

Daniel Andrade
Minard Hall
Patricia Mothes
Liliana Troncoso
Jean-Philippe Eissen
Pablo Samaniego
José Egred
Patricio Ramón
David Rivero
Hugo Yepes

Los peligros volcánicos asociados con el **Cotopaxi**



IG
INSTITUTO GEOFÍSICO DE
LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

IRD
INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DÉVELOPPEMENT

Serie

**Los peligros
volcánicos en Ecuador**


CORPORACIÓN
EDITORIA NACIONAL


3

**Los
PELIGROS
VOLCÁNICOS**

asociados con el

Cotopaxi

IRD

L'institut de recherche pour le développement (IRD; Instituto francés de Investigación para el desarrollo), es un establecimiento público de carácter científico y tecnológico, auspiciado por los ministerios de Investigación y Cooperación de Francia.

EL IRD realiza investigaciones conjuntamente con otras instituciones francesas, europeas e internacionales, siempre en cooperación con organismos asociados en la zona intertropical, en África, América Latina, Asia y en los océanos Índico y Pacífico.

El IRD tiene una representación en el Ecuador desde 1974, y cuenta con una tradición importante de investigación en el Ecuador, en varios campos. Actualmente, investigadores de tres departamentos científicos del IRD trabajan en Ecuador.

El departamento Medios y Entornos, desarrolla investigaciones sobre la variabilidad climática tropical, las interacciones entre el océano y la atmósfera, los medios litorales y terrestres y los recursos hídricos, los riesgos naturales, los recursos minerales y el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente.

El departamento Recursos Vivos se dedica al estudio de la biodiversidad, de los ecosistemas acuáticos y de los agrosistemas tropicales con el fin de garantizar la variabilidad de su explotación mediante un manejo apropiado.

El departamento Sociedad y Salud realiza programas de investigación sobre la salud, las cuestiones urbanas, las dimensiones económicas, sociales y culturales del desarrollo y sobre el estado de las ciencias en el África.

Instituto Geofísico/ Departamento de Geofísica Escuela Politécnica Nacional

El Instituto Geofísico/Departamento de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional constituye el primer centro de investigación sísmica y volcánica existente en el país. A partir de enero de 2003, mediante Decreto Presidencial, tiene a cargo en forma oficial el diagnóstico y vigilancia de los peligros sísmicos y volcánicos en todo el territorio nacional y a la vez la comunicación oportuna de estos fenómenos.

Conjuntamente con el diagnóstico de la amenaza, el Instituto Geofísico mantiene un activo programa de monitoreo instrumental en tiempo real, que asegura la vigilancia científica permanente sobre volcanes activos y fallas tectónicas en el territorio nacional. Una serie de publicaciones tanto científicas como de divulgación general a nivel nacional e internacional, dan fe de la capacidad y mistica de trabajo de los científicos y técnicos que conforman el Instituto.

A lo largo de su corta vida, el Instituto Geofísico se ha hecho acreedor a importantes premios y reconocimientos, a nivel local e internacional, por su trabajo en el diagnóstico y prevención de los desastres naturales. En 1992, el Premio SASAKAWA, otorgado por las Naciones Unidas y, varios reconocimientos y condecoraciones por parte del Ilustre Municipio de Quito (1999), del Honorable Congreso Nacional (2000) y del Gobierno de la Provincia de Pichincha (2003).

Serie:
Los peligros volcánicos
en el Ecuador

Los PELIGROS VOLCÁNICOS

3

asociados con el **Cotopaxi**

Daniel Andrade

Minard Hall

Patricia Mothes

Liliana Troncoso

Jean-Philippe Eissen

Pablo Samaniego

José Egred

Patricio Ramón

David Rivero

Hugo Yepes



IG
INSTITUTO GEOFÍSICO DE LA
ESCUELA POLITÉCNICA
NACIONAL



**Institut de recherche
pour le développement**

IRD
INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DÉVELOPPEMENT



**CORPORACIÓN
EDITORIA NACIONAL**

Noviembre 2005
Quito-Ecuador

Serie:
Los peligros
volcánicos
en el Ecuador
3

Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi

**Daniel Andrade⁽¹⁾, Minard Hall⁽¹⁾, Patricia Mothes⁽¹⁾,
Liliana Troncoso⁽¹⁾, Jean-Philippe Eissen⁽²⁾,
Pablo Samaniego⁽¹⁾, José Egred⁽¹⁾, Patricio Ramón⁽¹⁾,
David Rivero⁽¹⁾ y Hugo Yepes⁽¹⁾**

- 1 Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional
Ladrón de Guevara s/n, Apdo. Postal 17-01-2759,
Quito-Ecuador.
- 2 Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UR 163
Laboratoire «Magma et Volcans», 5 rue Kessler, 63038
Clermont-Ferrand, Francia.

© Corporación Editora Nacional

ISBN 9978-84-398-1

Derechos de autor: 023271

Depósito legal: 003142

Noviembre de 2005

Supervisión editorial: Jorge Ortega

Diseño gráfico: Edwin Navarrete + Duo Diseño

Impresión: Editorial Ecuador. Santiago Oe2-131 entre Manuel
Larrea y Versalles, Quito.

Foto de la portada: Vista aérea oblicua del flanco sur-oriental del Cotopaxi, zona aislada y poco conocida del volcán. En primer plano, a la izquierda, está el pequeño macizo del Morurcu; detrás están los macizos del Sincholagua, a la derecha, y del Rumiñahu, a la izquierda. (Foto: P. Ramón).

Foto de la contraportada: El Cotopaxi visto desde la ciudad de Latacunga al atardecer. Este volcán es un importante referente del paisaje y de la cultura de los Andes del norte del Ecuador. (Foto: D. Andrade).

Corporación Editora Nacional

Roca E9-59 y Tamayo, teléfonos: 593(2) 255 4358, 256 6340,

fax: ext. 12, apartado postal 17-12-886

correo electrónico: cen@accessinter.net

Quito-Ecuador

Para más información, contáctenos:

Instituto Geofísico de la EPN, Quito-Ecuador

teléfono: 222 5655

fax: 256 7847

e-mail: geofisico@igepn.edu.ec

página web: www.igepn.edu.ec

Este libro se publica con el apoyo financiero de la DIC (Délégation à l'Information et à la Communication) del IRD (Institut de Recherche pour le Développement-Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo).

Contenido

Agradecimientos	7
Dedicatoria	9
Introducción	13
Historia geológica del volcán Cotopaxi	17
El período pre-histórico	18
El período histórico	23
Tipos de fenómenos volcánicos ocurridos en el volcán Cotopaxi	29
Sismos volcánicos	29
Gases volcánicos	30
Flujos de lava	33
Domos de lava	35
Flujos piroclásticos (nubes ardientes)	36
Lluvia de ceniza y piroclastos	41
Flujos de lodo y escombros (lahares)	45
Avalanchas de escombros	51
Monitoreo del volcán Cotopaxi	55
Monitoreo por vigilancia visual	55
Monitoreo por vigilancia instrumental	58
El monitoreo volcánico y la comunicación	77
Actividad actual del volcán Cotopaxi y potenciales escenarios eruptivos futuros	81
Actividad actual del Cotopaxi	81
Potenciales escenarios eruptivos futuros	87
Referencias	93
Glosario	99

Anexo 1. Algunos problemas asociados con la caída de ceniza volcánica	107
Anexo 2. Índice de Explosividad Volcánica	113
Anexo 3. Testimonios históricos	114
Anexo 4. Resumen de la actividad histórica del Cotopaxi	129
Anexo 5. Los andinistas y los volcanes ecuatorianos	135
Formulario para reportes de observaciones visuales	136
Anexo 6. La actividad sísmica del Cotopaxi	138
Anexo 7. Excursión de observación de depósitos recientes del volcán Cotopaxi	140
Anexo 8. Origen del volcanismo en el Ecuador	144

Agradecimientos

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento:

- A la Délégation à l'Information et à la Communication (DIC) del IRD (Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo) por el apoyo financiero que ha hecho posible la publicación de este trabajo.
- A la Escuela Politécnica Nacional, por el constante apoyo y garantía a las labores del Instituto Geofísico.
- Al Programa de Asistencia para Crisis Volcánicas (VDAP) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), financiado por OFDA/USAID, por el constante y desinteresado apoyo en la parte instrumental y en la interpretación de los datos obtenidos mediante el monitoreo de los volcanes del Ecuador.
- Al Institut de Recherche pour le Développement (IRD, Francia) por el valioso apoyo dado al IG en campo de la volcanología.
- A la Japan International Cooperation Agency (JICA) por invertir en la vigilancia del Cotopaxi con la instalación de cinco estaciones sísmicas de banda ancha, prevista para el segundo semestre de 2005.
- Al Ilustre Municipio del Distrito Metropolitano de Quito y al Gobierno de la Provincia de Pichincha por el apoyo prestado al monitoreo instrumental del volcán Cotopaxi.
- Al Instituto Geográfico Militar, por su cooperación en la preparación de los mapas de peligros de los volcanes del Ecuador.
- Al Volcanic Ash Advisory Center (VAAC), por mantener los "ojos" de sus satélites sobre los volcanes del Ecuador y por siempre compartir esta valiosa información.
- A Franz Böker y al Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) de Alemania, por el apoyo en el monitoreo térmico de los volcanes ecuatorianos y por los periódicos sobrevuelos que han permitido obtener varias de las imágenes publicadas en este trabajo.
- Al Myr. Oswaldo Navas (Coordinador Provincial de Defensa Civil de Cotopaxi) y a la Lcda. Jimena Jijón (Directora del Centro de Información y Gestión de Riesgos Naturales, Administración del Valle de los Chillos del Distrito Metropolitano de Quito), por la confianza y la experiencia compartida durante el trabajo de mitigar los peligros volcánicos.
- Al Dr. Marco Castro y a la Ing. Ximena Hidalgo, del Departamento de Ciencias del Agua de la Escuela Politécnica Nacional por su liderazgo y valiosa colaboración en el área de modelaje numérico de los lahares del Cotopaxi.
- Al Dr. Tim Dixon de la Universidad de Miami y al Dr. Charles Connor de la Universidad de South Florida en Tampa, por su colaboración en la instalación de GPS's de recepción continua en el volcán Cotopaxi.
- A la cámara de Comercio de Quito, al Club de Andinismo Politécnico y a Aglomerados Cotopaxi S.A., por el apoyo recibido para realizar la instalación de la cámara de video en el cráter del Cotopaxi en marzo de 2005.

- Al Dr. Marc Souris (IRD-Bondy-Francia) por facilitar los datos con los cuales se ha generado el modelo numérico de terreno utilizado en varios de los mapas presentados en este trabajo. Los datos digitales fueron obtenidos a partir de los mapas topográficos del Instituto Geográfico Militar del Ecuador.
- Finalmente, a todos los miembros del Instituto Geofísico por su responsable y absoluta dedicación al mantenimiento de las diferentes redes de monitoreo sísmico y volcánico:

Dirección:

Ing. Hugo Yepes, MSc.

