columna eruptiva, volumen de magma, duración de la erupción) y en la distribución estadística de los perfiles de vientos. Posteriormente estos resultados se trataron con un algoritmo que permite definir áreas con porcentajes de probabilidad de afectación (Aguilar en prep.).

Los parámetros de entrada para las simulaciones fueron definidos usando los datos obtenidos mediante las descripciones geológicas realizadas en las campañas de campo, mientras que los perfiles de vientos fueron tomados del Sistema Global de Pronóstico de la NOAA. Tres escenarios eruptivos fueron considerados en base de la actividad histórica recurrente del volcán Sumaco, en los cuales se pudieron definir rangos de alturas de la columna eruptiva de aproximadamente 6, 17 y 24 km sobre el nivel del mar y de volúmenes de magma (Dense Rock Equivalent) entre 0,005 y 0,375 km^3. A continuación (Figuras 7, 8 y 9), se presenta gráficamente la dispersión y caída de ceniza de los tres escenarios eruptivos del volcán Sumaco considerando un porcentaje de probabilidad de afectación del 50%.

Caídas de ceniza - Escenario I

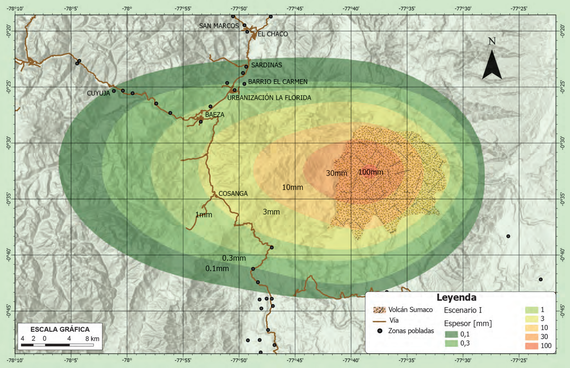


Figura 7: Mapa de peligro por caída de piroclastos en el Sumaco (Escenario I o pequeña, 50% de probabilidad).

Caídas de ceniza - Escenario II

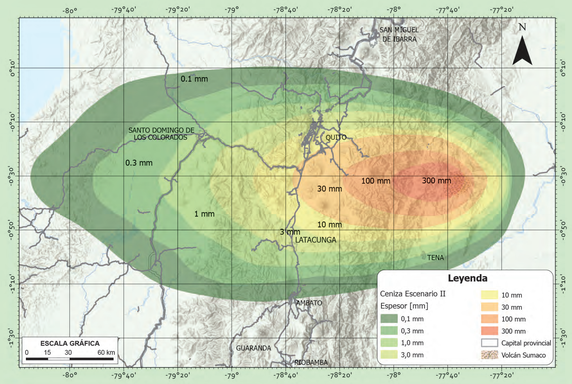


Figura 8: Mapa de peligro por caída de piroclastos en el Sumaco (Escenario II o intermedia, 50% de probabilidad).

Caídas de ceniza - Escenario III

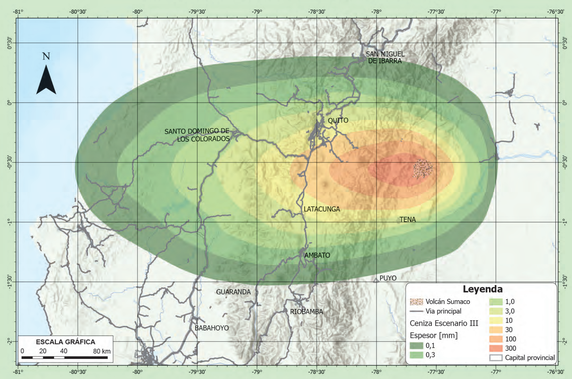


Figura 9: Mapa de peligro por caída de piroclastos en el Sumaco (Escenario III o grande, 50% de probabilidad).

Modelamiento de Lahares Secundarios

Se utilizó el programa LAHARZ el cual permite delimitar de manera rápida y objetiva las zonas de inundación por lahares que se originan en un volcán (Iverson et al., 1998; Schilling, 2014). El programa está basado en una correlación empírica entre el volumen de un evento lahárico y las áreas inundadas en secciones planimétrica y transversal.

LAHARZ se ejecuta dentro de un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) que emplea un MDT y los volúmenes de los lahares, previamente definidos por el usuario, para delimitar zonas potenciales de inundación, de manera automatizada y rápida. Los volúmenes que se emplearon son de 3 a 30 x10^6 m^3 que corresponden a los Escenarios I - III.

