LAS POTENCIALES ZONAS DE INUNDACIÓN POR LAHARES EN EL VOLCÁN COTOPAXI

Jorge Ordóñez [1],

Pablo Samaniego [1, 2]

Patricia Mothes [1]

Steve Schilling [3]

[1] Instituto Geofísico - EPN, Ecuador

[2] Institut de Recherche pour le Développement, Francia

[3] United States Geological Survey, EE UU

2013

CONTENIDO

1. Introducción.....4
2. Generalidades del Volcán Cotopaxi.....5
3. Historia eruptiva del Volcán Cotopaxi.....7
4. Tamaño del glaciar y escenarios eruptivos.....7
5. Delimitación de las zonas que podrían ser afectadas por futuros lahares del Volcán Cotopaxi.....9
6. Conclusiones.....15
7. Referencias Bibliográficas.....16
8. Glosario.....17
9. Anexo.....19

Fotografías

Portada: Vista aérea del cráter del volcán Cotopaxi desde el Noroccidente. Silvia Vallejo IG-EPN

Superior: Panorámica aérea de los flancos occidental y sur del Cotopaxi. Al fondo se observan los extintos volcanes Rumiñahui, Pasochoa y Sincholahua. Patricio Ramón IG-EPN

Intermedia: Vista de la cumbre del Cotopaxi desde el Refugio José Rivas. Jorge Ordóñez IG-EPN

Inferior: Panorámica del Cotopaxi desde la Panamericana Sur, cerca de Lasso, al Occidente del volcán. Patricio Ramón IG-EPN

Diseño Gráfico:
Laura Bustamante T.
laurabustamantet@gmail.com

Agradecimientos

Los autores de esta publicación quieren expresar su sincero agradecimiento a:

La “Direction de l’information et de la culture scientifiques pour le Sud” (DIC), del IRD (Institut de Recherche pour le Développement), por el apoyo financiero que hizo posible la publicación de este trabajo.

El BID, por financiar la elaboración de un nuevo modelo digital de elevación (DEM) de alta resolución para el volcán Cotopaxi, dentro del proyecto “Sistemas de Alerta Temprana y Gestión del Riesgo Natural”, que fue ejecutado por el IG-EPN.

La Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (ex Defensa Civil), por su ardua labor para garantizar la protección de la sociedad de los efectos negativos provocados por desastres de origen natural o antrópico.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), por permitir que Steve Schilling, funcionario del Observatorio Volcanológico Cascades (CVO), viaje a Ecuador e instruya al primer autor de esta publicación en el modelamiento de flujos laháricos con el software LAHARZ.

La Escuela Politécnica Nacional (EPN), por el apoyo permanente que brinda al Instituto Geofísico para que desempeñe sus labores satisfactoriamente.

El Instituto Geofísico (IG-EPN) por todo el esfuerzo que su personal realiza cada día, de manera responsable, para mantener funcionando todas las redes de monitoreo volcánico y sísmico en el país.

El Dr. Daniel Andrade, vulcanólogo del IG-EPN, por sus valiosos comentarios y sugerencias durante el desarrollo de esta publicación.

El Físico Jorge Aguilar, Jefe del Área de Informática del IG-EPN, quien brindó su apoyo técnico en el campo de los Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS) durante la ejecución de las modelizaciones.

Preámbulo

Los relatos de las erupciones históricas del Cotopaxi y las investigaciones acerca de su historia geológica han demostrado que se trata de uno de los volcanes más peligrosos en Ecuador, sobretodo por la constante amenaza relacionada a la generación de lahares que en el pasado afectaron enormemente a las poblaciones cercanas al volcán.

En las últimas décadas, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) ha realizado varias investigaciones, en colaboración con otras instituciones, enfocadas a determinar la magnitud, la distribución y las trayectorias de los lahares que ocurrieron en el volcán Cotopaxi durante épocas pasadas. La información obtenida de estas investigaciones ha sido presentada en publicaciones anteriores como es el caso de revistas especializadas, libros, folletos y mapas de peligros. Además, esta información ha servido para que la comunidad en general conozca un poco más acerca de las posibles consecuencias que podrían ocasionar futuros lahares en el caso de una reactivación de este volcán.

Durante el período 2006-2011, el IG-EPN fue co-ejecutor del proyecto “Sistema de Alertas Tempranas y Gestión del Riesgo Natural” junto con la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SNGR) y la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) con financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Uno de los objetivos cumplidos dentro de este proyecto consistió en realizar modelizaciones de lahares en el drenaje Sur del Cotopaxi, los cuales estarían relacionados a diferentes escenarios eruptivos. Por tal motivo se invitó al Dr. Steve Schilling, hidrólogo del USGS quien desarrolló el software LAHARZ, para que, de manera conjunta con funcionarios del IG e IRD, evalúen los posibles escenarios eruptivos del Cotopaxi y delimiten las zonas que podrían ser afectadas por inundaciones de lahares a lo largo de los principales sistemas fluviales al Sur del cono volcánico. Dentro del mismo proyecto con el BID se pudo financiar la elaboración de un modelo digital de elevación (MDE) de alta resolución del volcán Cotopaxi y sus drenajes, el cual fue utilizado para ejecutar las simulaciones de los flujos con el programa LAHARZ.

INTRODUCCIÓN

El Cotopaxi forma parte del Arco Volcánico Ecuatoriano y es considerado uno de los volcanes más peligrosos del mundo debido a la frecuencia de sus erupciones, su estilo eruptivo, su relieve y su cobertura glaciar. Actualmente más de 300.000 personas viven cerca del volcán o cerca de los drenajes importantes (ríos y quebradas) que nacen en sus flancos. Las erupciones históricas del Cotopaxi (1534 DC – Presente) y las erupciones de otros volcanes en el mundo (e.g. Santa Helena en 1980, USA; Nevado de Ruiz en 1985, Colombia; Pinatubo en 1991, Filipinas) han demostrado que grandes lahares pueden afectar a pueblos y ciudades que se encuentren a su paso con millones de toneladas de escombros volcánicos.

Los lahares son flujos densos que se movilizan ladera abajo por los drenajes de un volcán debido a la acción de la gravedad y consisten de una mezcla de agua (fase líquida) y de materiales volcánicos (fase sólida) como grandes rocas, arena, ceniza e incluso troncos de árboles u otros objetos de origen antrópico, que pueden ser arrastrados por el flujo. Los materiales volcánicos pueden provenir de una erupción en curso o de erupciones anteriores, mientras que el agua, para el caso del Cotopaxi, puede ser originada directamente de la fusión parcial del casquete glaciar durante la erupción o de lluvias intensas que ocurran sobre el volcán. La magnitud y el potencial destructivo de estos flujos dependen del volumen contenido en las dos fases, así como de los tamaños de las partículas sólidas que pueden variar entre arena fina hasta rocas de algunos metros de diámetro (ver fotos en la contra-portada). La probabilidad de ser afectado por los flujos laháricos es mayor mientras más cerca se esté, tanto de los cauces por donde transitan los lahares como del volcán.

Esta publicación tiene como objetivo dar a conocer al público los resultados obtenidos de las modelizaciones matemáticas de lahares que fueron efectuadas en el volcán Cotopaxi. Para este fin se utilizaron cuatro posibles escenarios eruptivos que fueron planteados en base del conocimiento geológico que se tiene del volcán. Adicionalmente, trabajos relacionados con la evaluación del tamaño del casquete glaciar del Cotopaxi también fueron valiosos para estimar posibles volúmenes laháricos en cada uno de estos escenarios. Las modelizaciones de lahares en el Cotopaxi fueron efectuadas mediante un modelo matemático (LAHARZ) que es ejecutado dentro de un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) sobre un modelo digital de elevación de alta resolución. Los resultados de este modelaje permitieron determinar cuáles son las zonas con mayores posibilidades de ser afectadas por inundaciones de lahares a lo largo de las trayectorias de los principales sistemas hídricos que nacen en el volcán Cotopaxi.

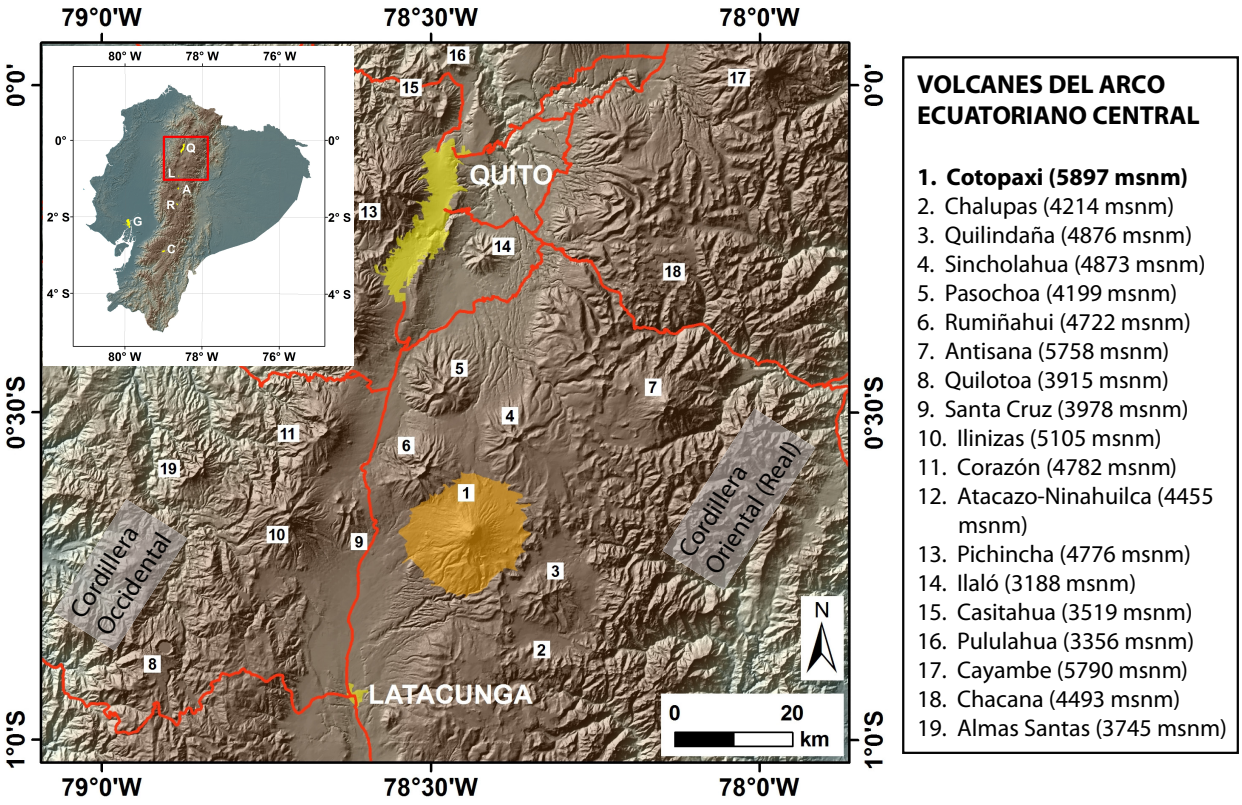


Figura 1. Modelo digital de elevación (Souris M., IRD) del Arco Volcánico ecuatoriano en la región centro-norte del país. El volcán Cotopaxi está delimitado en color anaranjado y está localizado en el límite occidental de la Cordillera Real. La línea roja representa la red vial principal. A la derecha se encuentra una lista de los volcanes que están incluidos en el mapa. Q: Quito, L: Latacunga, A: Ambato, R: Riobamba, G: Guayaquil, C: Cuenca

GENERALIDADES DEL VOLCÁN COTOPAXI

El Cotopaxi tiene una altitud de 5.897 metros sobre el nivel del mar (msnm) y es considerado uno de los volcanes activos más alto del mundo. Está ubicado a 0° 38' S y 78° 26' O, sobre la Cordillera Oriental (Real), a una distancia de 35 km al Noreste de Latacunga y de 45 km al Sureste de Quito. Su edificio forma un cono simétrico con pendientes de hasta 35° y un diámetro basal de ~20 km, mientras que el diámetro del cráter varía entre 800 m en sentido Norte-Sur y 650 m en sentido Este-Oeste. El Cotopaxi está rodeado por páramos que bordean los 3000 msnm y por otros volcanes como Sincholahua (4873 msnm), Quilindaña (4876 msnm) y Rumiñahui (4722 msnm) (Figura 1).