Área técnica:

Ing. Wilson Enriquez, MSc. (Jefe de Área)	
Ing. Mayra Vaca	Tlgo. Vinicio Cáceres
Fís. Omar Marcillo (*)	Tlgo. Cristian Cisneros
Ing. Cristina Ramos, MSc.	Fís. Jorge Aguilar
Ing. Marisol León	Tlgo. Eddy Pinajota
Sr. Kléber Terán (**)	Sr. Santiago Arellano
Sr. Andrés Cadena	Sr. Sandro Júa
Srta. Miriam Paredes	Srta. Lorena Gomezjurado
Ing. Richard Jaramillo, MSc. (*)	Ing. Daniel Cárdenas, MSc (*)

Área de Sismología:

Ing. Alexandra Alvarado, MSc. (Jefe de Área)	
Ing. Mónica Segovia	Geol. Indra Molina
Geol. Alexander García	Ing. Lilita Troncoso
Dra. Alcinoe Calahorrano	Dr. Hiroyuki Kumagai (NED, Japón)
Sr. Guillermo Viracucha	Sr. Sandro Vaca
Srta. Verónica Lema	Sr. Andrés Ojeda
Sr. Javier Santo	Ing. Mario Ruiz, MSc. (*)

Área de Volcanología:

Dr. Pablo Samanlego (Jefe de Área)	
Dr. Minard Hall	Ing. Patricia Mothes, MSc.
Ing. Patricio Ramón	Ing. Gorki Ruiz
Dr. Jean-Philippe Eissen (IRD, Francia)	Dr. Jean-Luc Le Pennec (IRD, Francia)
Dr. Michel Monzier (IRD, Francia) (+)	Ing. Silvana Hidalgo, MSc. (*)
Sr. Diego Barba	Sr. David Rivero
Sr. Daniel Basualto (**)	Ing. Daniel Andrade, MSc.

Área de Secretaría y Servicios:

Sra. Marcela de Robalino	Srta. Sandra Jiménez
Srta. Gabriela Jácome	Sr. Servilio Ríofrío
Sr. Carlos Ayol	

Además, los autores expresan su reconocimiento especial al grupo de estudiantes que aseguran la vigilancia del Cotopaxi, las 24 horas al día, los 365 días al año: Jorge Bustillos, Pablo Cobacango, Cristian Correa, Dayanara Hinojosa, Johanna León, Diana Ramírez, Paúl Silva, Gabriela Taipe, Mercedes Taipe, Silvia Vallejo y Patricio Verdesoto.

(*) Personal del Instituto Geofísico que se encuentra realizando estudios de posgrado en el extranjero.

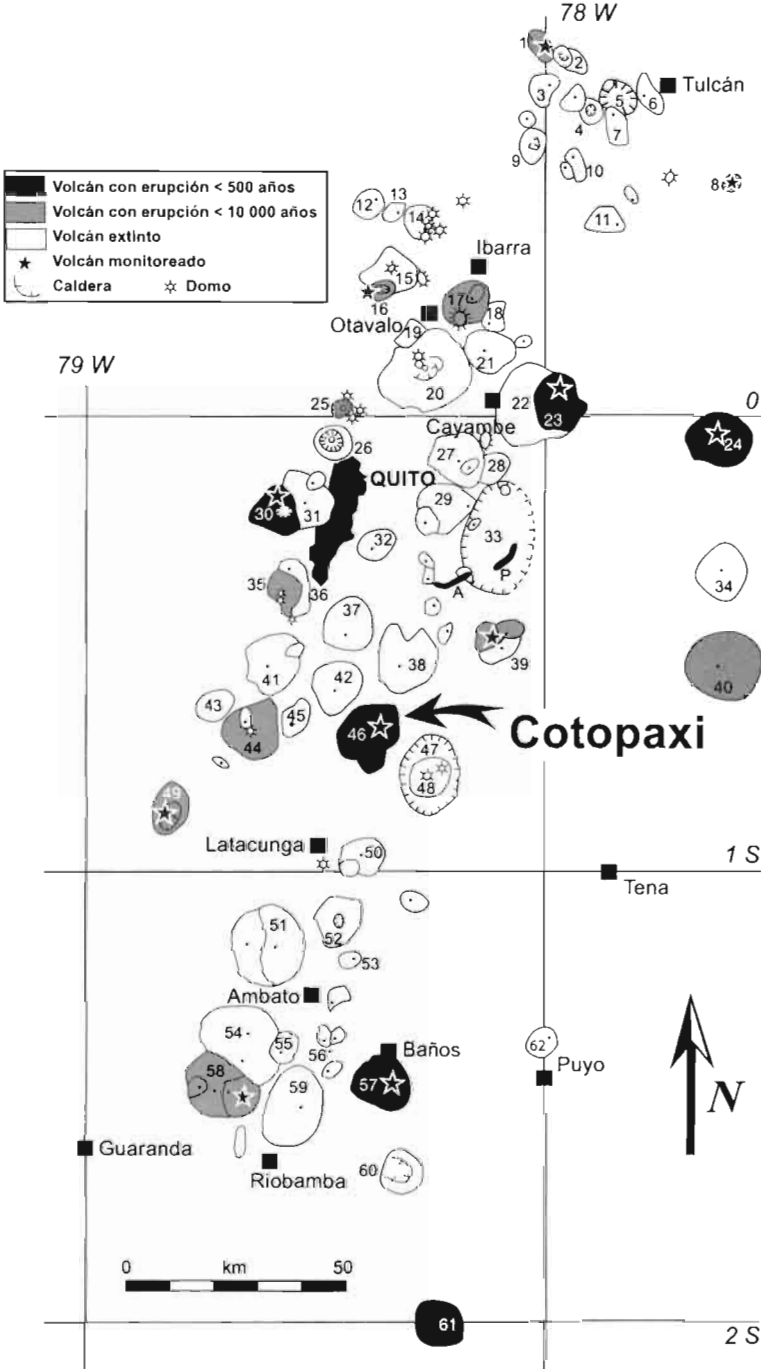
(**) Personal que trabajó activamente en el Instituto Geofísico.

Dedicatoria

■ *Este trabajo está dedicado al amigo lector, que está interesado en compartir lo que conocemos sobre los volcanes del Ecuador.*

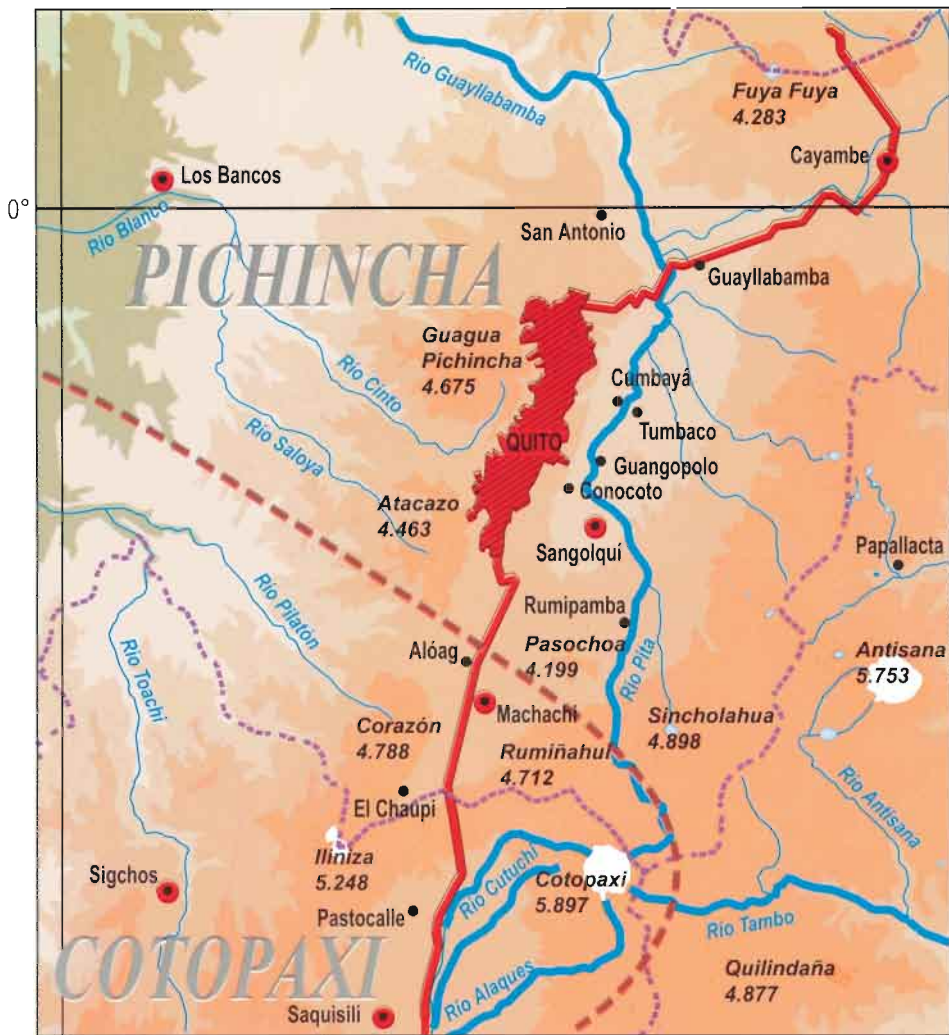
Y al Cotopaxi, que nos ofrece a todos sus recursos y su belleza.

Los volcanes en el Ecuador



1. Cerro Negro de Mayasquer
2. Chiles
3. Peña Blanca (Chiltazón)
4. Potrerillos
5. Caldera de Chalpatán
6. Chulamuez
7. Horqueta
8. Soche
9. Iguán
10. Chaquilulo (Azufra)
11. Mangus
12. Pllavo (Negropuno)
13. Yanaurcu
14. Huangullaro (Huagraboía)
15. Cotacachi
16. Cuicocha
17. Imbabura
18. Cubilche
19. Cushnirumi
20. Mojanda - Fuya Fuya
21. Cusín
22. Viejo Cayambe
23. Nevado Cayambe
24. El Reventador
25. Pululagua (Pululahua)
26. Casitagua
27. Pamba Marca
28. Izambí
29. Puntas
30. Guagua Pichincha
31. Rucu Pichincha
32. Ilaló
33. Caldera de Chacana
- A: Antisanilla (1760)
- P: Porterillo/Papallacta (1773)
34. Pan de Azúcar
35. Ninahuilca
36. Atacazo
37. Pasochoa
38. Sincholagua
39. Antisana
40. Sumaco
41. Corazón
42. Rumiahui
43. Almas Santas
44. Illiniza
45. Santa Cruz
46. Cotopaxi
47. Caldera de Chalupas
48. Quillindaña
49. Quilotoa
50. Santapungo (Chinibano)
51. Sagoatoa (Saguatoa)
52. Larcapungo
53. Huicutambo
54. Carhuairazo
55. Puñalica
56. Huisia
57. Tungurahua
58. Chimborazo
59. Igualata
60. Altar / Capac Urco
61. Sangay
62. Cono del Puyo

Figura 1. Arco volcánico del Ecuador (Modificado de Hall y Beate, 1991). En los Andes del Ecuador se ha podido identificar más de 50 complejos volcánicos, entre los cuales se cuentan ocho considerados como activos (con al menos una erupción en tiempos históricos, es decir desde la llegada de los españoles en 1532); y diez volcanes más considerados como potencialmente activos (con erupciones ocurridas en los últimos 10 mil años).