Modelamiento de Avalanchas de Escombros

La avalancha de escombros son grandes deslizamientos de rocas, arena y ceniza, que pueden ocurrir sobre un sector del volcán, producto de la inestabilidad de los flancos. Se generan ya sea por el ascenso de magma en el edificio volcánico, un sismo de gran magnitud cercano al edificio o por efecto de la gravedad (De Vries y Davies, 2015). Son muy rápidas, móviles y arrasan con todo lo que se encuentre a su paso, cuyos depósitos pueden cubrir áreas de enorme extensión. Para nuestro análisis, hemos utilizado una versión modificada de LaharZ_py (Schilling, 2014), llamada LaharZ/PFz (Widiwijayanti et al., 2009), que utiliza descripciones estadísticas de áreas inundadas por eventos pasados de flujos masivos para pronosticar áreas que probablemente serán inundadas por eventos futuros hipotéticos (Iverson et al., 1998; Schilling, 2014). El Sumaco experimentó tres eventos de este tipo, los cuales dieron origen a su configuración actual. Se han descrito varios depósitos de avalancha (Guamaní y Pucuno al sur; Karutambo, Chacayacu, Las Peñas al suroriente, oriente), pero no ha sido posible determinar su volumen por inaccesibilidad en la zona y su cobertura vegetal, es así como, el parámetro de volumen (4-14 km^3) se determinó a partir de los escenarios usados para el modelamiento de este fenómeno en el volcán Sangay definidos en Valverde et al., (2021). La línea de color verde entrecortada representa la posible extensión de una avalancha de escombros que afecte los flancos del volcán Sumaco. La ocurrencia de un evento de estas características se mide en un evento cada varias decenas de miles de años.

Avalanchas de Escombros

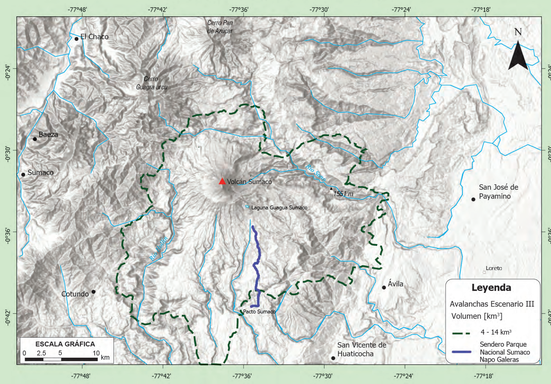


Figura 10: Mapa de peligro por avalanchas de escombros para el Escenario III.

Modelamiento de Flujos de Lava

Las lavas del Sumaco son porfiríticas masivas de composición básica con un elevado contenido en potasio. En general, son flujos de lava poco viscosos que han alcanzado grandes distancias. Los flujos de lava jóvenes ubicados en la cumbre presentan un alcance de hasta 3 km. Flujos de lava más viejos, ubicados principalmente en el sur, tienen una longitud promedio de 21 km. Para la simulación de los flujos de lava se empleó el modelo numérico VolcFlow.

Flujos de Lava

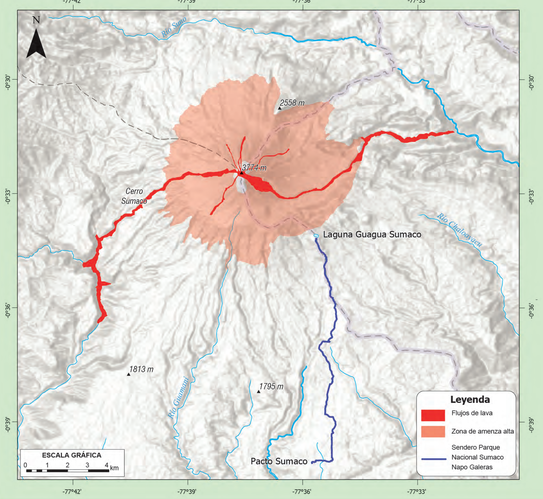


Figura 11: Mapa de peligro por flujos de lava, mostrando su alcance en la parte proximal y distal del volcán.

Modelamiento de Balísticos

Se utilizó el modelo numérico 3D Ballistics (Bertin D., 2017). El modelamiento sugiere que la velocidad y ángulo de lanzamiento, la densidad del bloque y el radio menor, constituyen los parámetros de primer orden que influyen en las trayectorias balísticas. Por otra parte, los campos de viento influyen en las trayectorias a través de la fuerza de arrastre. Esta aplicación se empleó sobre un MDT. Los parámetros requeridos se obtuvieron de los datos observados en campo (radio de los clastos entre 12,5 y 55 cm), mientras los datos de vientos son los predominantes (hacia el occidente) para la zona del Volcán Sumaco.

Balísticos

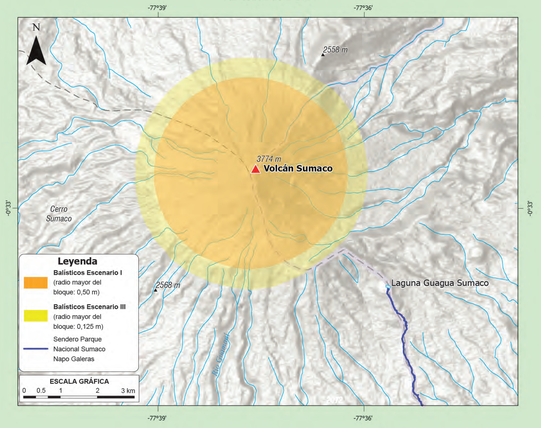


Figura 12: Mapa de peligro por alcance de balísticos, representando los Escenarios I y III.