Drenaje Norte: depende de las vertientes que nacen en los glaciares 1 – 6 (Figura 2), que a su vez conforman los ríos El Salto y Pita. Aguas abajo se unen con los ríos Santa Clara y San Pedro y sus aguas cruzan los poblados de Sangolquí, el Valle de los Chillos, Cumbayá y otros barrios del Distrito Metropolitano de Quito (Figura 3).

Drenaje Oriental: sus aguas nacen en los glaciares 7 – 9 y conforman los ríos Tamboyacu y Tambo (Figuras 2 y 3). La unión de estos torrentes forma otro río, también llamado Tambo, el cual cruza la Cordillera Oriental (Real) hasta desembocar en el río Jatunyacu, que es el afluente principal del río Napo. La población más grande en esta región es Puerto Napo, aunque existen también otros asentamientos menores.

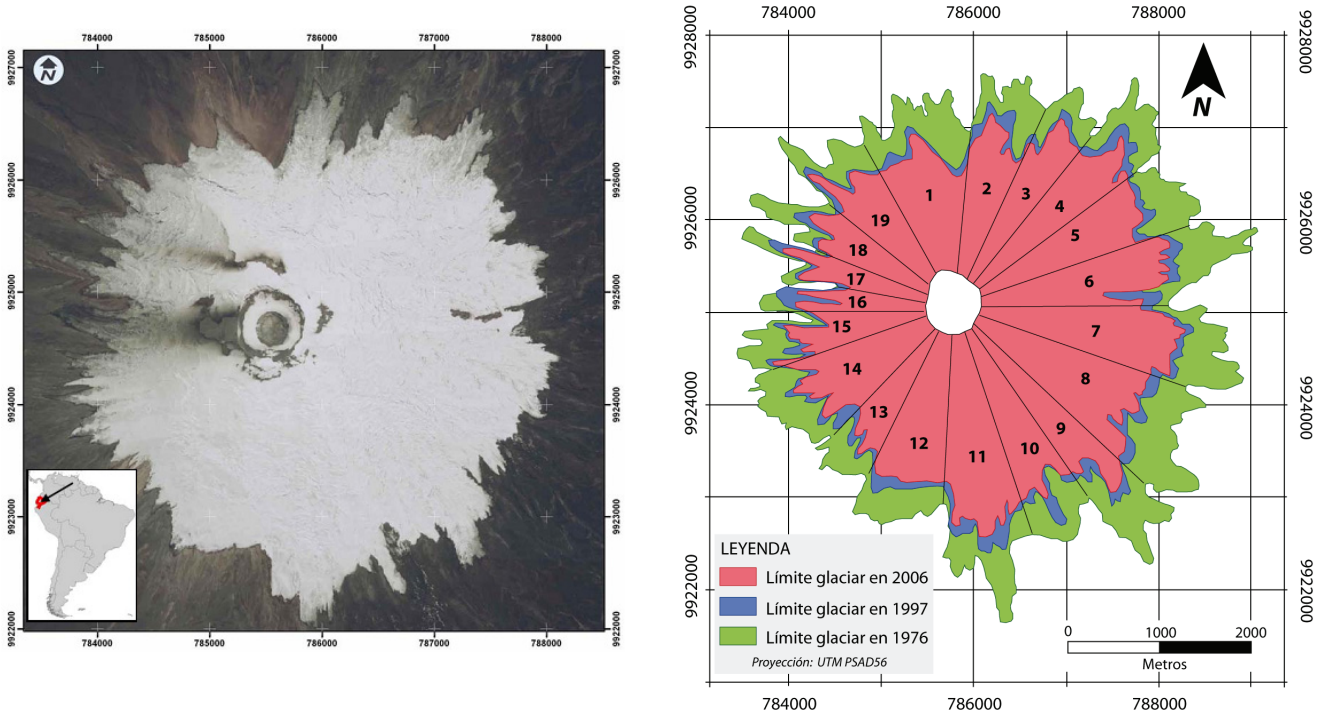


Figura 2. Izquierda: Ortofotografía del casquete glaciar del volcán Cotopaxi en 1997, tomada de Jordan et al. (2005). **Derecha:** Retroceso glaciar del volcán Cotopaxi, modificado de Cáceres (2010). En el mapa se observa la variación de los límites de los 19 glaciares durante el período 1976-2006. Note que en ambas figuras el glaciar se extiende hasta cotas más bajas en el flanco suroriental.

La red hidrográfica que nace en los flancos del Cotopaxi es compleja y está controlada principalmente por su topografía y su geología local. Las vertientes que nacen en la parte más alta del cono se unen para crear otras de mayores dimensiones, formando de esta manera tres sub-redes principales (Norte, Oriental y Sur) que dependen de los deshielos de las 19 lenguas glaciares que conforman el casquete (Hastenrath, 1981; Cáceres et al., 2004 y Jordan et al., 2005) (Figuras 2 y 3).

Drenaje Sur: los deshielos de los glaciares 10 – 19 proveen el agua a este drenaje (Figuras 2 y 3). Las quebradas menores conforman los ríos Cutuchi, Saquimala y Alaques. Numerosas poblaciones están asentadas en zonas cercanas a estos ríos; entre las más importantes se destacan Latacunga, Salcedo, Belisario Quevedo, Alaques, Tanicuchi, Lasso, Pastocalle, Barrancas, José Guango Bajo, Mulaló y San Agustín de Callo.

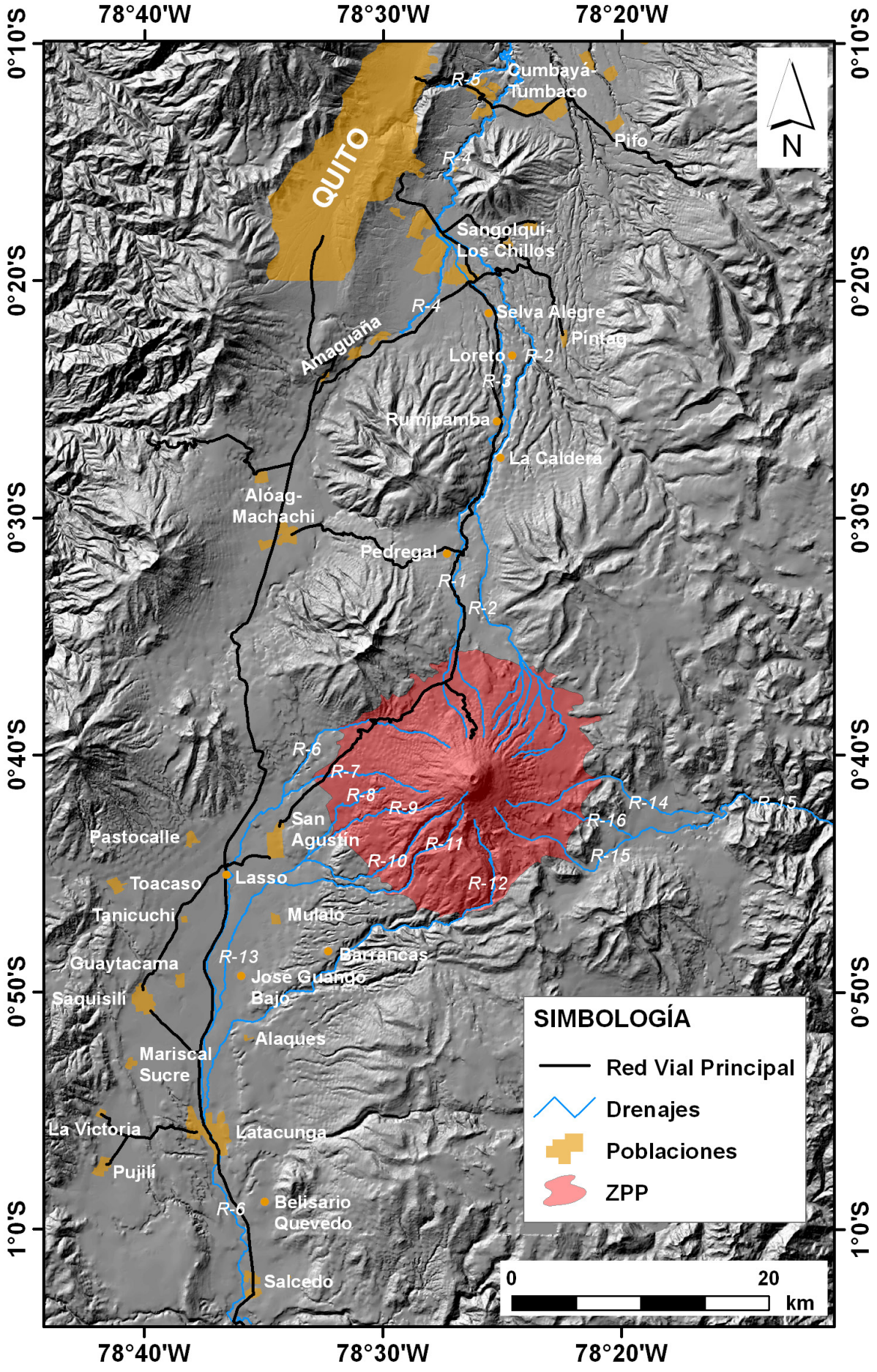


Figura 3: Modelo digital de elevación de la región de influencia del volcán Cotopaxi. En rojo se observa la zona de los peligros proximales (ZPP). Los drenajes principales por donde transitarían los potenciales lahares (excepto el río Machángara), son los siguientes: R-1: El Salto, R-2: Pita, R-3: Santa Clara, R-4: San Pedro, R-5: Machángara, R-6: Cutuchi, R-7: Pucahuaycu, R-8: Seca, R-9: San Lorenzo, R-10: San Diego, R-11: Burrohuaycu, R-12: Alaques, R-13: Saquimala, R-14: Tamboyacu, R-15: Ponzaguano, R-16: Tambo.

HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI

Breve Historia Geológica

El origen de este volcán se remonta aproximadamente a 500.000 años en el pasado. La actividad eruptiva en esta época fue muy explosiva y sus vestigios pueden ser observados en los flancos Sureños del volcán, los cuales consisten de depósitos de tefra y de flujos piroclásticos de ceniza y pómez (Hall and Mothes, 2007). Poco se conoce acerca de la historia geológica del Cotopaxi durante los siguientes 400.000 años de su desarrollo. Sin embargo, según Hall and Mothes (2007), el Cotopaxi reanudó su actividad hace 13.000 años AP y produjo seis erupciones explosivas importantes, la última de las cuales ocurrió hace 4500 años AP y estuvo acompañada de un deslizamiento de enormes proporciones que afectó a gran parte del flanco Noreste del volcán. Este evento generó una avalancha de escombros y un lahar de gran magnitud denominado "Lahar del Valle de Los Chillos" (Mothes et al., 1998). El depósito de este lahar es tan voluminoso que ha sido encontrado en regiones tan alejadas del volcán como en la provincia de Esmeraldas (Mothes et al., 1998; Hall and Mothes, 2007).

En los últimos 4.000 años, el volcán experimentó varios ciclos eruptivos que estuvieron caracterizados por erupciones recurrentes de tamaños moderados a grandes. Desde la llegada de los conquistadores españoles en 1.534 DC, el Cotopaxi experimentó al menos un ciclo eruptivo en cada siglo, incluidos varios episodios explosivos muy violentos con un VEI entre 3 y 4 (VEI: siglas en inglés para Índice de Explosividad Volcánica).
Los cinco períodos más importantes ocurrieron entre: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877-1880. En cada uno de estos períodos de actividad fueron frecuentes los flujos piroclásticos, las caídas de ceniza a nivel regional, pequeños flujos de lava y grandes lahares muy destructivos (Hall and Mothes, 2007).