79°

LEYENDA

Zona afectada por caída de ceniza

Recorrido de lahares

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

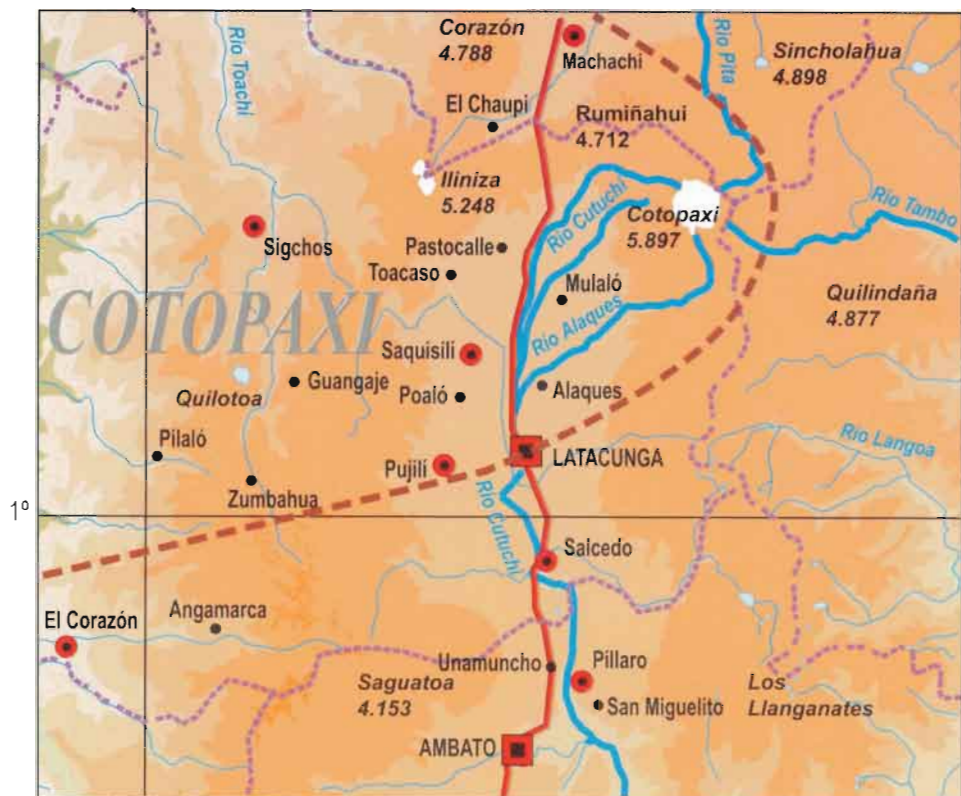
Cabecera cantonal

Parroquia

Panamericana

Límite provincial

Figura 2a. Mapa regional de la zona ubicada al norte del Cotopaxi que sería más afectada en caso de una erupción del volcán. Para tener más detalles sobre las zonas en riesgo, consultar los Mapas de Peligros del Cotopaxi, publicados por el Instituto Geofísico - EPN.



1°

79°



Figura 2b. Mapa regional de la zona ubicada al sur del Cotopaxi que sería más afectada en caso de una erupción del volcán. Para tener más detalles sobre las zonas en riesgo, consultar los Mapas de Peligros del Cotopaxi, publicados por el Instituto Geofísico - EPN.

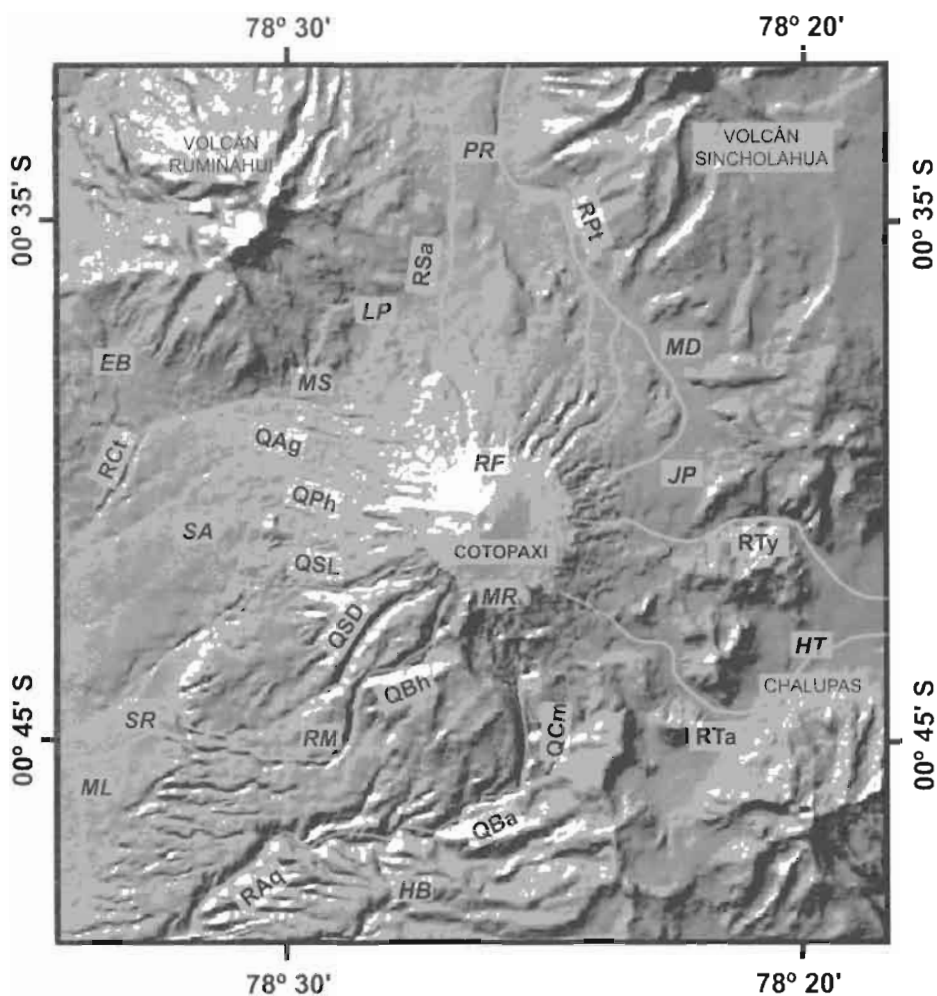


Figura 3. Modelo digital de la zona proximal del Cotopaxi. Se incluyen las principales poblaciones y los drenajes que nacen de los glaciares del volcán. (RSa= río Salto; RPt= río Pita; RTy = río Tamboyacu; RTa= río Tambo; RCh= río Cutuchi; RAq= río Alaquez; QAg= quebrada Agualongo; QPh= quebrada Pucahuaycu; QSL= quebrada San Lorenzo; QSD= quebrada San Diego; QBh= quebrada Burrohuaycu; QCM= quebrada Cimarrones; QBa= quebrada Barrancas; EB= zona de El Boliche; PR= zona de Proaño; LP= zona de Limpiopungu; MS= zona de Mariscal Sucre; SA= zona de San Agustín; SR: zona de San Ramón; MD= zona de Mudadero; JP= zona de Jatunpamba; RF= Refugio; MR= Cerro Morurcu; HB= Hacienda Baños).

1. Introducción

El volcán Cotopaxi (Latitud 0°38' Sur; Longitud 78°26' Oeste; 5 897 msnm) es un *gran estratovolcán*¹ activo ubicado en la Cordillera Real de los Andes del Ecuador, a 60 km al sureste de Quito y a 45 km al norte de Latacunga (Figs. 1 y 2). Tiene una base de 16x19 km y un relieve que puede alcanzar entre 2 000 a 3 000 metros desde la base hasta la cima, mientras que las pendientes de sus flancos altos tienen hasta 30° de inclinación (Fig. 3).

El Cotopaxi está cubierto con un importante casquete glaciar cuya área actual está calculada en ~14 km² (aprox. 14 millones de m²) y su volumen estimado en ~0.7 km³ (aprox. 700 millones de m³) (Cáceres, *et al.*, 2004; Cáceres, 2005). A causa de los vientos húmedos predominantes que vienen de la cuenca amazónica, los glaciares orientales del Cotopaxi bajan hasta la cota de ~4 600 m en el sector oriental del cono, mientras que en la zona occidental el glaciar llega solamente hasta la cota de 5 100 m (Fig. 3). En las últimas décadas se ha observado un claro retroceso de los glaciares que cubren éste y otros volcanes ecuatorianos, como es el caso del Antisana, Chimborazo, Cayambe, Tungurahua e Iliniza. Este fenómeno es lento pero constante y probablemente esté asociado al calentamiento global del clima en la Tierra. En el caso del Cotopaxi, se han realizado estimaciones de la velocidad del retroceso del glaciar y de otros parámetros que serán discutidos más adelante en otros capítulos.

Los deshielos del Cotopaxi son drenados por numerosas quebradas, las cuales alimentan tres sistemas fluviales principales: 1) **el río Cutuchi** al occidente y al sur; 2) **el río Tambo**,

¹ Los términos en *itálicas* se encuentran definidos en el Glosario de esta obra.



Figura 4. Fotografía del flanco norte del volcán Cotopaxi, visto desde la planicie de Limpiopungo (Foto P. Mothes).

afluente del río Napo, al oriente; y, 3) **el río Pita** que corre hacia el norte (Fig. 3). Las laderas inferiores del volcán están cubiertas con vegetación de páramo hasta los ~4 600 metros; más arriba la vegetación es escasa y se encuentran extensos arenales y vestigios del descongelamiento paulatino de los glaciares del volcán en las últimas décadas (Fig. 4).

El cráter del Cotopaxi tiene una forma casi circular, con un diámetro de ~800 m aproximadamente y una profundidad superior a los ~100 metros (Fig. 5). En el interior del cráter, así como en sus bordes, se constata la presencia de continuas emanaciones fumarólicas.

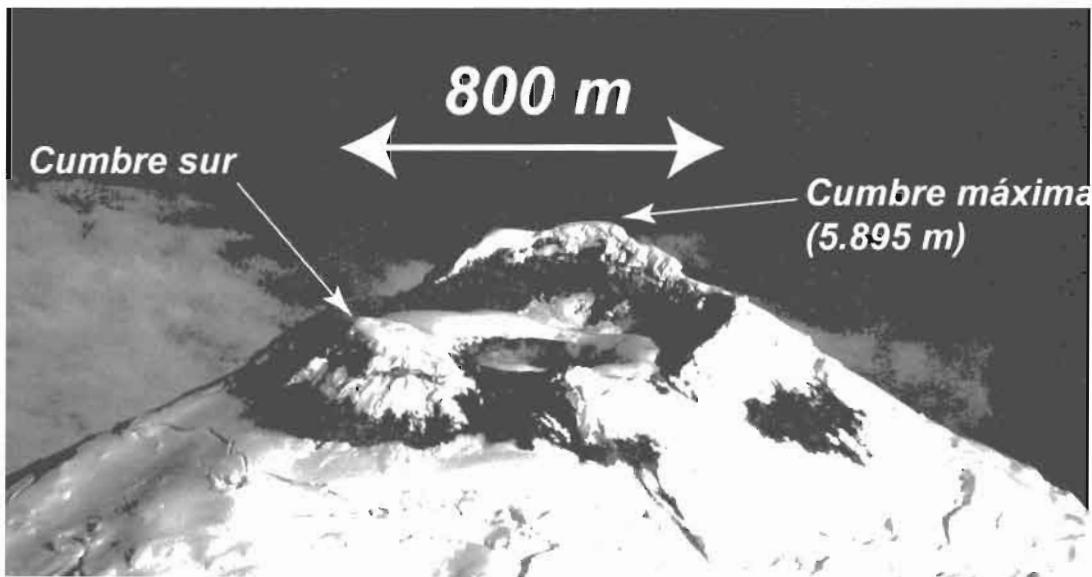
Además, este imponente volcán y las planicies y páramos aledaños constituyen el Parque Nacional del Cotopaxi, una zona turística de recreación y de reserva forestal y animal. Los visitantes del Parque del Cotopaxi se cuentan por miles cada año. Además, las áreas ubicadas en el Valle Interandino al occidente del volcán son zonas agrícolas y ganaderas de gran importancia en la economía de la región.