REFERENCIAS:

Bertin, D. (2017). 3D ballistic transport of ellipsoidal volcanic projectiles considering horizontal wind field and variable shape dependent drag coefficients. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(2), 1126-1151.
Cardona, C., Pulgarín, B., Agudelo, A., Calvache, M., Ordoñez, M., and Manzo, O. (2015). Ajuste del método lahar-Z en el sector del volcán Nevado del Huila, con base en los flujos de escombros de 1994 y 2007. Bol. Geol. Colomb. 43, 63–74. doi: 10.32685/0120-1425/boletingeo43.2015.30
De Vries, B. V. W., & Davies, T. (2015). Landslides, debris avalanches, and volcanic gravitational deformation. In The encyclopedia of volcanoes (pp. 665-685). Academic Press.
Garrison, J. M., Sims, K. W., Yogodzinski, G. M., Escobar, R. D., Scott, S., Mothes, P., ... & Ramon, P. (2018). Shallow-level differentiation of phonolitic lavas from Sumaco Volcano, Ecuador. Contributions to Mineralogy and Petrology, 173(1), 1-19.
Iverson, R. M., Schilling, S. P., & Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. Geological Society of America Bulletin, 110(8), 972-984.
Mastin, L. G., M. Randall, J., H. Schwaiger and R. Denlinger (2013), User's Guide and Reference to Ash3d: A Three-Dimensional Model for Atmospheric Tephra Transport and Deposition, U.S. Geological Survey Open-File Report 2013-1122, 48 pp.
Kelfoun K. and T.H. Druitt, 2005, Numerical modelling of the emplacement of the 7500 BP Socompa rock avalanche, Chile. J. Geophys. Res., B12202, doi : 10.1029/2005JB003758, 2005.
Salgado Loza, J. A. (2019). Estudio de los depósitos volcánicos desde el Pleistoceno superior del volcán Sumaco, provincias de Napo y Orellana (Bachelor's thesis, Quito, 2019.).
Salgado, J. A., Mothes, P. A., & Córdova, M. D. (2021). New observations on the recent eruptive activity of Sumaco Volcano (Ecuador), based on geochronology, stratigraphy and petrography. Journal of South American Earth Sciences, 112, 103568.
Schilling S. (1998). LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. US Geological Survey Open-File Report 98-638; 79 pp.
Schilling, S. P. (2014). Laharz_py: GIS tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones. US Department of the Interior, Geological Survey.
Widiwijayanti, C., Voight, B., Hidayat, D., & Schilling, S. P. (2009). Objective rapid delineation of areas at risk from block-and-ash pyroclastic flows and surges. Bulletin of Volcanology, 71(6), 687-703.
Woodhouse M.J., Bates P.B., Hogg A.J., Phillips JC. & Rougier JC. (2016), Topographic uncertainty in models of geological hazards: a general statistical framework and application to a lahar hazard model using SRTM elevation data. Cities on Volcanoes 9. Puerto Varas Chile.
Woodhouse M.J., Johnson CG., Hogg A.J., Phillips JC., Espín Bedón P.A., Almeida S., Andrade D. (2016), LaharFlow: a web-based lahar hazard model. Cities on Volcanoes 9. Puerto Varas Chile.

NOTA PARA EL LECTOR:

Aquí se presenta la primera versión del Mapa de Peligros del Volcán Sumaco el cual está basado en observaciones detalladas en el campo, modelamiento computacional de los fenómenos eruptivos y dataciones de material orgánico que permiten conocer edades de erupciones pasadas. Este mapa debe considerarse como una síntesis del conocimiento disponible acerca del volcán Sumaco. Adicionalmente, se propone que pueda ser utilizado como una herramienta para la planificación territorial de las zonas potencialmente afectadas por una futura actividad de este volcán, las cuales albergan varias comunidades alrededor del volcán, importantes cuencas hidrográficas de los ríos Suno y Hollín, zonas de producción agrícola, complejos turísticos e infraestructura relacionada con la extracción de petróleo.

AGRADECIMIENTOS:

El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional expresa sus agradecimientos a los guías comunitarios del volcán Sumaco por su valioso acompañamiento en los trabajos de campo que se han realizado en el volcán. A la Escuela Politécnica Nacional, a través del Proyecto de Investigación PIGR-19-12 "Estudio, identificación, caracterización y evaluación de los productos eruptivos del volcán Sumaco", ejecutado entre los años 2020 y 2022.
Adicionalmente, se agradece a las siguientes instituciones y personas por proveer los códigos numéricos para la realización de las simulaciones de los fenómenos volcánicos considerados para este volcán:
• Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne-CNRS-IRD (Clermont-Ferrand, Francia).
• Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).
• Universidad de Bristol, School of Mathematics, School of Earth Sciences (The United Kingdom).