La erupción del 26 de Junio de 1877

Los relatos históricos de Sodiro (1877) y Wolf (1878) permitieron conocer algunos detalles de la erupción que ocurrió el 26 de Junio de 1877 y el impacto que provocó en las poblaciones aledañas al volcán. A continuación se presenta un resumen de dichos relatos.

A inicios de 1877 se produjeron las primeras caídas de ceniza que se mantuvieron hasta las primeras semanas de Junio. En la mañana del día 26, la actividad incrementó súbitamente hasta alcanzar niveles muy altos en los cuales se produjeron extensos flujos piroclásticos ricos en escoria y una gran columna eruptiva de gases y de ceniza volcánica (erupción sub-pliniana).

Esta erupción provocó que una parte significativa del glaciar se derrita y forme potentes flujos de lodo y escombros que descendieron por todos los flancos del volcán. Estos flujos inundaron y destruyeron muchos poblados e infraestructura (puentes, fábricas, graneros, sistemas de riego, haciendas y casas) que habían sido reconstruidos en décadas anteriores, tanto al Norte como al Sur del volcán, y que también fueron afectados por erupciones pasadas del Cotopaxi. Cientos de personas murieron a causa de este fenómeno. Después de esta erupción violenta, el volcán se mantuvo activo durante algunos años más y produjo erupciones menores con caídas de ceniza y pequeños lahares. Los últimos vestigios de actividad (fumarolas activas y pequeñas emisiones de gases) ocurrieron en 1940 y 1976 (M. Hall, com. pers.).

TAMAÑO DEL GLACIAR Y ESCENARIOS ERUPTIVOS

El origen de los lahares asociados a una futura erupción del Cotopaxi, así como su tamaño, su alcance y su grado de afectación, dependen de dos factores importantes: 1) el tipo de erupción, que determinará su magnitud, su intensidad y el volumen de magma expulsado, y, 2) el volumen de agua producida durante la erupción, que está relacionada al tamaño actual del casquete glaciar.

Estimación del tamaño actual del glaciar del volcán Cotopaxi

En las últimas décadas, varios glaciólogos han tenido gran interés en estudiar el comportamiento y sobretodo el retroceso de los glaciares en Ecuador (Hastenrath, 1981; Jordan, 1983; Cáceres et al., 2004; Jordan et al., 2005; Cadier et al., 2007; Collet, 2010 y Cáceres, 2010). Jordan (1983) realizó la primera estimación cuantitativa del área de cada una de las 19 lenguas glaciares identificadas en el volcán Cotopaxi (Figura 2). En años recientes, Jordan et al. (2005) y Cáceres (2010) realizaron la restitución ortofotogramétrica de diferentes series de fotografías aéreas que fueron tomadas en 1997 y en 2006 (Figura 2). Con esta información, Samaniego et al. (2011) estimaron el porcentaje de disminución del área de cada glaciar en los períodos 1976-1997 y 1997-2006. Estos autores determinaron la tasa de reducción anual del área de cada lengua glaciar para el período 1997– 2006, y considerando que este valor se mantiene constante hasta el año 2011, proyectaron el área superficial de cada una de las 19 lenguas glaciares del Cotopaxi para ese año, 2011. Según estos resultados, Samaniego et al. (2011) sugieren que el área total del glaciar tendría entre 10 y 11 km^2. Por otro lado, Cáceres et al. (2004) y Cadier et al. (2007) reportaron rangos de variación de espesores de algunas lenguas glaciares, los mismos que oscilan entre 30 y 50 m.

La información obtenida sobre la superficie y el espesor del glaciar, permitió que Samaniego et al. (2011) estimen un rango de volúmenes que oscila entre 260 a 520 millones de m^3. Posteriormente, estos autores evaluaron los factores que pueden intervenir en la fusión del casquete glaciar durante una erupción y concluyeron que la interacción entre los diferentes fenómenos volcánicos, especialmente los flujos piroclásticos, con la superficie del glaciar puede contribuir de manera eficiente para incrementar su grado de fusión. Además, en base a comparaciones con las erupciones de los volcanes Nevado de Ruiz en Colombia (13 de Noviembre de 1985) y del volcán Mount Saint Helens en EEUU (18 de Mayo de 1980), que también tienen casquetes glaciares, Samaniego et al. (2011) sugirieron posibles rangos de volúmenes de agua que pueden originarse en diferentes escenarios eruptivos, con los cuales a su vez, estimaron potenciales volúmenes laháricos para cada uno de estos escenarios.

Potenciales escenarios eruptivos del volcán Cotopaxi

Según los registros geológicos de la actividad del volcán Cotopaxi, en los últimos milenios fueron comunes las erupciones de carácter andesítico, con eventos cuyo VEI osciló entre los niveles 3 y 4 (Hall and Mothes, 2007). Así por ejemplo, la erupción del 26 de junio de 1877 tuvo un VEI ~4. Por lo tanto, es muy probable que un escenario eruptivo similar se repita en el futuro.

Según el conocimiento de la historia eruptiva del Cotopaxi (Mothes, 1998; Mothes et al., 2004; Hall and Mothes, 2007), cuatro escenarios eruptivos potenciales fueron propuestos por Andrade et al. (2005) y Samaniego et al. (2011). Los parámetros que fueron considerados para definir estos escenarios son: 1) el dinamismo eruptivo, 2) la magnitud de la erupción, 3) el tamaño del glaciar y su grado de fusión, 4) el grado de interacción entre los productos volcánicos y el glaciar, y 5) analogías con volcanes andesíticos similares.

Cabe señalar que los volúmenes laháricos propuestos en cada uno de los siguientes escenarios representan un orden de magnitud y no un valor exacto. Adicionalmente, se debe señalar que, a medida que un escenario eruptivo incrementa en magnitud e intensidad, el glaciar sería afectado de manera más drástica, y por tanto, el volumen de agua producido sería liberado más rápidamente para mezclarse con los piroclastos, formando así lahares más grandes y destructivos.

Escenario 1: Evento pequeño (VEI 1-2).- Consiste en una actividad poco explosiva, casi permanente, caracterizada por fuentes de lava y explosiones del tipo estromboliano, similar al comportamiento del volcán Tungurahua desde su reactivación en 1999. La actividad estromboliana puede generar columnas eruptivas de algunos cientos de metros hasta de pocos kilómetros de altura, de manera que las caídas de ceniza estarían restringidas a las zonas más cercanas al volcán. Se tiene que recalcar que en este escenario no se generarían flujos piroclásticos. Las fuentes de lava arrojarían proyectiles balísticos sobre el glaciar, provocando avalanchas mixtas de hielo, nieve y roca que podrían transformarse en pequeños lahares. En este caso el volcán emitiría un volumen relativamente pequeño de tefra (< 0.01 km^3) (Figura 4). Adicionalmente, según la evaluación previa del tamaño del glaciar, en este escenario se podrían generar lahares con volúmenes entre 1 a 3 millones de m^3.

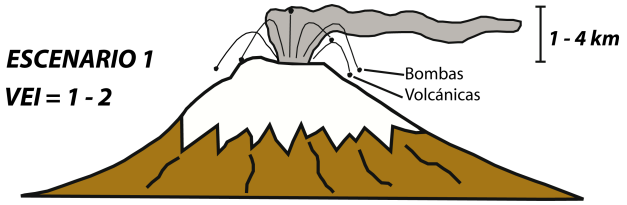


Figura 4: Esquema del Escenario 1 para el caso de una erupción del volcán Cotopaxi. Modificado de Andrade et al. (2005).

Escenario 2: Evento moderado (VEI 2-3).- Este escenario representa un estado más explosivo del volcán, con erupciones del tipo estromboliano a vulcaniano. Las emisiones de ceniza serían temporalmente más prolongadas, y algunos flujos piroclásticos pequeños a moderados podrían formarse junto con las explosiones, de manera similar a la actividad eruptiva del Tungurahua durante 2008 a 2012, o a la erupción del Reventador del año 1976 (INECEL, 1988). Adicionalmente, es probable que también se originen coladas de lava de poca extensión desde el vento principal o desde una fisura de algún flanco, tal como ocurrió en la erupción del Cotopaxi durante 1853-1854. El impacto de los fragmentos balísticos sobre el glaciar continuaría afectándolo pero en proporciones menores comparado con la afectación por los flujos piroclásticos y los flujos de lava. El volumen de tefra emitido en este escenario estaría dentro de un rango entre 0.01 a 0.1 km^3. (Figura 5), mientras que el volumen máximo de los lahares sería del orden de los 10 millones de m^3.

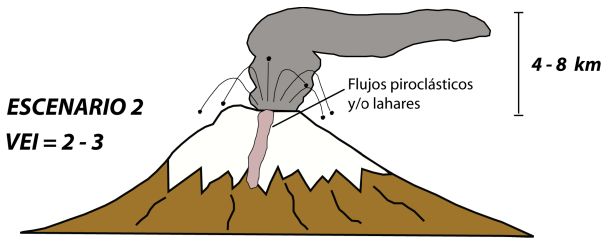


Figura 5: Esquema del Escenario 2 para el caso de una erupción del volcán Cotopaxi. Modificado de Andrade et al. (2005).

Escenario 3: Evento grande (VEI 3-4).- Se considera un evento similar a la erupción del 26 de Junio de 1877, que fue de carácter sub-pliniano. La historia geológica del volcán confirma que un evento parecido

tendría una alta probabilidad de ocurrencia en caso de una futura reactivación del Cotopaxi. Esta erupción daría lugar a importantes emisiones de ceniza que podrían afectar tanto a los alrededores del volcán como a la región distal, al Occidente del mismo. En este escenario descenderían flujos piroclásticos por todos los flancos del volcán y su origen estaría asociado al desbordamiento del magma desde el cráter (boiling over) o por el colapso de una columna eruptiva, como ocurrió en el volcán Tungurahua durante la erupción del 16 de Agosto del 2006. El volumen de material piroclástico expulsado en este escenario tendría valores entre 0.1 y 1.0 km^3 (Figura 6) y los lahares asociados a este escenario serían más voluminosos, con valores cercanos a los 30 millones de m^3.

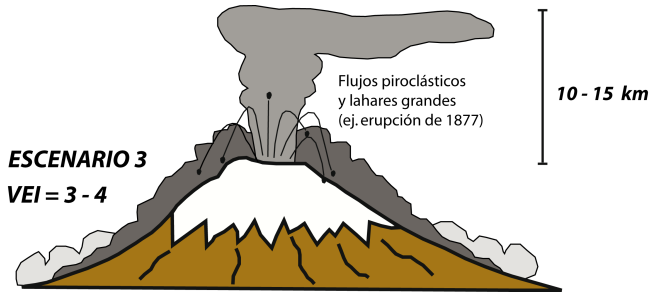


Figura 6: Esquema del Escenario 3 para el caso de una erupción del volcán Cotopaxi. Modificado de Andrade et al. (2005).

Escenario 4: Evento muy grande (VEI >4).- Corresponde a una actividad eruptiva pliniana, como aquellas fases pre-históricas de actividad del volcán. Las emisiones de ceniza resultantes tendrían una dispersión y un impacto a nivel regional, mientras que los flujos piroclásticos, originados por el colapso de la columna eruptiva, se desplazarían por todos los flancos del volcán y podrían tener un gran alcance (10-12 km). El volumen de los piroclastos emitidos en este caso sería mayor, con valores superiores a 1.0 km^3 (Figura 7). Por otro lado, para el caso de los lahares que se originarían en este escenario, sus volúmenes podrían alcanzar valores que se aproximan a los 60 millones de m^3.

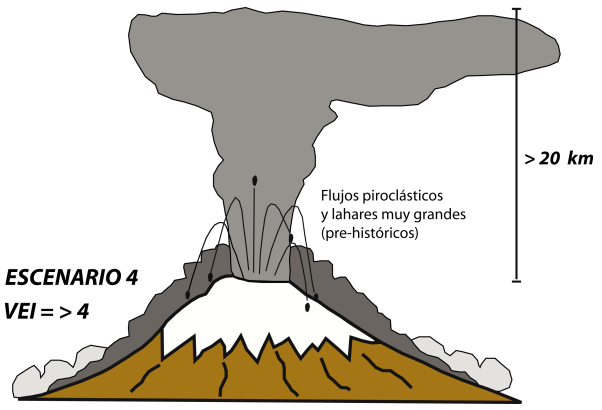


Figura 7: Esquema del Escenario 4 para el caso de una erupción del volcán Cotopaxi. Modificado de Andrade et al. (2005).

DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS QUE PODRÍAN SER AFECTADAS POR FUTUROS LAHARES DEL COTOPAXI

Uno de los objetivos de la vulcanología es evaluar y delimitar las zonas que pueden ser afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos, tanto en regiones amenazadas por volcanes activos o por volcanes que pueden reactivarse en el mediano o largo plazo. A estas superficies afectadas se las denominan zonas de peligros y pueden ser proximales o distales, dependiendo del alcance que tengan los diferentes fenómenos volcánicos respecto a su centro de emisión.

Zona de Peligros Proximales

La zona de los peligros proximales (ZPP) está representada en color rojo en la Figura 3 y en los mapas posteriores. La ZPP comprende la superficie que, dependiendo de la topografía local, circunda el cráter del Cotopaxi entre 8 y 11 km. Durante una crisis eruptiva esta región sería severamente afectada por diferentes fenómenos volcánicos devastadores como flujos piroclásticos, flujos de lava, bombas y bloques balísticos, abundante caída de ceniza y lahares, por lo que debería ser evitada y/o evacuada debido al elevado riesgo que representa.

Por otro lado, según el grado de explosividad del volcán, dentro de la ZPP pueden generarse grandes lahares que transitarían por los principales drenajes que nacen de la parte alta del cono, movilizándose fácilmente hacia regiones más bajas y alejadas de los límites de la ZPP. Estas regiones constituyen las zonas de peligros distales.

Zona de Peligros Distales

Para el caso de los lahares, la zona de los peligros distales (ZPD) está constituida por los drenajes (cauces y orillas) que nacen en las regiones más altas del volcán y que continúan pendiente abajo fuera de los límites de la ZPP. Como se mencionó anteriormente, las erupciones explosivas pueden generar lahares con volúmenes lo suficientemente grandes como para canalizarlos por estos drenajes, pudiendo viajar decenas de kilómetros aguas abajo. La topografía de sus valles y de sus orillas son factores importantes para evaluar el peligro que representan en zonas más bajas donde comúnmente existen asentamientos humanos. Por ejemplo, si las quebradas o los ríos son profundos y los lahares tienen volúmenes relativamente pequeños, los flujos no podrán desbordarse y seguirían su curso sin causar daños significativos; sin embargo, si los volúmenes laháricos son grandes y/o si la topografía exhibe drenajes poco profundos, es muy probable que los flujos laháricos se desborden e inunden superficies importantes alrededor de los cauces.

78°30'0"W
78°15'0"W
0°15'0"S
0°30'0"S
Simbología
Red Vial
Drenajes
Lahares históricos
Poblaciones
Zona de Peligros Proximales
A1
A2
A3
A5
Cumbayá-Tumbaco
Pifo
Sangolquí-Los Chillos
Pintag
Amaguaña
Aloág-Machachi
QUITO
Río Pita
Río Santa Clara
Río El Salto
Río San Pedro
Refugio José Rivas
N

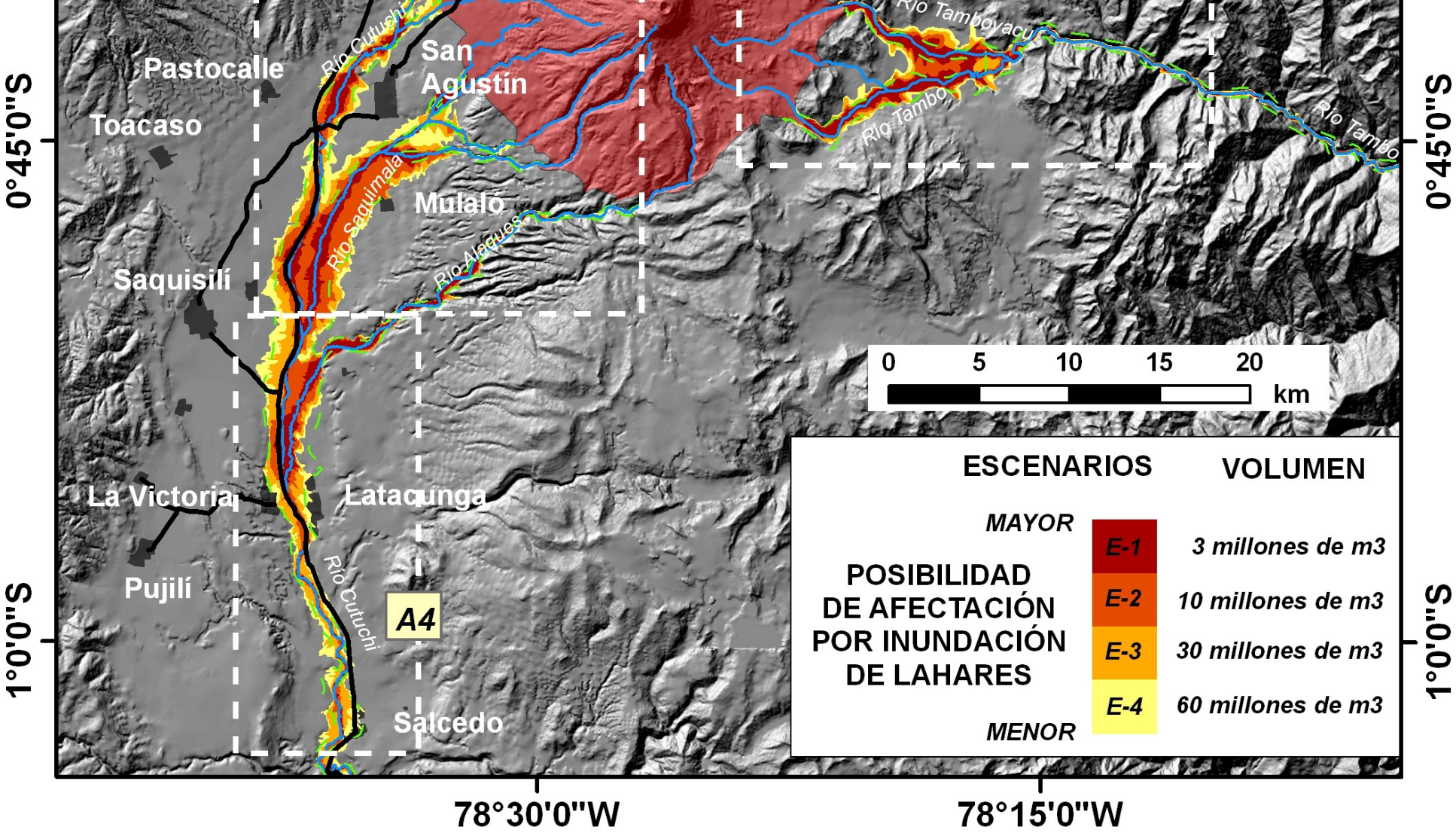


Figura 8. Zonas que serían potencialmente afectadas por inundaciones de lahares en caso de una erupción explosiva del volcán Cotopaxi. Estas zonas fueron delimitadas mediante la implementación del programa LAHARZ. La variación de colores representa diferentes escenarios eruptivos donde los lahares de menor volumen (E-1, E-2) podrían ocurrir con más frecuencia. Las zonas limitadas con líneas entrecortadas blancas (A1, A2, A3, A4 Y A5) son descritas con mejor detalle en el texto.

Dos elementos adicionales permiten evaluar el grado de peligro por inundación de lahares en zonas amenazadas por volcanes: 1) la cartografía geológica de los depósitos laháricos antiguos (históricos y pre-históricos), y 2) las modelizaciones computacionales de los flujos realizadas con programas especializados. Con estas herramientas se pueden elaborar los mapas de peligros volcánicos, los cuales constituyen una fuente de información valiosa para que las autoridades correspondientes planifiquen y organicen las diferentes actividades alrededor de las zonas de influencia del volcán y para que efectúen un adecuado manejo del riesgo volcánico.

Delimitación de las zonas que están amenazadas por inundaciones de lahares

Como se mencionó en la parte introductoria, el objetivo principal de esta publicación es presentar los resultados que fueron obtenidos de las modelizaciones matemáticas efectuadas para estimar la extensión de las zonas que podrían ser afectadas por inundaciones de lahares alrededor de los drenajes que nacen en el volcán Cotopaxi. El modelo matemático aplicado se denomina LAHARZ y fue desarrollado por hidrólogos y vulcanólogos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). LAHARZ calcula las superficies planimétricas (en el plano horizontal) y transversales (en el plano vertical) de inundación, a lo largo de un drenaje especificado por el usuario, mediante dos relaciones matemáticas que involucran un volumen lahárico hipotético que es proveído como dato de entrada en el programa. LAHARZ es ejecutado desde un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) sobre un modelo digital de elevación del terreno (MDE) para generar diferentes zonas de inundación, correspondientes a diferentes escenarios, donde se esperaría que los flujos de menor volumen ocurran con mayor frecuencia.

En base a la cartografía geológica de los lahares históricos, representada en los mapas de los peligros volcánicos del Cotopaxi (Hall et al., 2004a, b), se seleccionaron doce drenajes del cono volcánico para ejecutar el programa LAHARZ, utilizando como datos de entrada los volúmenes laháricos que fueron propuestos previamente en cada escenario eruptivo. Los resultados de las modelizaciones fueron comparados con la cartografía de los depósitos laháricos de Hall et al. (2004a, b), y como consecuencia se determinó que para el caso del Cotopaxi, LAHARZ es particularmente útil para delimitar la extensión lateral de las zonas de inundación, por tal motivo, en las modelizaciones presentadas en este trabajo, se utilizó únicamente la relación matemática que delimita las áreas transversales de inundación por lahares.

Los volúmenes laháricos correspondientes a los cuatro escenarios planteados son:

Escenario 1 (E-1): 3×10^6 m^3
Escenario 2 (E-2): 10×10^6 m^3
Escenario 3 (E-3): 30×10^6 m^3
Escenario 4 (E-4): 60×10^6 m^3

Resultados de las modelizaciones de lahares aplicando LAHARZ

En el mapa de la Figura 8 se presentan las zonas que podrían ser inundadas por lahares alrededor del Cotopaxi, según los resultados de las modelizaciones efectuadas con LAHARZ. No obstante, es muy importante destacar que ante cualquier erupción futura, es imposible pronosticar el alcance y la extensión que tendrían los lahares en el terreno debido a que son muchas las variables que pueden modificar tanto el rumbo como la energía de los flujos durante su trayectoria. Por tanto, los límites de las zonas de inundación obtenidos con LAHARZ no representan límites precisos y deben ser interpretados como guías para un adecuado manejo del riesgo asociado a lahares.

Para tener un mejor detalle visual de las modelizaciones a lo largo de los drenajes, la red hidrográfica del Cotopaxi (Figura 8) fue dividida en cinco zonas (A1, A2, A3, A4 y A5) que se describen a continuación.