Desde 1532 (principio de la época histórica en el Ecuador) el Cotopaxi ha presentado cinco ciclos eruptivos principales en los años 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y

1877-1880. Se reconoce que han ocurrido aproximadamente trece (13) erupciones mayores dentro de estos cinco ciclos. Los fenómenos volcánicos asociados a todas esas erupciones fueron: 1) caídas de ceniza, pómez y escoria; 2) coladas de lava; 3) flujos piroclásticos; y, 4) flujos de lodo y escombros (lahares) (Hall y von Hillebrandt, 1988a). Estos fenómenos volcánicos afectaron severamente las zonas aledañas al volcán, causando importantes daños a propiedades, especialmente al sector agropecuario, así como pérdidas de vidas humanas y crisis económicas regionales.

En los próximos capítulos se presenta descripciones detalladas sobre los fenómenos volcánicos mencionados arriba. En el segundo capítulo de esta obra se hará una breve descripción de la “Historia Geológica” del Cotopaxi, con el fin de que el lector tenga una buena idea de los períodos de tiempo (tanto históricos como pre-históricos) que han sido necesarios para el desarrollo del volcán. En el tercer capítulo se hará una presentación detallada de cada uno de los “Fenómenos Volcánicos” ocurridos durante las erupciones históricas y pre-histó-

■ **Figura 5.** Vista aérea del cráter del volcán Cotopaxi, desde el sur-oriente. Nótese las importantes superficies sin glaciación originadas por el calor existente cerca al cráter. (Foto P. Ramón).



ricas del Cotopaxi, donde se incluirán datos cuantitativos de tales fenómenos, así como descripciones de las zonas amenazadas por los mismos en caso de erupción del Cotopaxi. El cuarto capítulo presentará al lector los múltiples “Métodos de Monitoreo” utilizados por el Instituto Geofísico para vigilar la actividad del volcán Cotopaxi. Finalmente, en el quinto capítulo se presentará una breve evaluación de la “Actividad Actual” del volcán a base de los métodos de monitoreo utilizados, así como una descripción de los cuatro “Potenciales Escenarios” principales que podrían presentarse en el futuro en caso de una nueva erupción del Cotopaxi.

Además, se presenta una serie de Anexos, en los cuales se puede encontrar información detallada que no había sido incluida en el cuerpo del texto principal con el fin de no oscurecerlo. Se describe en los anexos: 1) los efectos de las caídas de ceniza; 2) el significado y los criterios para cuantificar el Índice de Explosividad Volcánica (VEI); 3) testimonios de algunas erupciones históricas del Cotopaxi; 4) un cuadro de resumen de toda la actividad histórica del Cotopaxi; 5) la importancia de las observaciones realizadas por turistas y andinistas; 6) un diagrama para que el lector lleve un control de la actividad sísmica del Cotopaxi; 7) una excursión de observación de los depósitos del Cotopaxi; y, 8) un resumen didáctico sobre el origen del volcanismo en el Ecuador.

Esperamos que esta obra ayude al lector a tener una mejor idea sobre los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi, y que como consecuencia asuma con mayor seguridad y responsabilidad su rol en las tareas de mitigación del peligro volcánico. El objetivo primordial de esta obra es, sobre todo, permitir que el lector reciba con mayor facilidad las informaciones que sobre el Cotopaxi le sean entregadas en el futuro, y que en él nazca un espíritu previsor y de crítica positiva.

2. Historia geológica del volcán Cotopaxi

Como la gran mayoría de *volcanes* de la Tierra, el Cotopaxi tiene una historia de actividad relativamente larga. El paisaje y las formas que observamos actualmente en el volcán son la consecuencia de una serie más o menos compleja de sucesivos eventos geológicos y volcánicos.

El Cotopaxi ha llamado la atención de científicos y expedicionarios desde hace ya varios siglos. Así, las primeras descripciones geológicas del volcán y sus erupciones fueron hechas por célebres científicos como La Condamine (1751), Humboldt (1810), Reiss (1874), Sodiro (1877), Wolf (1878, 1904), Whymper (1892), Stübel (1903), Reiss y Stübel (1904) y Martínez (1932a, 1932b). Más recientemente, a partir de los años de 1970, los estudios geológicos más importantes del volcán y de sus peligros potenciales han sido llevados a cabo por Hradecka, *et al.* (1974), Hall (1977), Miller, *et al.* (1978), Hall y Hillebrandt (1988a, 1988b), Hall y Mothes (1992), Barberi, *et al.* (1995), Mothes, *et al.* (1998), Hall, *et al.* (2004a, 2004b y 2005) y Ettinger, *et al.* (2005).

La historia geológica del Volcán Cotopaxi que presentamos aquí es un resumen del trabajo recientemente publicado por Hall, *et al.* (2005): Mapa Geológico del Volcán Cotopaxi (escala 1:50 000). Este trabajo representa más de 20 años de recopilación sistemática de datos de campo y de laboratorio, que han permitido adquirir un gran conocimiento de la evolución del Cotopaxi en el tiempo.

■ EL PERÍODO PRE-HISTÓRICO

Los vestigios más antiguos: la fase *riolítica* del “Cotopaxi I”

Los depósitos más antiguos de la actividad volcánica del Cotopaxi tienen más de ~500 *ka* de edad, y corresponden a un antiguo complejo volcánico que ha sido bautizado como “Cotopaxi I”. En nuestros días, esos depósitos aparecen solamente en el flanco sur y sur-occidente del cono actual, en las profundas quebradas de los ríos Barrancas (Simarrones), Burrohuaicu, Saquimala y San Lorenzo (Fig. 6). Si bien muchos de los depósitos originales han sido erosionados, el estudio de los remanentes muestra que entre 560 y 420 *ka AP* (Antes del Presente), el Cotopaxi I tuvo una actividad principalmente caracterizada por erupciones de *magmas riolíticos*.

En ese tiempo, el Cotopaxi tenía un aspecto bastante diferente al actual, ya que no estaba formado por un alto edificio cónico, sino por un grupo de *domos* de lava *riolítica* alineados sobre una fractura arqueada de ~8 km de largo. Se piensa que, en conjunto, el Cotopaxi estaba conformando una *caldera* similar al volcán Quilotoa, pero de dimensiones más importantes. Los estudios geológicos muestran que las erupciones de este complejo eran de gran magnitud. Cuando las erupciones fueron muy explosivas, se formaron voluminosos flujos piroclásticos que viajaron por más de 17 km hacia el sur-occidente del volcán, y se produjeron extensas caídas de *piroclastos* (ceniza y pómez), que cubrieron zonas ubicadas a más de 30 km al sur del cono (Fig. 6). En cambio, cuando las erupciones eran poco explosivas se formaban domos de *lavas riolíticas* y de *obsidiana*, algunos de los cuales aún se pueden observar al sur del cono actual.

La fase andesítica del “Cotopaxi I”

Luego vino un período de actividad caracterizado por la presencia de magmas de tipo *andesítico* en el Cotopaxi I. Las erupciones fueron entonces menos explosivas, caracterizadas principalmente por la presencia de grandes flujos de lava y pequeñas caídas de escoria y ceniza volcánica (Fig. 6). Estos eventos construyeron poco a poco un edificio cónico, probablemente similar al actual, cuyos vestigios están representados actualmente por el cerro Morurcu (4 850 m), al sur del volcán. A medida que este volcán andesítico se construía, también estuvo sujeto a fuertes fenómenos de erosión por *glaciares* y por ríos.

Evidencias importantes de este período también se observan a lo largo del cañón del río Pita, al norte del Cotopaxi (Figs. 2 y 3). En esta zona se pueden encontrar al menos cinco grandes flujos de *lava andesítica*, de varios metros de espesor, que recorrieron distancias de entre 23 y 40 km al norte del volcán, así como depósitos de lahares intercalados en las lavas (Fig. 6).

No se conoce la edad exacta del período de actividad andesítica del Cotopaxi I, pero por evidencias indirectas se sabe que ocurrió poco tiempo después de 420 *ka AP*, es decir, después de la fase riolítica. Luego de este período andesítico, parece que el volcán entró en una larga pausa de actividad que se extendió por cerca de 350 *ka*.

Un largo descanso: las Unidades Cangahua y Chalupas

Como ya se había mencionado, luego de la fase andesítica del Cotopaxi I hubo un largo período de calma en el Cotopaxi. Sin embargo, en ese período de tiempo se depositaron y

cubrieron la zona del volcán dos importantes Unidades geológicas, productos de la intensa actividad volcánica en zonas cercanas de los Andes ecuatorianos.

La primera es la **Unidad Cangahua**, que consiste en un depósito de color café claro hasta habano, de varios metros de espesor, compuesto de capas sucesivas de cenizas finas endurecidas. La Unidad Cangahua aparece en casi todo el norte de los Andes del Ecuador. La deposición de esta extensa capa representa un período de tiempo de más de 300 *ka* de duración.

La segunda capa importante es la **Unidad de la Ignimbrita Chalupas**, que es un enorme depósito de varias decenas de metros de espesor, de color gris claro hasta casi blanco y que contiene abundante ceniza y pómez fibrosa de color blanco o grisáceo (Fig. 6). Es común observar esta capa a lo largo del Valle Interandino, desde Riobamba al sur, hasta Tumbaco al norte. Este depósito corresponde a una erupción gigantesca, la cual formó la *caldera* de Chalupas, ubicada a menos de 10 km al sureste del Cotopaxi (Figs. 1 y 6). Las *dataciones radiométricas* y los estudios geológicos (Hammersley y De Paolo, 2002) indican que esa erupción ocurrió hace cerca de 200 *ka AP* y se ha calculado que el volumen del depósito es de aproximadamente 100 km³ (Beate).

Como se había dicho, estas dos Unidades geológicas cubrieron casi por completo la zona del Cotopaxi I con depósitos de varios metros de espesor, mientras que el volcán permanecía aparentemente sin actividad.

Vigorosa reactivación: el “Cotopaxi II-A”

Luego del largo reposo de unos 350 *ka*, empezó una nueva etapa de gran actividad en el Cotopaxi hace ~13,2 *ka AP*, cuando el volcán comenzó nuevamente a construir un edificio

que ha sido bautizado como “Cotopaxi II-A” (Fig. 7). La principal característica de la actividad del Cotopaxi II-A fue la ocurrencia de una serie grandes erupciones *riolíticas* (magmas riolíticos). Los estudios geológicos muestran que al menos cinco de estas erupciones riolíticas ocurrieron entre 13 200 y 4 500 años AP.

Por su naturaleza altamente explosiva las erupciones *riolíticas* del Cotopaxi II-A produjeron extensas caídas de *pómez* y ceniza, algunas de las cuales tienen espesores importantes incluso en las zonas actuales de Sigchos (50 km al W), Quito (60 km al N), Papallacta (65 km al NE), Cosanga (65 km al E) y Coca (165 km al E). Las erupciones riolíticas también produjeron grandes flujos piroclásticos que fluyeron hasta por 40 km al N y hasta por 20 km al W y al E del volcán (Fig. 7). Además de las riolíticas, también ocurrieron frecuentes erupciones *andesíticas*, de tamaño mucho menor, que contribuyeron a la formación del edificio del Cotopaxi II-A.

La última erupción *riolítica*, ocurrida hace 4 500 años AP, fue de carácter catastrófico: luego de casi 9 000 años de actividad, el Cotopaxi II-A seguramente había formado un gran edificio volcánico, el mismo que se volvió inestable en el transcurso de esta erupción. Como consecuencia, un gran sector del flanco noreste del edificio se derrumbó formando una *avalancha de escombros* de volumen formidable (2,1 km³) cuyos remanentes conforman el gran campo de colinas de decenas de metros de altura que se observan al pie noreste del cono actual (Fig. 21). La avalancha fue precedida y seguida por grandes flujos piroclásticos (Fig. 8; Hall, *et al.*, 2005). La combinación de estos eventos, sumados a la gran porción del *glaciar* que se fundió casi instantáneamente, dio lugar a la formación de un lahar de tamaño gigantesco, conocido como “Lahar del Valle de Los Chillos”. Este lahar es probablemente

el más grande que haya formado el Cotopaxi en toda su historia y fluyó sobre todo por los ríos Pita, San Pedro y Guayllabamba hacia el norte hasta llegar al océano Pacífico a través del río Esmeraldas. El volumen del depósito de este enorme lahar ha sido calculado en 3,8 km³ (Mothes, *et al.*, 1998). Durante esta erupción, también ocurrieron lahares de importancia hacia el sur, sobre el río Cutuchi, y hacia el oriente, sobre el río Tamboyacu (Fig. 8).

Al final de esta última erupción *riolítica*, casi la cuarta parte del edificio del Cotopaxi II-A había quedado destruida.

Actividad andesítica actual: el Cotopaxi II-B

Desde el final catastrófico del Cotopaxi II-A hace 4 500 años, la actividad en el volcán ha continuado de manera persistente hasta la actualidad. Todas las erupciones que han ocurrido desde entonces han sido de carácter andesítico (magmas andesíticos), siendo la excepción una pequeña erupción riolítica ocurrida hace 2 100 años *AP*. Todas estas erupciones han construido poco a poco una gran parte del edificio que observamos actualmente, conocido como “Cotopaxi II-B”. Especialmente, se nota que entre 4 060 y 1 195 años *AP* se produjeron grandes erupciones de coladas de lava que fluyeron sobre todo al norte, este y oeste del cono actual (Figs. 8 y 9).

En la *estratigrafía* del Cotopaxi II-B se puede reconocer al menos 18 ciclos eruptivos, los cuales comprenden más de 43 erupciones de magnitud moderada a grande ($VEI \geq 3$). Cada ciclo se caracteriza por un patrón de fenómenos eruptivos similares, los mismos que incluyen caídas *plinianas* de escoria o pómez, flujos piroclásticos de escoria o pómez, coladas de lava y extensos flujos de escombros (lahares) (Figs. 9 y 11).

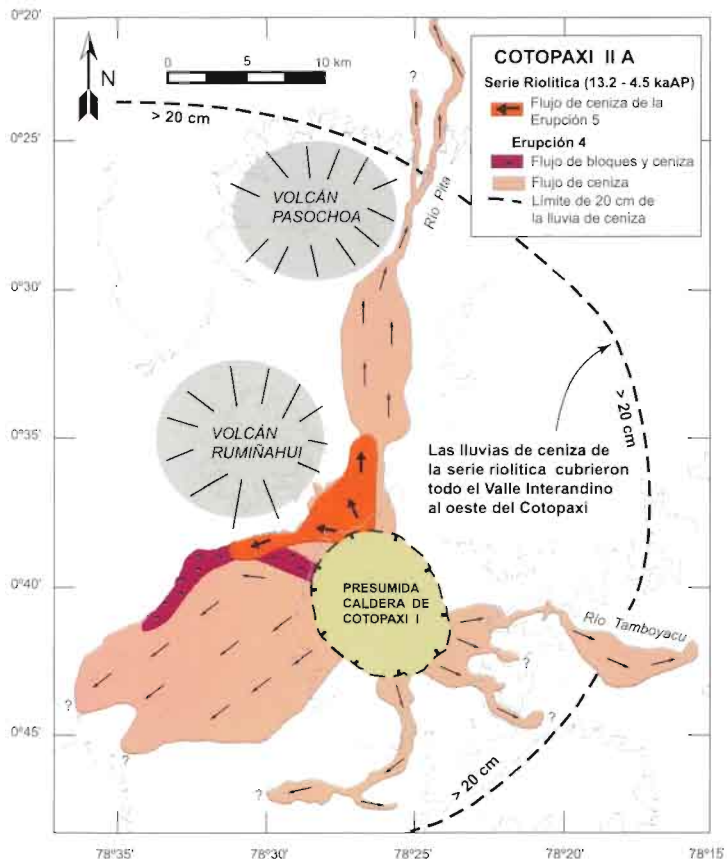


Figura 7. Mapa geológico simplificado de los depósitos riolíticos asociados a dos de las erupciones riolíticas ocurridas en el Cotopaxi II-A. Nótese la gran extensión que alcanzaron los flujos piroclásticos y las lluvias de ceniza de estas erupciones ocurridas entre 13 200 y 4 500 años AP (Modificado de Hall, *et al.*, 2005).

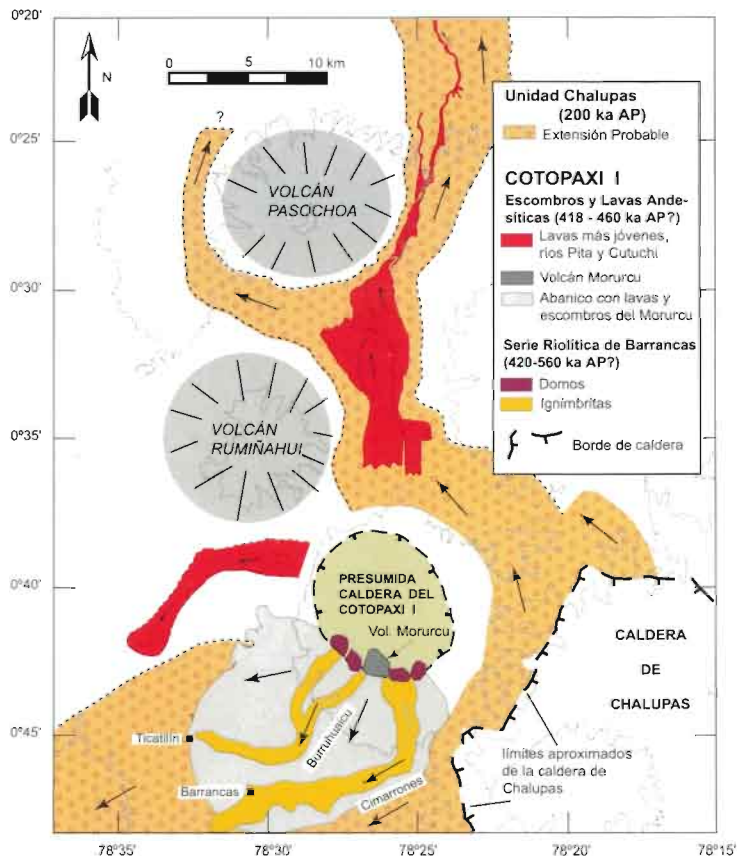


Figura 6. Mapa geológico simplificado de los depósitos riolíticos y andesíticos del Cotopaxi I. También se muestra el área aproximada cubierta por la ignimbrita de Chalupas. Con el fin de simplificar la visualización, no se incluye en este mapa a la Unidad Cangahua. (Modificado de Hall, *et al.*, 2005) ("ka" significa "miles de años"; 1 ka = 1 000 años).

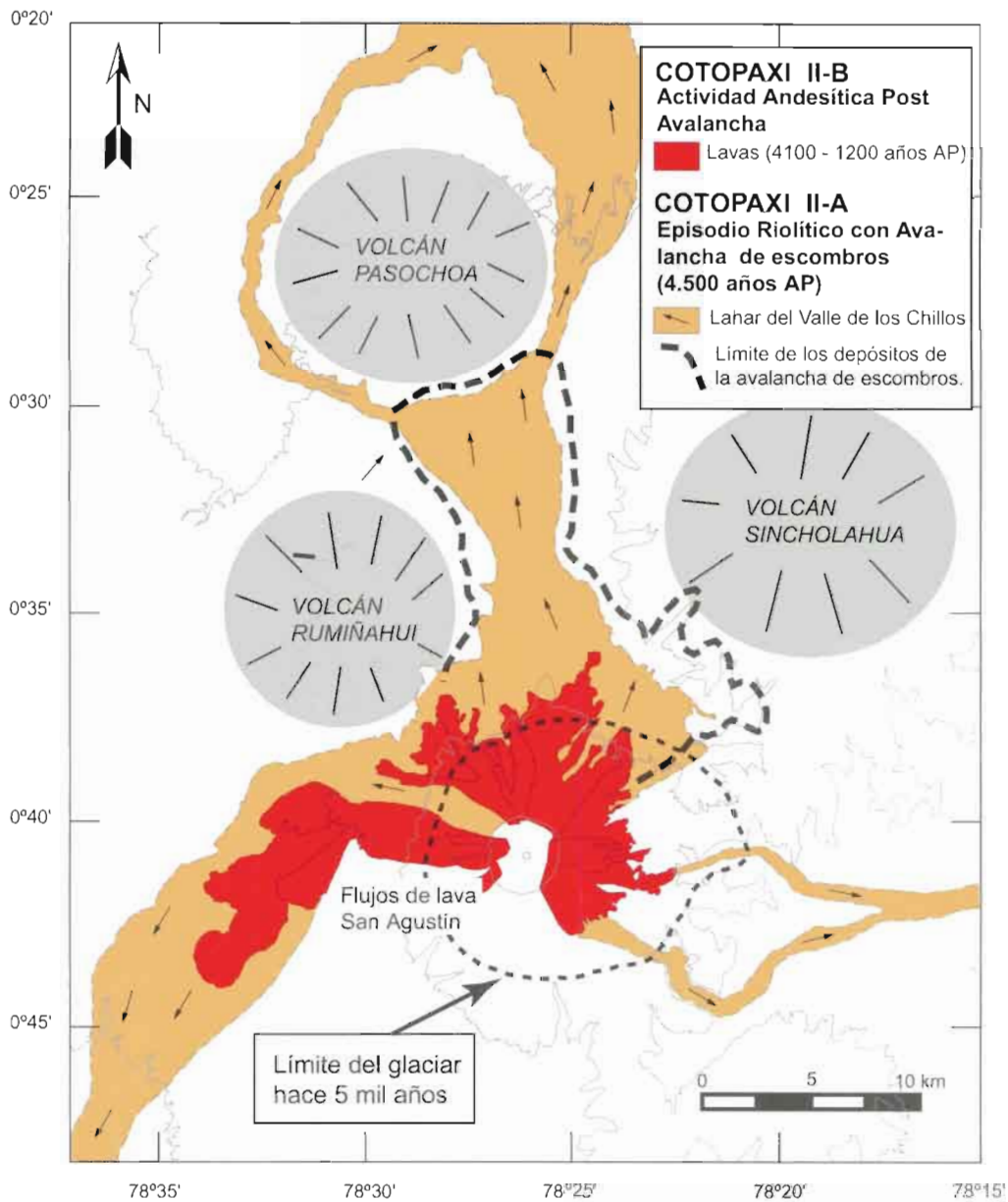


Figura 8. Mapa geológico simplificado de los depósitos asociados a la erupción ríolítica, colapso de flanco (avalancha de escombros) y lahar gigantesco (lahar del Valle de Los Chillos) ocurridos hace 4 500 años en el Cotopaxi II-A. Se muestra también los depósitos de las coladas de lava que ocurrieron entre 4 100 años AP y 1 200 años AP., cuando comenzó a construirse el Cotopaxi II-B (Modificado de Hall, et al., 2005).