Los lahares en el drenaje norte

Zona A1: al pie del flanco Norte del volcán, fuera de la ZPP, existe una extensa planicie de pendientes bajas (Llanura de Limpiopungo) donde los cauces son amplios y poco profundos (Figura 9). Estas características morfológicas son favorables para que los potenciales lahares puedan desbordarse fácilmente tanto en el río El Salto como en el río Pita. Para el caso del río El Salto, las simulaciones de LAHARZ forman amplias zonas de inundación desde la Hostería Tambopaxi hasta el campamento de la EMAAP. Por otro lado, en el río Pita los modelos de zonas de inundación se extienden desde Proaño hasta La Bocatoma. Aproximadamente a 1 km aguas abajo de este sitio (La Bocatoma) ambos ríos confluyen y mantienen el nombre de río Pita con un cauce más profundo, lo cual mantiene canalizados a los lahares simulados hasta el sector de Cashapamba (Figura 10).
Sin embargo, Mothes et al. (2004) mencionan que en el sector de La Caldera (4,5 km al Norte de la Bocatoma, Figura 9) algunos lahares pasados (con caudales pico >40.000 m^3/s) no fueron completamente canalizados debido a que su cauce forma una curva cerrada y por tanto una parte de los flujos se desbordó por el río Santa Clara. La cartografía geológica de sus depósitos sugiere que los lahares llegaron hasta el Valle de Los Chillos. Mothes et al. (2004) reportaron que entre el 20 % y 30 % del caudal pico del lahar del 26 de Junio de 1877 se desbordó por el río Santa Clara. Con este dato, se efectuaron las modelizaciones de lahares en este drenaje

considerando el 30 % de los volúmenes utilizados en los escenarios E-3 y E-4 (10 y 20 millones de m^3, respectivamente), asumiendo que en los escenarios "pequeños" (E-1 y E-2) no se produciría tal desborde. En el mapa de la Figura 9, también están representados los modelos laháricos en el río Santa Clara para los escenarios E-3 y E-4, donde se observa que LAHARZ genera una zona de inundación de poca extensión en el sector de Rumipamba. Adicionalmente, la carretera de acceso al flanco Norte del volcán, que viene desde Sangolquí, podría ser afectada por los lahares potenciales en cualquiera de los escenarios.

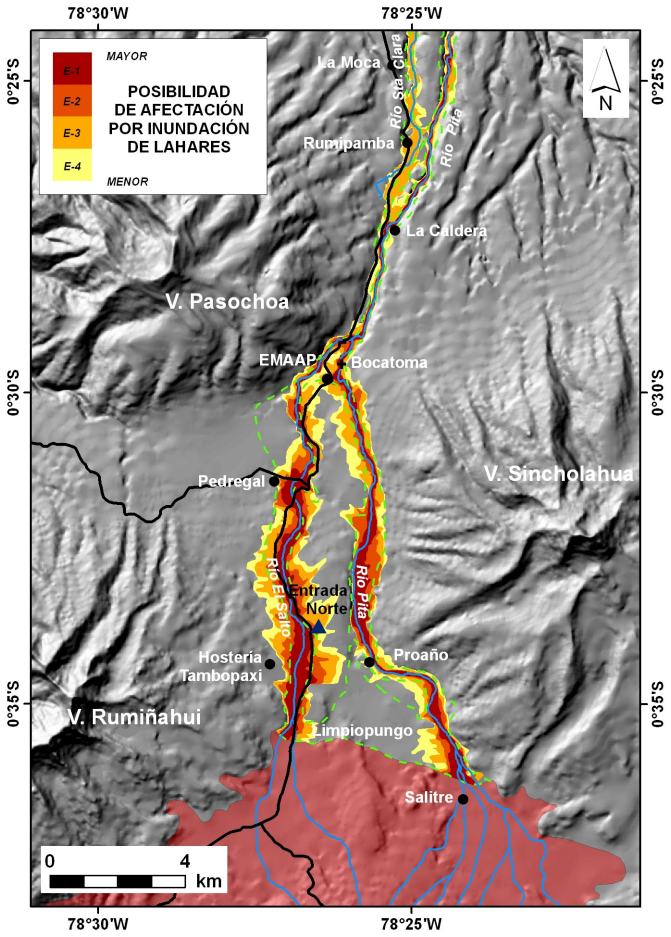


Figura 9. Zona A1. En el mapa se observan las zonas que serían potencialmente inundadas por lahares en los primeros kilómetros de los drenajes del flanco Norte del volcán Cotopaxi. La simbología es la misma que en la Figura 8.

Zona A2: La Figura 10 representa la continuación de los modelos de LAHARZ de las zonas de inundación en el drenaje Norte del Cotopaxi. A lo largo del río Santa Clara, los modelos laháricos, para los escenarios E-3 y E-4, permanecen dentro del cauce desde el sector La Moca (Figura 9) hasta la altura de Loreto (Figura 10), y más adelante LAHARZ forma otra zona de desborde importante en la orilla izquierda del cauce que inicia en el sector Selva Alegre, inundando parte de Sangolquí, San Rafael y Conocoto, hasta la unión de los ríos San Pedro y Pita. Por otro lado, las simulaciones de lahares en el drenaje del río Pita también forman amplias zonas de inundación en el Valle de los Chillos para los cuatro escenarios, lo cual podría afectar a numerosos barrios del sector, incluyendo a vías y carreteras de segundo orden (Figura 10). Las simulaciones de LAHARZ continúan hacia el Norte por el río San Pedro y, para los casos de los escenarios E-1 y E-2, los flujos transitarían sin desbordarse; sin embargo, si se consideran los escenarios E-3 y E-4, LAHARZ reprodujo zonas de inundación de poca extensión pero que podrían afectar a los barrios de Cumbayá que se encuentren cerca del cauce del río San Pedro.

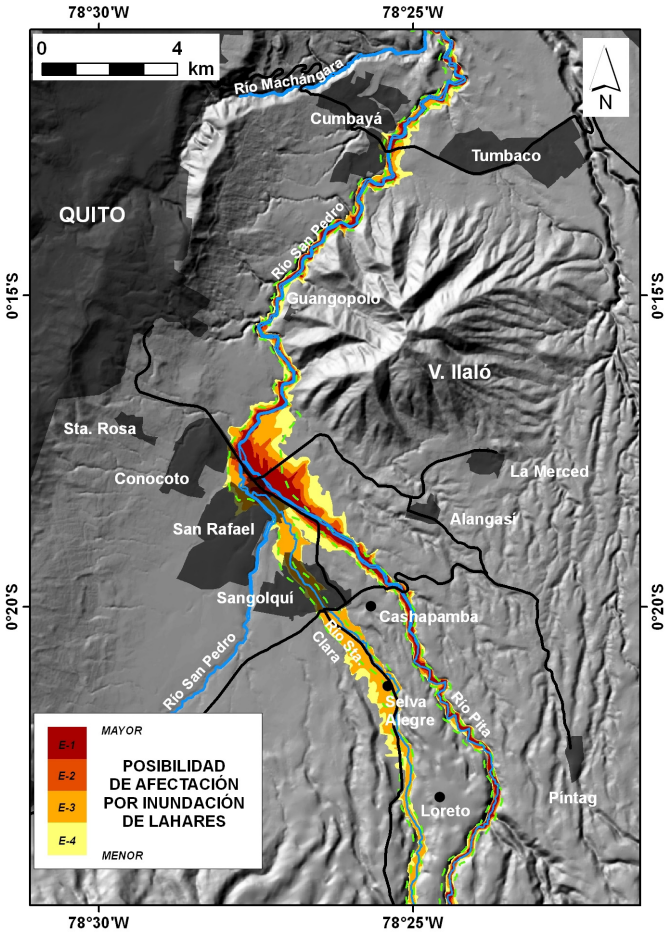


Figura 10. Zona A2. El mapa exhibe el segundo segmento del drenaje Norte que sería afectado por lahares. Note que los lahares que transiten por el río Santa Clara serían producidos por el desbordamiento parcial de los flujos, desde el río Pita, en el sector de La Caldera. La simbología es la misma que en la Figura 8.

Los lahares en el drenaje Sur

Zona A3: Las quebradas Cutuchi y Pucahuaycu presentan cauces profundos y angostos en los primeros kilómetros de trayecto fuera de la ZPP. En el tramo que cada drenaje recorre hasta su confluencia (~2 km al Norte de San Agustín de Callo), los lahares modelizados forman zonas de inundación relativamente amplias, en especial para los escenarios E-3 y E-4. A partir de la confluencia de los ríos Cutuchi y Pucahuaycu, los cauces se ensanchan y atraviesan una llanura muy vasta desde el Cerro de Callo hasta Latacunga (Figuras 8, 11 y 12).

La Figura 11 muestra los resultados de las simulaciones donde extensas zonas inundadas por lahares pueden ser generadas a lo largo del río Cutuchi. De manera similar que en los drenajes anteriores, para el caso de las quebradas Seca, San Lorenzo, San Diego y Burruhuaycu (cuya unión forma el río Saquimala) sus cauces son profundos y angostos en los primeros 3-5 km fuera de la ZPP, lo cual podría favorecer a que los flujos laháricos no se desborden. Sin embargo, cuando estos ríos llegan a la llanura comprendida entre San Agustín de Callo y Mulaló, el programa reproduce extensas zonas de inundación a lo largo del río Saquimala.

Otro resultado importante es que, para el escenario E-1, LAHARZ genera zonas de inundación a lo largo de los ríos Cutuchi y Saquimala, cuya extensión es relativamente pequeña en comparación con los otros escenarios. Por el contrario, para los escenarios E-2, E-3 y E-4, LAHARZ crea zonas de inundación más amplias, lo cual resulta de desbordes que podrían ocurrir por ambos drenajes hasta su confluencia (~3 km al Sur de Guaytacama, Figura 11). Para el caso del río Alaques, su cauce atraviesa profundos cañones que están conformados por depósitos volcánicos antiguos del Cotopaxi (Figura 11). Los lahares que transiten por este cañón, se mantendrían dentro del cauce sin generar desbordes hasta que llegue a la llanura de Latacunga (Figura 12).

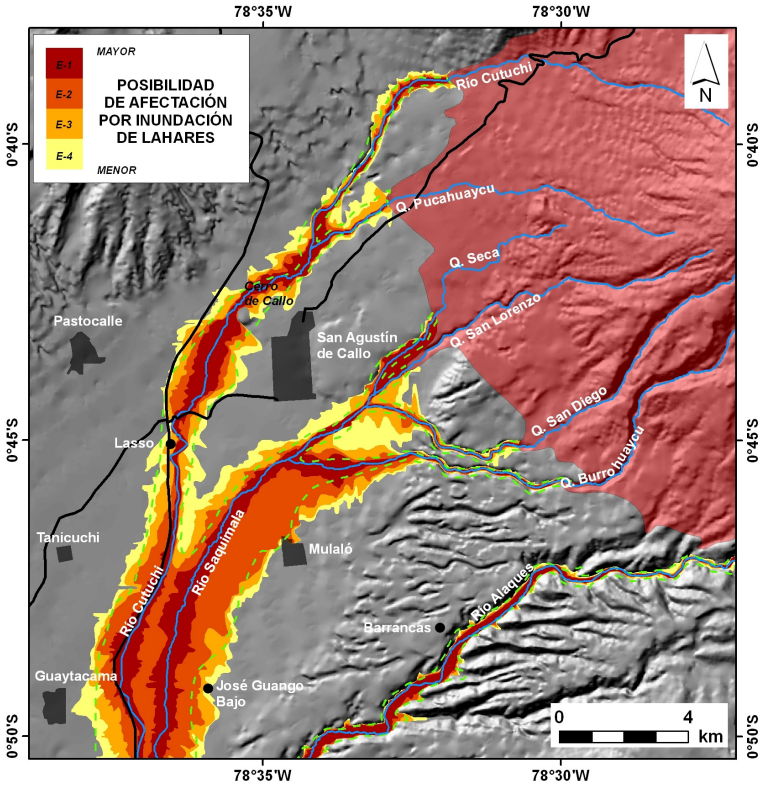


Figura 11. Zona A3. El mapa muestra las zonas de inundación por lahares en el drenaje Sur del volcán Cotopaxi. Los flujos transitarían por los ríos Cutuchi, Saquimala y Alaques, donde varias poblaciones están amenazadas. La simbología es la misma que en la Figura 8.