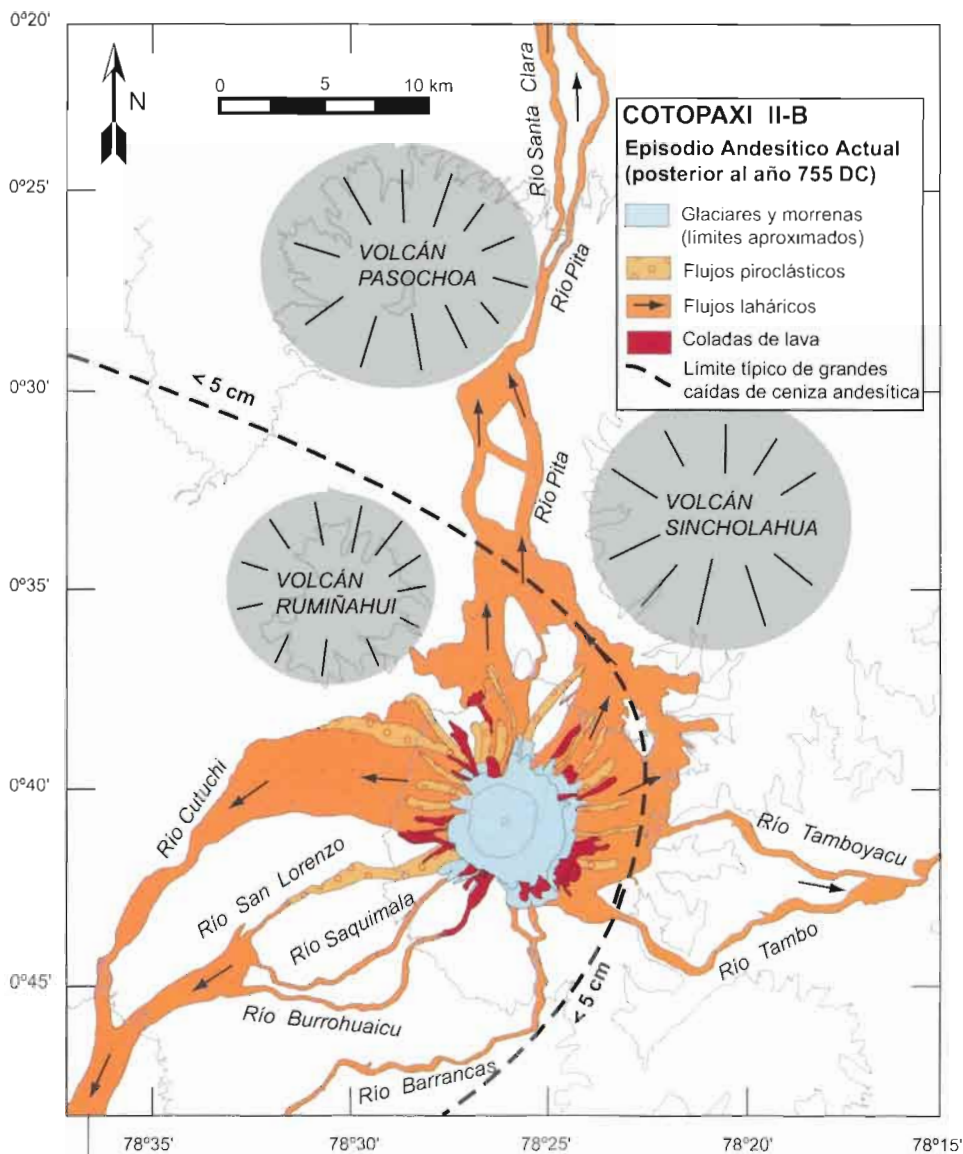


Figura 9. Mapa geológico simplificado de los depósitos asociados a las erupciones de los últimos 1200 años del Cotopaxi II-B (Modificado de Hall, *et al.*, 2005). Nótese el importante alcance y dispersión de las lluvias de ceniza y de los lahares, aunque en ningún caso son tan grandes como en las erupciones riolíticas del Cotopaxi II-A.

■ EL PERÍODO HISTÓRICO

Sin duda varias de las culturas pre-hispánicas del Ecuador fueron testigos de múltiples erupciones del Cotopaxi y probablemente tuvieron un conocimiento importante de su tipo de actividad y peligros asociados. Desafortunadamente, esos conocimientos no fueron registrados en lengua escrita y se han perdido con el tiempo. Solamente luego de la llegada de los españoles a tierras ecuatorianas, en 1532, empieza a describirse con cierto detalle la historia de las erupciones del Cotopaxi (Figs. 9 y 10, Anexos 3 y 4).

Así, se sabe que durante los últimos 500 años el Cotopaxi ha tenido ciclos eruptivos con un promedio de una vez por siglo, los mismos que ocurrieron en: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1854-1855 y 1877-1880. Sorprendentemente, el siglo XX no fue testigo de ninguna erupción importante de este volcán y ya se han cumplido 128 años desde la última gran erupción, ocurrida el 26 de junio de 1877. Del primer ciclo eruptivo histórico (1532-1534) se tiene pocos documentos que aporten detalles, sin embargo, parece claro que el volcán que estaba en erupción justamente a la llegada de los primeros conquistadores españoles a la serranía ecuatoriana fue el Cotopaxi. Del resto de erupciones históricas vamos a presentar breves descripciones a continuación.

Siglo XVIII

Aparentemente, luego de las erupciones de 1532-1534 el Cotopaxi entró en un período de tranquilidad que duró más de 200 años. Sin embargo, entre junio y diciembre de 1742 nuevamente ocurrieron erupciones explosivas que produjeron lluvias de ceniza e importantes lahares “que destruyeron puentes, casas, obrajes y haciendas, y arrebataron personas y ganados en número muy crecido” (Sodiño, 1877).

En 1743 y en la mayor parte de 1744, la actividad del volcán estuvo caracterizada principalmente por emisiones de ceniza y pequeñas explosiones. Pero en noviembre de 1744 nuevamente ocurrió un episodio eruptivo mayor con formación de flujos piroclásticos que derritieron partes del *glaciar* del volcán y provocaron lahares aun mayores que los de 1742 en los valles de Latacunga y Los Chillos.

Solamente dos décadas después, en febrero de 1766 y en abril de 1768, ocurrieron nuevas grandes erupciones del Cotopaxi. En ambos casos se volvieron a producir lahares por derretimiento del glaciar del volcán, pero además las lluvias de ceniza asociadas a las erupciones fueron tan extensas que llegaron incluso hasta Pasto (Colombia) (Egred, en prep.).

Siglo XIX

Luego de 1768 nuevamente se produjo un período de baja actividad volcánica de 86 años de duración, durante los cuales solamente parecen haber ocurrido esporádicamente algunas emisiones de ceniza y tal vez pequeñas explosiones. Sin embargo, en septiembre de 1853 hubo un importante incremento en la actividad que produjo caídas de ceniza y lahares destructivos en el río Cutuchi. “Aún en 12 y 13 de septiembre del año siguiente (1854) hubo en Quito lluvia de ceniza atribuida comúnmente al Cotopaxi por los bramidos sordos que la acompañaban y que parecían venir del cerro” (Fig. 10) (Sodiro, 1877).

La última gran erupción: 26 de junio de 1877

Desde principios de 1877, el Cotopaxi había empezado nuevamente a presentar emisiones de ceniza y explosiones de tamaño pequeño a moderado. Para junio del mismo año, la



Figura 10. “Cotopaxi”, óleo por Frederic E. Church (1862-1865). No hay duda que gran parte del paisaje representado por el pintor es ficticio, pero es muy probable que la parte de la composición correspondiente al volcán en actividad esté apegada a la realidad del siglo XIX.

actividad se había incrementado notablemente, tanto así que el día 26 se produjo una fase eruptiva de magnitud suficiente para formar flujos piroclásticos. Las descripciones de los hechos ocurridos en ese día, realizadas por Luis Sodiro (1877) y Teodoro Wolf (1878, ver Anexo 3), hablan de “derrames de lavas” que se desbordaron desde el cráter del Cotopaxi. Sin embargo, el fenómeno que ambos autores describen no corresponde a una “colada de lava”, sino más bien a “flujos piroclásticos”. Este tipo de confusión de términos es común en las descripciones antiguas, pero toda duda se despeja cuando existen descripciones detalladas de los fenómenos ocurridos y de sus depósitos, lo que es el caso en las reseñas de Sodiro y Wolf. Textualmente Wolf indicó que “la lava no se derramaba en una o algunas corrientes, sino igualmente en todo el perímetro del cráter, sobre el borde más bajo, así como sobre la cúspide más alta”. Wolf explica también que las “lavas” fueron derramadas en un intervalo de tiempo de entre 15-30 minutos, y enfatiza que el fenómeno tuvo lugar de forma vio-

lenta, con una gran ebullición de las masas ígneas desde el cráter que rápidamente cubrieron todo el cono del Cotopaxi. Estas descripciones no dejan duda alguna de que los fenómenos ocurridos fueron flujos piroclásticos (Figs. 11 y 16).

Sin embargo, para ambos autores, los fenómenos más remarcables de los sucedidos el 26 de junio de 1877 fueron los lahares (flujos de lodo y escombros) que ocurrieron en los ríos Pita, Cutuchi y Tamboyacu, sobre todo por la gran destrucción que provocaron a todo lo largo de los tres *drenajes* (Fig. 11). Ya en aquella época, ambos autores concluyeron que el origen de los lahares fue el súbito y extenso derretimiento que sufrió parte del glaciar del Cotopaxi al tomar contacto con los “derrames de lava” (flujos piroclásticos).

Las descripciones de los daños provocados por estos fenómenos son extensas y no serán incluidas aquí, si bien pueden ser consultadas con mayor detalle en el Anexo 3. Lo que vale resaltar es que, en la mayoría de los casos, los lahares fueron tan caudalosos que rebosaron fácilmente los cauces naturales de los ríos, provocando extensas inundaciones de lodo y destrucción en las zonas aledañas. Según Wolf, los lahares tuvieron velocidades tales que se tardaron algo más de media hora en llegar a Latacunga, poco menos de 1 hora en llegar al Valle de los Chillos, cerca de tres horas en llegar a la zona de Baños (Tungurahua) y cerca de 18 horas en llegar a la desembocadura del río Esmeraldas en el océano Pacífico. Asombroso, Sodiro escribió que los lahares fluían con gran ímpetu “sin que nada pudiese [...] oponer algún dique a su curso destructor, ni siquiera presentarle la más mínima resistencia”. Más adelante, en la sección “Fenómenos volcánicos observados en el Cotopaxi” volveremos a hablar sobre estos impresionantes fenómenos.