Zona A4: el mapa de la Figura 12 muestra la continuación de las simulaciones que fueron ejecutadas en el drenaje Sur del volcán Cotopaxi. Para los escenarios E-3 y E-4, LAHARZ genera extensas zonas de inundación desde la unión de los ríos Cutuchi y Saquimala hasta la ciudad de Latacunga, mientras que, para los escenarios E-1 y E-2, las zonas de inundación son más restringidas. Por otro lado, los lahares simulados en el río Alaques, en los cuatro escenarios, también contribuyen a formar las zonas de inundación en el río Cutuchi. La topografía que controla este drenaje cambia al Sur de Latacunga (Figura 12). Las extensas planicies que rodean a este río, al Norte de Latacunga, se transforman a un valle relativamente más angosto, donde el cauce del Cutuchi es más profundo y encañonado, aunque existen planicies que podrían ser inundables. Las simulaciones de LAHARZ para los escenarios E-3 y E-4, en el tramo entre Latacunga y Salcedo, muestran zonas de inundación que cubren casi por completo el valle del río Cutuchi, pero, para los dos escenarios menores (E-1 y E-2), los lahares prácticamente no se desbordarían, excepto en lugares donde las orillas sean topográficamente bajas, lo cual podría resultar en la formación de zonas de inundación más restringidas. Algunas poblaciones como Latacunga, Salcedo y muchos poblados menores podrían ser severamente afectados por las inundaciones de lahares, así como vías y carreteras de acceso hacia otros poblados de la región.

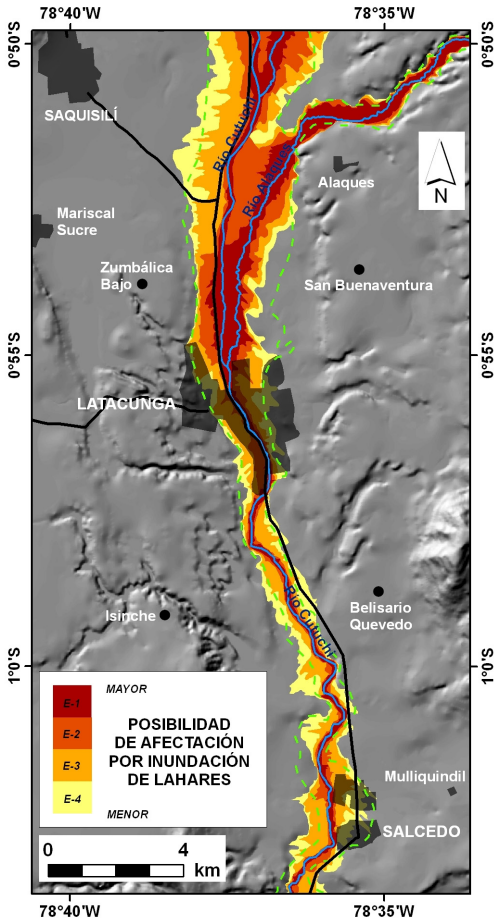


Figura 12. Zona A4. En el mapa se observa que en el tramo del río Cutuchi, entre Saquisilí y Salcedo, pueden formarse extensas zonas de inundación por lahares que afectarían a poblaciones como Latacunga y Salcedo, así como a la Vía Panamericana Sur. La simbología es la misma que en la Figura 8.

Los lahares en el drenaje oriental

Zona A5: Al pie oriental del Cotopaxi existe una gran llanura o planicie por donde los flujos laháricos transitarían, sin embargo ninguna población importante habita en esta región, aunque algunas haciendas locales podrían ser gravemente afectadas por lahares durante una erupción. En el mapa de la Figura 13 se observa que los ríos Tambo y Tamboyacu son los principales drenajes por donde descenderían los flujos laháricos. Para el escenario E-1, LAHARZ crea vastas zonas de inundación de lahares en estos drenajes y recorren aproximadamente 8 km desde que salen de la ZPP. En los tres escenarios restantes (E-2, E-3 y E-4) los modelos laháricos inundarían superficies más extensas, movilizándose por el río Tambo hacia la cuenca amazónica, y debido a que a partir de este sitio el drenaje atraviesa los cañones angostos y profundos de la Cordillera Real (río Verdeyacu), no existen llanuras de depositación, por lo cual los lahares podrían llegar hasta Puerto Napo, la población más grande de esta zona.

CONCLUSIONES

El grado de conocimiento geológico de los últimos 4000 años de actividad del volcán Cotopaxi, sobretodo de las erupciones históricas, permitió determinar que una erupción explosiva con un VEI>4 ocurrió aproximadamente cada siglo en los últimos 500 años. Con cada erupción de este tipo, se generaron flujos piroclásticos que derritieron parcialmente la nieve y el hielo que cubría al cono volcánico, formando de esta manera enormes lahares que fluyeron por los principales drenajes que nacen del volcán, destruyendo e inundando a las poblaciones ubicadas cerca de sus cauces con millones de toneladas de escombros volcánicos.

En base a algunos parámetros como: el dinamismo eruptivo, la magnitud de la erupción, el tamaño del glaciar y su grado de fusión, el grado de interacción entre los productos volcánicos y el glaciar, y las analogías con volcanes andesíticos similares, se propusieron cuatro posibles escenarios eruptivos en el caso de una reactivación del Cotopaxi. Además, varias investigaciones glaciológicas, que fueron efectuadas en las últimas décadas, permitieron estimar las dimensiones actuales del glaciar y los posibles volúmenes laháricos asociados a cada uno de los escenarios eruptivos.

La evaluación del peligro volcánico asociado a inundaciones por lahares en el volcán Cotopaxi estuvo basada, en años anteriores, en la delimitación cartográfica de los depósitos de flujos laháricos históricos. Actualmente existen programas computacionales que permiten simular o modelar varios parámetros físicos y reológicos de este tipo de flujos. Uno de ellos es LAHARZ, el cual delimita las zonas de inundación a lo largo de un drenaje en particular según diferentes volúmenes laháricos especificados por el usuario.
Con el software LAHARZ se modelizaron los flujos laháricos, a lo largo de los drenajes que nacen del volcán, con el objetivo de pronosticar cuales podrían ser las potenciales zonas de inundación en cada uno de los cuatro escenarios eruptivos. Los resultados muestran que, de manera general, la probabilidad de ser afectado por lahares incrementa cuando la distancia al volcán y/o al drenaje (río o quebrada) disminuye.

En los escenarios con erupciones relativamente pequeñas (E-1 y E-2), los lahares potenciales podrían tener volúmenes que oscilen entre 3 y 10 millones de m^3 y, según los resultados de LAHARZ, se formarían importantes zonas de inundación en las llanuras ubicadas al

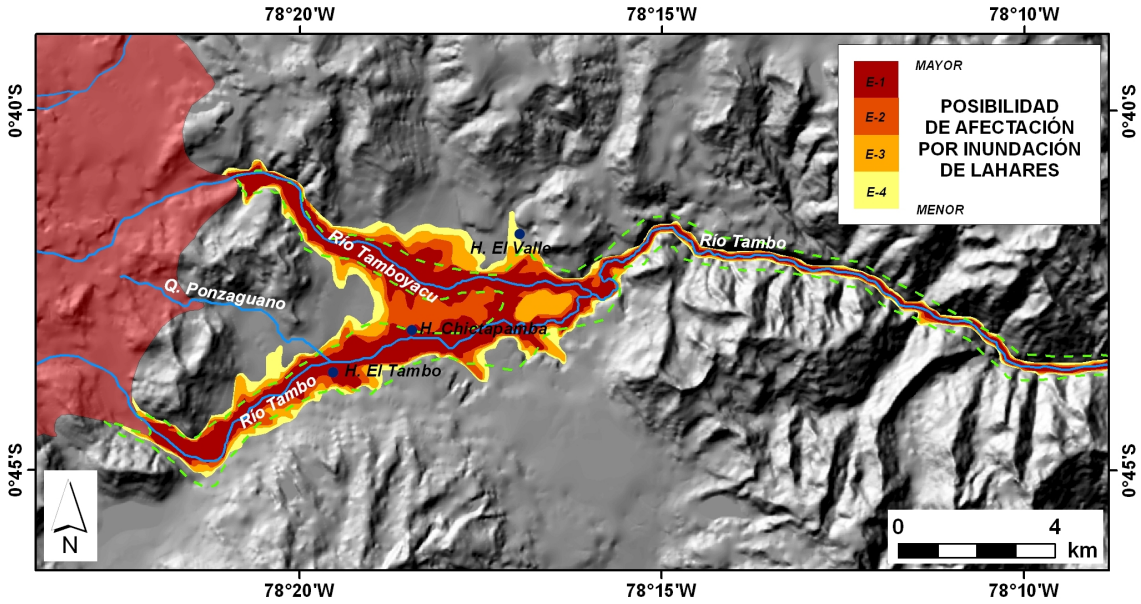


Figura 13. Zona A5. El mapa presenta las zonas de inundación por lahares que se formarían en el drenaje oriental del Cotopaxi. En esta región del volcán existe una extensa planicie donde los lahares podrían desbordarse fácilmente. Ningún asentamiento humano importante habita esta zona, con la excepción de algunas haciendas. La simbología es la misma que en la Figura 8.

pie del cono, en los flancos Norteño, Suroccidental y Oriental. Sin embargo, aguas abajo en los diferentes drenajes, las zonas de inundación son relativamente más pequeñas que en los otros escenarios. Las poblaciones que podrían ser afectadas por lahares en los escenarios E-1 y E-2 son aquellas que estén más cerca de los cauces de los ríos Pita y San Pedro en el Norte; de los ríos Cutuchi, Saquimala y Alaques en el Sur; y de los ríos Tambo, Verdeyacu, Jatunyacu en el drenaje oriental.

En los escenarios que presenten erupciones moderadas a grandes (E-3 y E-4), los lahares podrían tener volúmenes entre 30 y 100 millones de m^3. Acorde con LAHARZ, estos flujos podrían generar desbordes que inundarían superficies más extensas que en los escenarios E-1 y E-2, a lo largo de los mismos drenajes definidos en el párrafo anterior. Para estos casos, existe la posibilidad que más poblaciones e infraestructura (vías, caminos de segundo orden y puentes) puedan ser afectados por este tipo de fenómeno, así, en el drenaje Norte los lahares podrían inundar parcialmente a los valles de Los Chillos y de Cumbayá (barrios cercanos al río San Pedro); en el drenaje Sur serían afectadas poblaciones como Latacunga, Salcedo y muchos poblados menores; para el caso del drenaje Oriental los lahares atravesarían la Cordillera Real y al llegar a la Amazonía podrían afectar a Puerto Napo.

Fotos Contraportada:

1. Vista del flanco Noroccidental del volcán Cotopaxi. Note el profundo cañón de la quebrada Yanasacha, que forma parte de los tributarios del río El Salto. Foto: Patricia Mothes.

2. Restos de la fábrica "San Gabriel" ubicada en la margen derecha del río Cutuchi en el cantón Latacunga. La fábrica fue destruida y enterrada por el lahar del 26 de Junio de 1877.

3. Gran bloque lávico que fue arrastrado por lahares pasados y depositado cerca del pueblo de Mulaló, al Suroccidente del volcán.

4 - 5. Canteras localizadas a lo largo del cauce del río Cutuchi, al Sur de Salcedo, donde se observan diferentes depósitos de lahares históricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade D., Hall M., Mothes P., Troncoso L., Eissen J.P., Samaniego P., Egred J., Ramón P., Rivero D., Yepes H. (2005). Los Peligros Volcánicos asociados con el Cotopaxi. Serie: Los peligros volcánicos en el Ecuador, Nº 3. Corporación Editora Nacional. IG-EPN e IRD.

Beate, B., Hammersley, L., DePaolo, D., & Deino, A. (2006). La edad de la ignimbrita de Chalupas, Prov. de Cotopaxi, Ecuador, y su importancia como marcador estratigráfico. Resúmenes de las Sextas Jornadas en Ciencias de la Tierra, 68-71.

Bustillos, J., 2010. Volcán Cotopaxi: Geología y Actividad Histórica, Peligros Potenciales Asociados y Sistema de Monitoreo. Tríptico de Divulgación Científica. Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional.

Cáceres B., Ramírez J., Francou B., Eissen J.P., Taupin J.D., Jordan E., Ungerechts L., Maisincho L., Barba D., Cadier E., Bucher R., Peñafiel A., Samaniego P., Mothes P.; (2004). Determinación del volumen del casquete de hielo del volcán Cotopaxi. Informe INAMHI, IRD, IG-EPN, INGEOMINAS; 54 pp.

Cáceres B., 2010. Actualización del Inventario de Tres Casquetes Glaciares del Ecuador. Tesis de Máster 2 SGT PREFALC; 78 pp.

Cadier E., Maisincho L., Ulloa D., Mella R., Mothes P., Schaeffer M., Francou B., Rivero D., Jordan E., Ungerechts L., Barba D., David E., Samaniego P.; (2007). Segunda Campaña de Mediciones de los Glaciares del Volcán Cotopaxi. 19-27 de Enero de 2007. Informe Provisional. INAMHI, IRD-LGGE, IG-EPN, CECS; 38 pp.

Collet M. (2010). Suivi spatio-temporel des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi (Équateur): Analyse par télédétection dans un contexte de changement climatique. Mémoire de Master 2, Université de Rennes, 102 pp.

Hall M. L., Mothes P., Samaniego P., Yepes H., Andrade D., (2004a). Mapa Regional de Peligros Volcánicos Potenciales del Volcán Cotopaxi – Zona Sur. IG – EPN, IRD, Embajada de Alemania.

Hall M. L., Mothes P., Samaniego P., Yepes H., Andrade D., (2004b). Mapa Regional de Peligros Volcánicos Potenciales del Volcán Cotopaxi – Zona Norte. IG – EPN, IRD, Embajada de Alemania.

Hall, M., & Mothes, P. (2007). The rhyolitic–andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. Bulletin of Volcanology, 1-28.
Hastenrath, S. 1981. The glaciation of Ecuadorian Andes. A.A. Balkema, Rotterdam.

INECEL (1988). Estudio vulcanológico de El Reventador. Reporte interno, Quito, Ecuador; 117 pp.

Iverson R., Schilling S., Vallance J., (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. Geological Society of America Bulletin, v. 110, N°8; 972-984.

Jordan, E. (1983) Die Vergletscherung des Cotopaxi, Ecuador (The glaciation of the Cotopaxi, Ecuador, in German) Z. Gletsch. Glaziol. 9(1), 73–102.

Jordan, E., Ungerechts, L., Cáceres B., Francou B., Peñafiel A.. Francou B., 2005: Estimation by Photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997. Hydrological Sciences Journal, 50 (6), 949-961.

Mothes P., Hall M. , Janda R.J., 1998 - The enormous Chillos valley lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi volcano, Ecuador. Bulletin of Volcanology,59(4):233-244.

Mothes, P., Hall, M., Andrade, D. Samaniego, P., Pierson, T. Ruiz, G., Yepes, H., 2004. Character, Stratigraphy and Magnitude of Historical Lahars of Cotopaxi Volcano, Ecuador. Acta Vulcanologica, Vol. 16, 85-108.

Samaniego P., Ordóñez J., Schilling S. y Mothes P. (2011). Los posibles escenarios eruptivos del Cotopaxi y la delimitación de zonas inundadas por lahares: Aplicación de LAHARZ en el drenaje Sur. Informe Inédito BID. 34 pp.

Schilling S. (1998). LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. US Geological Survey Open-File Report 98-638; 79 pp.

Yepes H., Falorni G., Navas O. y Andrade D. (2006). Cotopaxi Volcano: Lahars on the southern drainage of Cotopaxi. Fourth Conference Cities on Volcanoes, Quito-Ecuador. IAVCEI

GLOSARIO

AC: Antes de Cristo, se emplea este término para referirse a fechas anteriores a la era cristiana.

Andesita (andesítico, a): roca de origen volcánico de color gris, que contiene entre 53 y 63 % de sílice. El color, la viscosidad, la composición química y el carácter eruptivo son intermedios entre un basalto y una dacita.

AP: Antes del Presente, abreviación que es utilizada en ciencias de la Tierra para referirse a una fecha pasada. Por motivos prácticos se considera que el presente corresponde al año 1950.

Arco volcánico: cadena de volcanes (insulares o continentales) ubicada cerca de los límites convergentes de las placas tectónicas, que son formados como consecuencia del magmatismo asociado a las zonas de subducción.

Avalancha de escombros: fenómeno de remoción en masa que resulta de un deslizamiento de gran magnitud en algún flanco de un volcán. La masa removida se moviliza principalmente por acción de la gravedad y/o por otros factores internos. Una avalancha de escombros puede viajar grandes distancias y sobrepasar barreras topográficas. Este tipo de deslizamientos se produce por la inestabilidad de los flancos de un edificio volcánico, lo cual puede ser originado por una intrusión magmática, un sismo de gran magnitud, el relieve del volcán con pendientes muy empinadas, el debilitamiento estructural del edificio inducido, por ejemplo, por alteraciones hidrotermales.

Bloques y bombas volcánicas: fragmentos de lava con tamaños superiores a los 64 mm que son expulsados de forma explosiva durante una erupción. Si al momento de la erupción estos fragmentos se encuentran en estado sólido se llaman bloques, pero si se encuentran en estado semi-sólido o plástico se denominan bombas.

Ceniza: fragmentos de rocas volcánicas menores a 2 mm que son expulsados a la atmósfera durante erupciones explosivas (emisiones constantes o eventos discretos).

Ceniza (caída): fenómeno controlado por la gravedad y por la dirección/velocidad de los vientos sobre el volcán, en el cual la ceniza volcánica cae a la superficie terrestre desde una columna eruptiva o pluma de ceniza.

Columna eruptiva: nube compuesta por piroclastos (cenizas y lapilli) y gases de origen volcánico que se forma sobre el vento o cráter de un volcán durante una erupción explosiva y que tiene un fuerte componente de movimiento vertical por convección (intercambio de calor con la atmósfera).

DC: Después de Cristo, término empleado para referirse a fechas correspondientes a la era cristiana.

Domo de lava: estructura topográfica en forma de colina con pendientes fuertes (≥ 25º) y relieves que pueden variar entre decenas y centenas de metros. Los domos de lava se forman por la acumulación de lava de alta viscosidad alrededor del vento volcánico por donde es extruida. Generalmente los domos están formados de lavas de composición andesítica, dacítica o riolítica.

Escoria: fragmentos fuertemente vesiculados de roca basáltica o andesítica (color gris obscuro o negro) que tienen una baja densidad y que son expulsados a la atmósfera durante erupciones explosivas.

Estratovolcán: edificio volcánico cuyos flancos presentan pendientes muy fuertes (25°-35°) y están compuestos por el apilamiento alternante de los depósitos de flujos de lava, flujos piroclásticos, capas de tefra, lahares, etc, que son generados a lo largo de su larga historia eruptiva (miles a cientos de miles de años).

Estromboliana (erupción): tipo de erupción volcánica caracterizada por un dinamismo eruptivo un poco más explosivo que una erupción hawaiiana. En este tipo de erupciones se producen grandes cantidades de ceniza y escoria, la cual se acumula alrededor del cráter para formar un cono. El término estromboliano proviene del volcán Stromboli de Italia.

Flujo de lava (colada de): derrame de un volumen de roca fundida (magma desgasificado) que se origina en el cráter de un volcán o en alguna fractura de la superficie terrestre, con un carácter no explosivo, y que se moviliza ladera abajo con velocidades relativamente bajas.

Flujos de lodo y escombros (lahares): Aluvión de origen y composición escencialmente volcánica. Consisten de una mezcla de agua y materiales volcánicos (ceniza y rocas) que son removilizados por acción de la gravedad y que se transportan por los drenajes de un volcán. El agua puede originarse por la fusión parcial de un glaciar, por lluvias muy intensas o por el desfogue violento de un lago cratérico.

Flujos piroclásticos (nubes ardientes): flujo de carácter granular caliente (300-800 °C) compuesto de gases, ceniza y fragmentos de rocas que descienden por los flancos de un volcán a grandes velocidades (75-150 km/h). Generalmente ocurren durante erupciones explosivas o por el colapso del frente de un flujo o un domo de lava.

Fuente de lava: emisión moderadamente explosiva de gases y materiales piroclásticos en estado fundido que pueden ascender varias decenas o centenas de metros sobre el cráter. La gran mayoría de los fragmentos producidos tienen trayectorias balísticas y caen dentro o en las cercanías del cráter donde ocurre la actividad.

Lapilli: fragmento de roca volcánica comprendido entre 2 y 64 mm de diámetro que es expulsado a la atmósfera durante erupciones explosivas.

Lava: término utilizado para referirse al magma que alcanza la superficie terrestre en forma líquida y que ha perdido la mayoría de sus gases. Roca fundida que es emitida desde el cráter de un volcán o desde una fisura cortical.

Magma: mezcla de tres fases que consiste de una par-

te de roca fundida (fase líquida) enriquecida en sílice, gases disueltos (fase gaseosa) y cristales de minerales (fase sólida). Los diferentes tipos de magmas se forman a grandes profundidades, en los límites entre la corteza terrestre y el manto superior. Cuando el magma ha perdido su fase gaseosa y ha alcanzado la superficie se denomina lava, y si el magma se enfría y cristaliza dentro de la corteza, forma las rocas ígneas intrusivas.

Mapa de peligros: mapa que es utilizado para representar, sobre una base topográfica, las zonas que pueden ser afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos.

Peligros volcánicos: fenómenos potencialmente dañinos que pueden ocurrir durante una erupción volcánica (p.e. flujos de lava, flujos piroclástios, caída de ceniza, lahares, avalanchas de escombros, etc.). En términos probabilísticos, los peligros volcánicos representan la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente peligroso.

Piroclastos (piroclástico): se refiere a todo fragmento sólido o casi sólido que es expulsado fuera de un volcán durante una erupción explosiva. El material piroclástico puede estar compuesto de vidrio volcánico (materiales sin estructura cristalina), cristales de minerales y fragmentos de rocas volcánicas (p.e. bombas, escoria, pómez, etc). Según su tamaño, los piroclastos pueden clasificarse en ceniza (< 2 mm), lapilli (2-64 mm) o bloques (> 64 mm).

Placas tectónicas: son segmentos de la litósfera terrestre que se comportan como bloques rígidos y se movilizan sobre la astenósfera, que tiene comportamiento dúctil, a razón de algunos centímetros por año. En los límites de las placas tectónicas ocurren fenómenos como sismicidad, volcanismo y orogénesis.

Pliniana (erupción): tipo de erupción volcánica caracterizada por una fuerte explosividad, y que expulsa enormes cantidades de gases y piroclastos a la atmósfera de manera sostenida y continua por períodos de varias horas. Estas erupciones forman columnas eruptivas que pueden alcanzar entre 20 y 30 kilómetros de altura sobre el cráter y forman depósitos de caída que pueden cubrir superficies de centenas a miles de km^2. El término pliniano hace referencia a la erupción del volcán Vesubio (Italia) que ocurrió en el año 79 DC, descrita con gran detalle por Plinio El Joven, y que destruyó las ciudades romanas de Pompeya y Herculano (entre otras).

Pómez (piedra): fragmentos fuertemente vesiculados de lava dacítica a riolítica, de baja densidad y colores claros (gris, crema, blanco).

Riesgo volcánico: representa los efectos dañinos de un peligro volcánico. En términos probabilísticos, constituye la probabilidad de pérdida de vidas humanas, destrucción de la propiedad o de los medios de producción de una zona que está amenazada por algún fenómeno volcánico.

Riolita (riolítico, a): tipo de roca volcánica de color gris claro que contiene más de 68% de sílice. En estado fundido presenta una viscosidad muy alta.

Sílice: molécula formada por un átomo de silicio y dos de oxígeno (SiO_2) que constituye el compuesto más abundante en las rocas volcánicas terrestres. El contenido de sílice en un magma es uno de los factores que controla su viscosidad y potencialmente su carácter explosivo, mientras mayor sea el contenido de sílice, la explosividad del magma será potencialmente más alta.