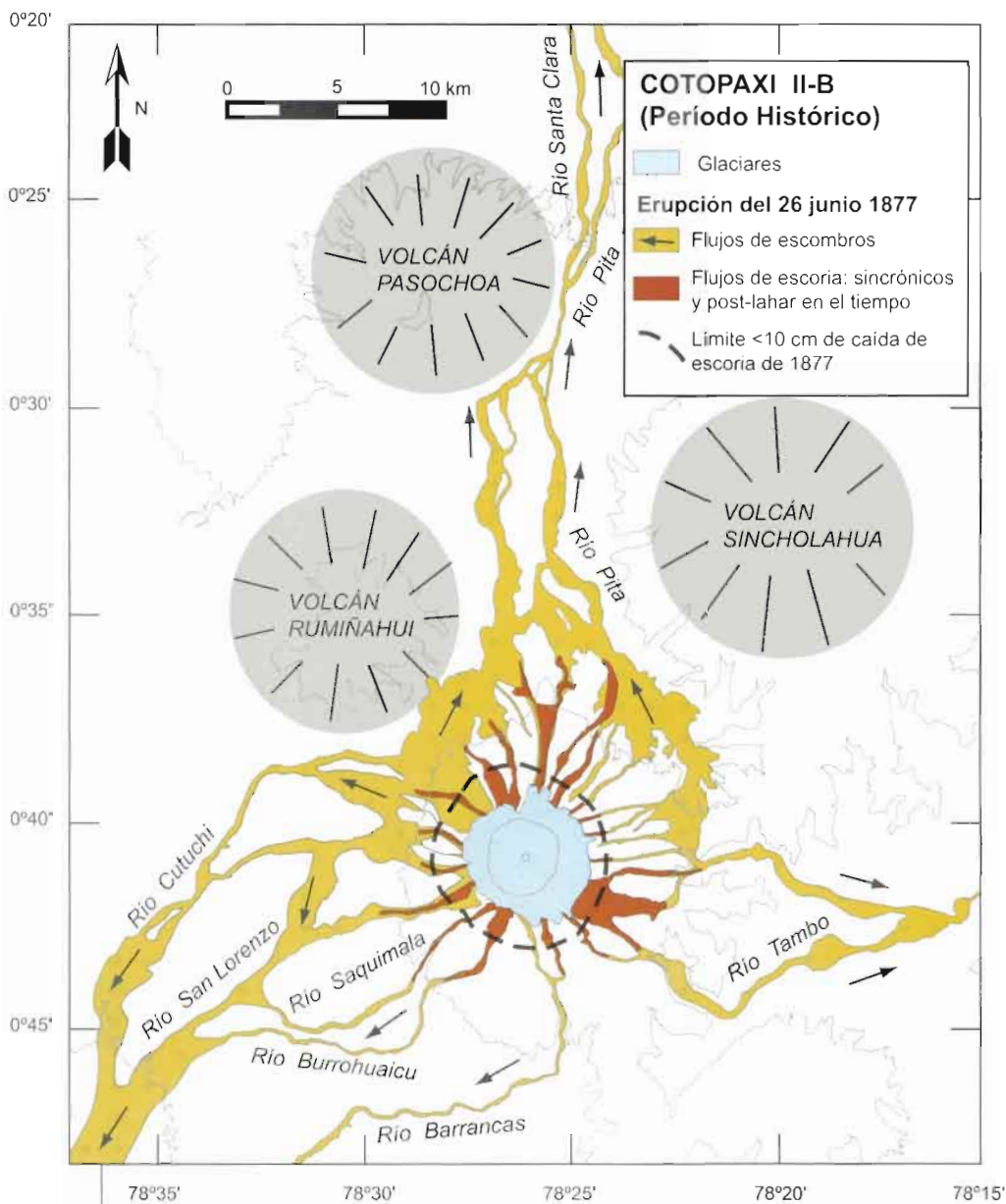


Figura 11. Mapa geológico de los depósitos asociados a la erupción del 26 de junio de 1877 (modificado de Hall, *et al.*, 2005). Si bien esta erupción fue de tamaño importante, no fue la más grande ocurrida en el Cotopaxi en tiempos históricos (luego del año 1532). Nótese la distribución de los principales fenómenos volcánicos: lluvias de ceniza, flujos piroclásticos y lahares.

Finalmente, como en todas sus erupciones, el Cotopaxi también se produjo una importante lluvia de ceniza el 26 de junio de 1877 (Fig. 11). Este fenómeno ocurrió principalmente en las zonas que se encuentran al occidente y nor-occidente del volcán, debido a la dirección predominante de los vientos. Una de las poblaciones más afectadas por la lluvia de ceniza ese día fue Machachi, donde se depositó una capa de casi 2 cm de espesor. En Quito la acumulación llegó a los 6 mm, siendo menor en Latacunga y ausente al sur de Ambato (Sodi-ro, 1877).

Más hacia el occidente, en las estribaciones de la Cordillera Occidental y en la Costa ecuatoriana, la caída de ceniza parece haber sido muy extensa y haber durado por varios días. Sodi-ro indica que conoció reportes de lluvias de ceniza ocurridas en las provincias de Manabí y Esmeraldas, mientras Wolf afirma que “en Guayaquil la lluvia [de ceniza] empezó el 26 de junio en el mañana y duró con breves interrupciones hasta el 1ero. de julio”. En todo caso, las acumulaciones de ceniza seguramente no superaron unos pocos milímetros de espesor sobre la zona costera del Ecuador. Sin embargo, vale recordar aquí que durante las erupciones del Guagua Pichincha en 1999 y del Reventador en 2002, las acumulaciones de ceniza en Quito no superaron los 3-4 mm de espesor, pero en ambos casos fueron suficientes para paralizar completamente la ciudad por varios días, provocando enormes pérdidas económicas. Lo mismo puede ser previsto para las zonas costeras del Ecuador en caso de ocurrir una gran erupción del Cotopaxi en el futuro.

La erupción del 26 de junio de 1877 puede ser considerada como la “erupción típica” del Cotopaxi en cuanto tiene que ver con los fenómenos volcánicos ocurridos. Sin embargo, los estudios geológicos y volcanológicos del Cotopaxi indican

claramente que este volcán es capaz de dar lugar a eventos de mucho mayor tamaño. Efectivamente, por ejemplo, en lugares como el Valle de los Chillos o Salcedo se puede apreciar que los lahares asociados a las erupciones de 1742 ó 1768 fueron de tamaño mayor a los de 1877 (Fig. 20). Asimismo, en los cortes de la carretera Panamericana, en el tramo entre El Boli-che y Lasso, se puede observar que las caídas de ceniza y pómez de muchas erupciones pasadas tienen espesores muy superiores al de la caída de ceniza de 1877 (Fig. 18). El propio Sodiro ya se había dado cuenta de esto y escribió en su relato de 1877: “Qué diferencia entre ésta y las grandes erupciones antiguas, algunas de las cuales han producido uno, dos y aún más metros de espesor [de caída de piroclastos]! De la presente no ha de quedar ningún indicio en la estratificación terrestre”. Esta afirmación de Sodiro resultó certera solo en cuanto a la caída de ceniza, cuyo rastro es difícil de encontrar actualmente en lugares situados a más de 10 km del cráter; pero no lo es en cuanto a los depósitos de los lahares de 1877, los cuales pueden ser observados con cierta facilidad en diversos puntos a todo lo largo de los ríos Pita, Cutuchi y Tamboyacu.

Luego de esta erupción, el Cotopaxi continuó con actividad moderada a leve por varios años. Los reportes escritos hablan principalmente de explosiones esporádicas y emisiones que provocaron algunas caídas leves de ceniza en diversos sectores del flanco occidental. Incluso, en un texto de mayo de 1914, se escribe que el Cotopaxi estaba “como de costumbre, con una columna de humo sobre el cráter”. El último reporte de actividad en el volcán corresponde a una posible explosión de pequeño tamaño ocurrida en febrero de 1942 (Egred, en prep.), si bien esta fecha no ha podido ser confirmada con toda certeza.

3. Tipos de fenómenos volcánicos ocurridos en el volcán Cotopaxi

A continuación pasamos a describir con detalle los diferentes tipos de fenómenos volcánicos que pueden tener lugar durante una erupción del volcán Cotopaxi. Los fenómenos son presentados en orden de peligrosidad, desde el más inofensivo hasta el que más daños causaría en caso de ocurrir en el futuro próximo. Si el lector quisiera obtener mayores detalles sobre **las zonas de peligro** asociadas a cada fenómeno de los presentados aquí, se le recomienda consultar las nuevas ediciones de los Mapas de Peligros Volcánicos de las Zonas Norte y Sur del Cotopaxi, publicados por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (Hall, *et al.*, 2004a y 2004b).

■ SISMOS VOLCÁNICOS

La gran mayoría de volcanes casi siempre presentan actividad sísmica, aun cuando se encuentren “dormidos” o en períodos de calma. Esta actividad sísmica suele estar representada por la ocurrencia de unos pocos sismos diarios, que pueden ser solamente detectados mediante una red de sismógrafos instalada en el volcán. Sin embargo, en las semanas o meses que preceden a una erupción y durante la misma, normalmente ocurre un importante aumento en el número y tipo de *sismos* localizados en las cercanías o bajo el cono del volcán. Solamente en ocasiones excepcionales estos sismos son sentidos por la población que habita cerca del volcán.

La actividad sísmica, lejos de afectar a los pobladores que habitan en las cercanías, resulta relativamente beneficiosa para la comunidad pues permite a los científicos comprender mejor los procesos que ocurren al interior del volcán y anticiparse a la ocurrencia de una erupción (Fig. 12). En general, la reactivación de un volcán casi siempre está precedida y acompañada por un importante aumento en el número de *sismos*, aunque por su magnitud no son capaces de afectar las edificaciones en los alrededores del volcán.

Peligros: En las erupciones pasadas del Cotopaxi, ha sido común que las personas que habitan en las cercanías sientan algunos de estos *sismos*, especialmente poco antes o durante los períodos de erupción; sin embargo, en ninguna ocasión conocida estos eventos provocaron daños importantes a las edificaciones.

■ GASES VOLCÁNICOS

Antes, durante y después de una erupción volcánica es común detectar un notable aumento en la cantidad y tipo de gases emitidos por un volcán. Tales gases son de origen magmático y consisten principalmente de vapor de agua; sin embargo, siempre existen también cantidades variables de otros gases que pueden resultar peligrosos para los seres vivos, tales como SO₂ (dióxido de azufre), HCl (ácido clorhídrico), CO₂ (dióxido de carbono), o CO (monóxido de carbono). En las zonas donde soplan continuamente vientos fuertes, estos gases se dispersan y diluyen rápidamente; no obstante, en depresiones y partes bajas con poco viento, estos gases se pueden acumular y alcanzar concentraciones letales. Por otro lado, existen también gases tóxicos como el ácido fluorhídrico (HF) y el azufre (S₂) que se adhieren a la ceniza y producen la contaminación del suelo y las aguas. Adicionalmente, los gases de una

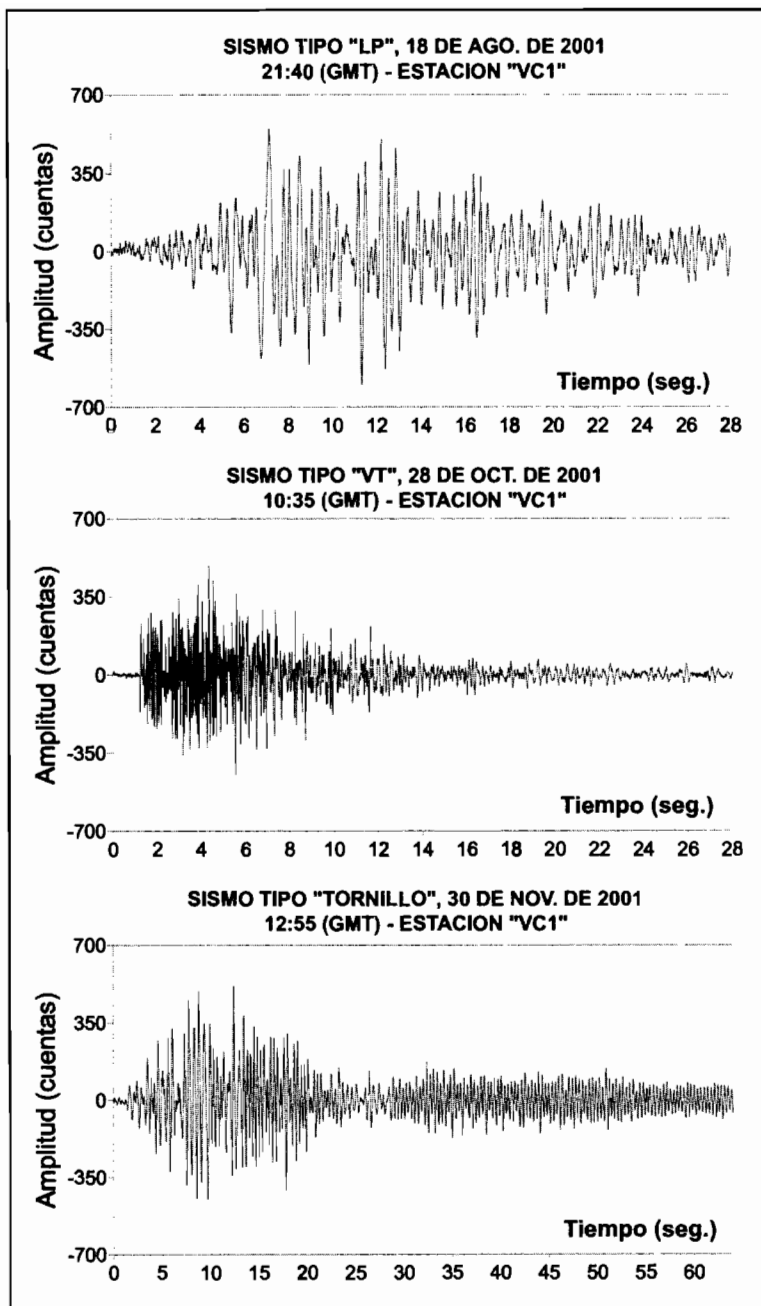


Figura 12. Algunos tipos comunes de sismos volcánicos registrados en el Cotopaxi mediante la red de sismógrafos del Instituto Geofísico-EPN (ver también, Capítulo 4, Figs. 23 y 34).

columna eruptiva pueden mezclarse con el agua atmosférica provocando *lluvias ácidas* que podrían afectar a las plantas y animales, así como a los techos de zinc y otros materiales metálicos que pueden sufrir una fuerte corrosión.