Subducción: proceso que ocurre en los límites convergentes entre dos placas tectónicas, donde la placa con mayor densidad pasa por debajo de la placa de menor densidad antes de introducirse en el manto. Las placas pueden ser ambas de origen oceánico (Islas de Japón, Las Antillas) o pueden ser de origen oceánico y continental (Los Andes). La subducción entre dos placas puede generar grandes y destructivos terremotos como el de Indonesia (2004), Haití (2010), Chile (2010) y Japón (2011), pero además el proceso de subducción también puede generar magmas en profundidad que, cuando llegan a la superficie, dan origen a los arcos volcánicos.

Tefra: término genérico que implica a todo material sólido que es expulsado a la atmósfera durante erupciones explosivas.

VEI (Volcanic Explosivity Index): Índice de Explosividad Volcánica, es una escala ampliamente utilizada para cuantificar la explosividad de una erupción volcánica. La escala VEI es logarítmica y varía entre los niveles 0 y 8. La clasificación del VEI de una erupción está basada en algunos parámetros como el volumen de tefra expulsada, la altura de la columna eruptiva y el grado de fragmentación de los materiales.

Vidrio volcánico: se refiere a las partes de las rocas volcánicas que carecen de estructura cristalina. Generalmente se forma debido al enfriamiento rápido de un magma en superficie, que no da tiempo al desarrollo de cristales. Puede presentarse en diferentes tonalidades, según su composición química. (p.e. obsidiana)

Volcán: cualquier fractura u orificio en la superficie terrestre por donde sale magma. Con el mismo nombre se denomina a la estructura topográfica que se forma por la acumulación de material volcánico emitido por un cráter.

Volcán Compuesto: se trata de volcanes que están formados por algunos edificios volcánicos de edades y sitios de emisión diferentes. Ejemplos de este tipo de volcanes en Ecuador serían el Pichincha (Rucu y Guagua Pichincha) y el Imbabura (Taita y Huarmi Imbabura).

Volcán Escudo: es un tipo de volcán que presenta flancos con pendientes de poca inclinación que están formados principalmente por flujos de lavas (generalmente basaltos). Muchos de los volcanes de Galápagos pertenecen a este grupo.

Vulcaniana (erupción): tipo de erupción que está caracterizada por la ocurrencia de eventos explosivos de corta duración pero que emiten cantidades importantes de material piroclástico y gases a la atmósfera hasta altitudes cercanas a los 20 km. Es muy común que este tipo de actividad esté relacionada a la interacción entre el agua subterránea y el magma.

ANEXO

El Sistema de Monitoreo en el Volcán Cotopaxi

Los sitemas de monitoreo volcánico se han desarrollado en las últimas décadas de manera eficiente alrededor del mundo y generamente consisten de varios componentes que, al ser evaluados de manera conjunta, permiten cumplir algunos objetivos fundamentales: 1) proveer información científica básica para mejorar el análisis de la amenaza volcánica a corto plazo (días a semanas); 2) pronosticar posibles escenarios eruptivos; 3) evaluar los diferentes fenómenos o peligros volcánicos; y 4) brindar herramientas útiles (p.e. mapas de peligros volcánicos) a las autoridades civiles que están a cargo de la mitigación del riesgo a largo plazo (años a décadas).
Algunos de los parámetros básicos que son objeto de estudio en un sistema de monitoreo volcánico son descritos brevemente a continuación:

Observaciones directas: se las realiza con los sentidos humanos y no son asistidas por instrumentos de medición. Se trata de describir cualquier cambio morfológico en el volcán o de caracterizar la actividad eruptiva superficial, como presencia de fumarolas; altura, color o presencia de ceniza en una columna eruptiva; ruidos internos en el volcán o durante una erupción; olor a azufre en las cercanías del volcán, etc.

Sismicidad volcánica: con la ayuda de sismómetros, que están instalados alrededor del volcán, se pueden detectar las vibraciones producidas por el movimiento y/o el ascenso de fluidos magmáticos al interior del edificio volcánico.

Deformación volcánica: cuando un volumen de magma se acerca a la superficie, un edificio volcánico puede experimentar cambios morfológicos (inflación o deflación) que son imperceptibles al ojo humano, sin embargo existen instrumentos que pueden detectar estos cambios con precisiones milimétricas. Entre los más usados están los distanciómetros y los inclinómetros electrónicos, los GPS (Sistemas de Posicionamiento Glo-bal), los satélites especializados (metodología INSAR).

Emisión de gases: un proceso físico asociado al ascenso de magma a la superficie es la exsolución de gases (vapor de agua, SO_2, CO_2, etc.) y su posterior escape a la atmósfera. La medición diaria de estos gases, por ejemplo SO_2, mediante sensores remotos como COSPEC (Correlation Spectrometer) o DOAS (Differential Optical Absortion Spectrometer) permiten cuantificar la tasa de emisión de dicho gas para una posterior evaluación de posibles escenarios eruptivos.

Para el caso del Cotopaxi, se cuenta con un sistema de monitoreo eficiente que vigila a diario los parámetros descritos anteriormente. En la Figura 14 está representada la red de monitoreo del volcán Cotopaxi:

Vigilancia de Lahares en el Volcán Cotopaxi

Existen varios instrumentos y métodos de vigilancia para detectar la ocurrencia y el tránsito de lahares. Un instrumento muy utilizado en otros volcanes alrededor del mundo es el denominado AFM (Acoustic Flow Monitor), cuyo funcionamiento es similar a un sismómetro porque detecta las vibraciones que producen los lahares al transitar por una quebrada o río.

El IG-EPN ha utilizado los instrumentos AFM durante las crisis eruptivas de otros volcanes en el país (Tungurahua, Reventador) y ha sido exitoso comunicando alertas tempranas cuando se han generado lahares. Actualmente, el volcán Cotopaxi cuenta con una importante red de 13 instrumentos AFM que están instalados en zonas altas de varios drenajes alrededor del cono (Figura 14), lo cual permitirá identificar la ocurrencia de lahares antes de que éstos lleguen a zonas pobladas. Sin embargo, es importante crear y reforzar un Sistema de Alerta Temprana que involucre activamente a las poblaciones potencialmente afectadas de manera conjunta con las autoridades y los organismos de emergencia encargados de la mitigación de riesgos (Gobernaciones, Municipios, Juntas Parroquiales, Secretaría de Gestión de Riesgos, Cruz Roja, Cuerpos de Bomberos, Policía Nacional, Fuerzas Armadas, etc.)

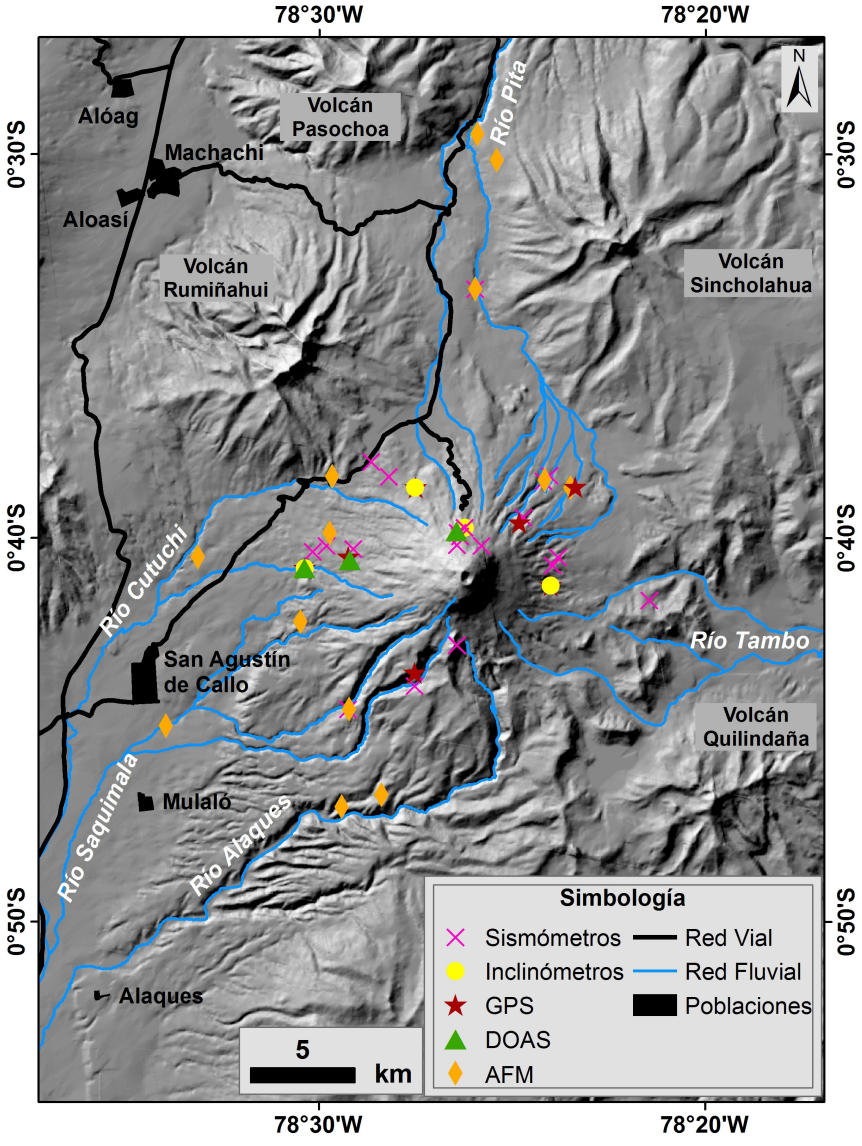
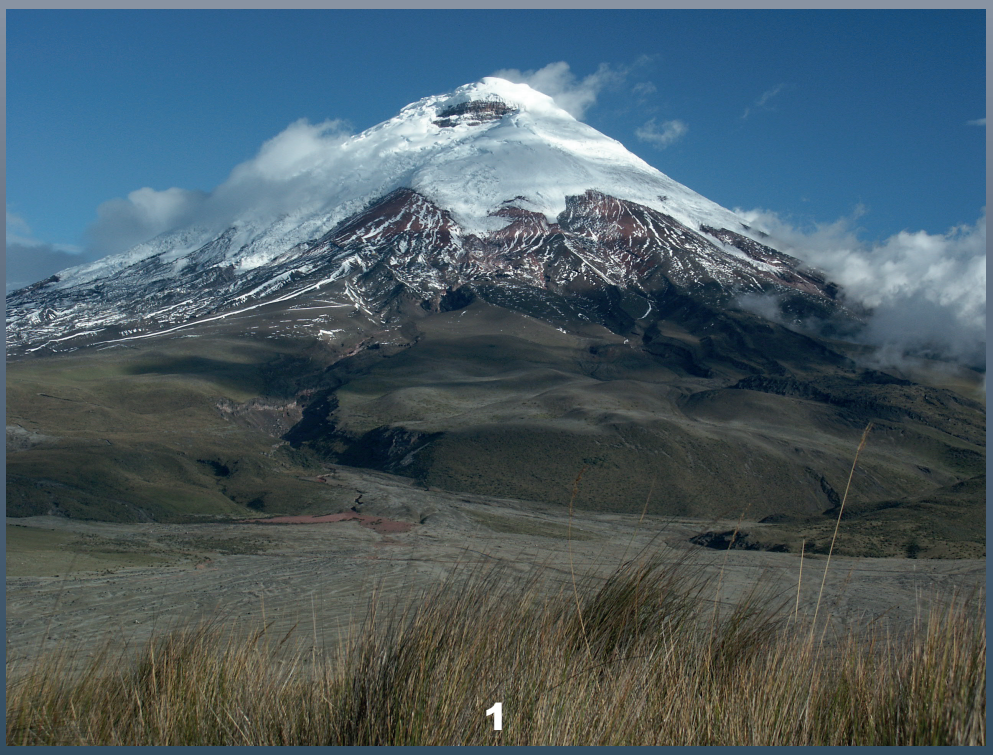


Figura 14. Sistema de Monitoreo en el Volcán Cotopaxi.


1

2

3

4

5

Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional

Calle Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Edificio de Ingeniería Civil y Ambiental, 6to Piso
Casilla 17-01-2759
www.igepn.edu.ec
Quito - Ecuador

Teléfonos: (593 2) 222 5655 / 222 5627
Fax: (593 2) 256 7847