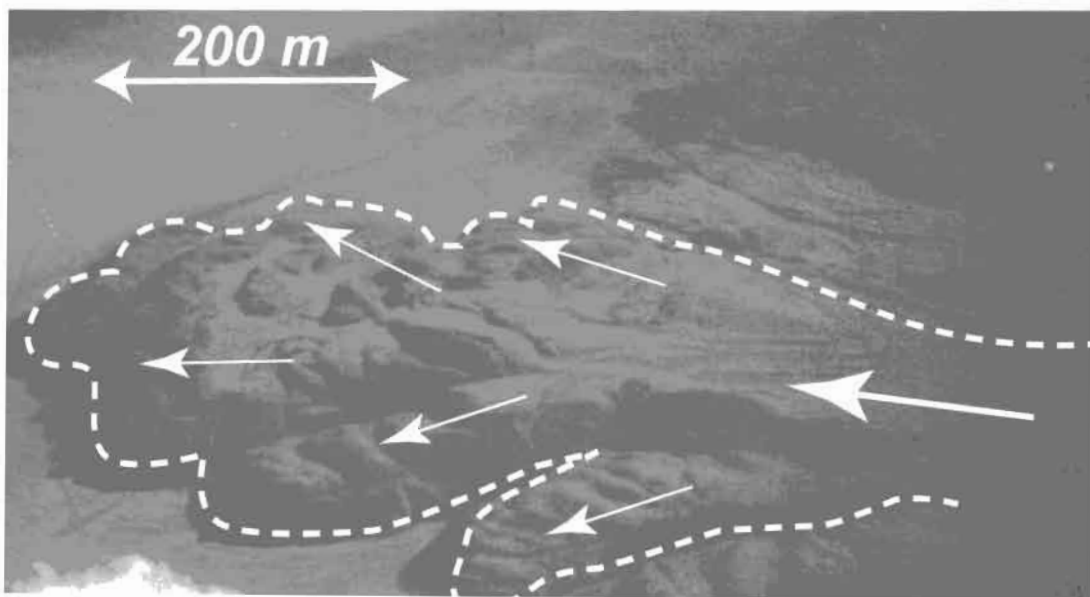
En las descripciones de las erupciones históricas del Cotopaxi casi nunca se hace mención de los efectos provocados por los gases volcánicos. Esto no quiere decir que no hubo emisión de gases, sino que seguramente sus efectos fueron bastante menores comparados con los de otros fenómenos volcánicos. También influye la gran altura a la que se encuentra el cráter del Cotopaxi y que la población que habita permanentemente en las cercanías del volcán siempre ha sido muy reducida como para haber reportado noticias sobre la presencia o efectos de los gases volcánicos. Lo mismo puede decirse de zonas distantes al volcán, sobre todo en la cordillera Occidental, donde seguramente ha habido una fuerte presencia de gases volcánicos en erupciones pasadas, pero pocos testigos para describirlo. Sin embargo, recordemos el caso de la ciudad de Quito durante la erupción del Reventador en noviembre de 2002, cuando los gases emanados por el volcán tuvieron un importante impacto sobre la ciudad.

Peligros: El contacto directo con altas concentraciones de gases volcánicos puede provocar irritación en los ojos, boca y nariz de hombres y animales, así como la destrucción de la vegetación. Especialmente, ciertos gases volcánicos pueden reaccionar con el agua de la atmósfera para formar compuestos ácidos, lo cuales dan lugar a la ocurrencia de lluvias ácidas altamente corrosivas (por ejemplo el dióxido de azufre reacciona con el agua para formar ácido sulfúrico). Las lluvias ácidas pueden provocar serios problemas a la agricultura y a la ganadería, así como contaminar fuentes de agua potable en zonas extensas.

■ FLUJOS DE LAVA

Definición: Se los conoce también con el nombre de “coladas o derrames de lava”. La lava es roca fundida, es decir, roca en estado líquido, que es derramada desde un cráter o desde una fisura de un volcán y que fluye de forma similar a un líquido por los flancos y quebradas. Para que una lava como las del Cotopaxi (o en general de la mayoría de volcanes ecuatorianos) se encuentre en estado líquido es necesario que tenga una temperatura muy elevada, por lo general superior a 900 °C, y para que pueda fluir es necesario que su *viscosidad* sea relativamente baja. La capacidad de fluir de una lava es más típica cuando los *magmas* son *andesíticos* o *basálticos*. De todas maneras, las velocidades que alcanzan las coladas de lava no son importantes y generalmente no superan los pocos kilómetros por hora (caso de los basaltos) o las decenas de metros por hora (caso de las andesitas), lo que indica que

■ **Figura 13.** Fotografía aérea de una colada de lava que descendió por el flanco nor-occidental del Cotopaxi hasta la zona de Limpiopungu. Esta colada fluyó solamente por ~7 km desde el cráter del volcán hasta detenerse a la base del cono. (Foto: M. Hall).



este tipo de líquido fluye con mucha dificultad. El resultado de esto es que, una vez quietos, los flujos de lava están conformados por roca maciza y tienen un aspecto similar a unas enormes gotas de cera congelada (Fig. 13); sin embargo, hay que mencionar que el interior de un flujo de lava puede permanecer caliente (200-300 °C) por varios meses y aún años después de haberse detenido. Los flujos de lava ocurren preferentemente durante fases eruptivas poco explosivas, cuando el magma tiene un bajo contenido de gases.

Historia: Las coladas de lava han sido, sin duda, fenómenos bastante comunes en la evolución geológica del Cotopaxi, en las épocas históricas y sobre todo en las pre-históricas. De hecho, la sucesiva acumulación y apilamiento de coladas de lava intercaladas con caídas de *escoria* y *pómez* es lo que ha construido poco a poco el cono del Cotopaxi a lo largo de su historia. El último flujo de lava ocurrido en el Cotopaxi corresponde a una fase eruptiva de 1853, cuando se registró una colada que descendió por el flanco oriental. Todos los flujos de lava que se han producido en el Cotopaxi en los últimos 4 000 años tienen composición *andesítica* y solamente han viajado por 6-8 km hasta los pies del volcán antes de detenerse y enfriarse, aunque hay unos pocos que han recorrido hasta 16 km, por ejemplo el flujo de San Agustín, que fluyó hacia el occidente del cono actual (Fig. 8).

Peligros: Una lava que hubiere llenado el *cráter* del Cotopaxi y que empiece a derramarse por sus bordes, lo hará por las partes más bajas del mismo. Es así que se puede prever que los flancos orientales y occidentales del Cotopaxi podrían ser afectados por estos fenómenos, mientras que su ocurrencia hacia los flancos norte o sur es mucho menos probable, a no ser que sucedan a través de fracturas y no desde el cráter (Fig. 14). Una vez fuera del cráter, una colada de lava podría

provocar fácilmente la fusión de partes del *glaciar* del volcán, sin embargo, dada su baja velocidad y limitada extensión, la fusión del glaciar sería un proceso lento y poco eficaz. Los estudios teóricos han demostrado que, a pesar del evidente contraste de temperaturas entre la lava y el hielo, la superficie de contacto entre ambos materiales es muy limitada, lo que resulta en una deficiente transferencia de calor, que se traduce en una fusión “lenta” y limitada del glaciar, que seguramente no daría lugar a la formación de lahares grandes. Por el contrario, cuando una colada de lava se encuentra en los flancos altos del volcán, su parte frontal puede solidificarse, volverse inestable y derrumbarse bajo la acción de la gravedad, formando un tipo especial de *flujo piroclástico* conocido como “flujo de bloques y ceniza”, el mismo que sí sería capaz de provocar una disrupción y fusión más extensa del glaciar.

■ DOMOS DE LAVA

Definición: Los domos se forman cuando el magma tiene una *viscosidad* tan alta que casi no puede fluir al llegar a superficie, y más bien empieza a aglutinarse y enfriarse lentamente sobre el cráter o fractura por donde está saliendo. Este comportamiento es más típico de los magmas *dacíticos* y *riolíticos*, como fue el caso del volcán Guagua Pichincha en 1999. La formación de un domo de lava implica una gran acumulación de rocas calientes en una superficie relativamente pequeña. Es por esto que generalmente los domos son estructuras poco estables y tienden a derrumbarse fácilmente bajo el efecto de la gravedad. El resultado de tales derrumbes puede ser la formación de un tipo especial de *flujo piroclástico* de “bloques y ceniza”, cuya temperatura puede ser bastante alta (300-500 °C) y que puede estar acompañado de explosiones volcánicas de tamaño variable.

Historia: Como hemos visto (ver Capítulo 2), en los últimos 4 000 años la actividad del Cotopaxi ha estado caracterizada principalmente por la erupción de magmas *andesíticos* y por lo tanto no se ha observado la presencia o formación de domos de lava. Sin embargo, vale recordar que durante la actividad del Cotopaxi I, hace ~500 ka AP, la formación de domos de lava fue un fenómeno común ya que los magmas fueron *riolíticos* (Fig. 6). En ciertos depósitos antiguos se puede observar que algunas erupciones provocaron fuertes explosiones de domos, que proyectaron fragmentos de roca hasta a 10 km de distancia.

Peligros: En caso de formarse un domo sobre el cráter del Cotopaxi, cualquier flanco podría ser afectado por un flujo piroclástico de “bloques y ceniza” (Fig. 14), que podría provocar una fusión importante del glaciar y formar lahares de tamaño considerable. De todas maneras, por lo que se conoce sobre la historia del Cotopaxi de los últimos 4 000 años, la formación de domos de lava es un fenómeno poco probable.

■ FLUJOS PIROCLÁSTICOS (nubes ardientes)

Definición: Los flujos piroclásticos son mezclas muy calientes (frecuentemente de temperatura mayor a 500 °C) de gases, ceniza y fragmentos de roca, que descienden desde el cráter en forma de avalancha por los flancos del volcán, desplazándose a grandes velocidades (a veces > 200 kilómetros por hora) y que ocurren generalmente de forma súbita e impredecible durante fases eruptivas fuertes y explosivas. Es por esto que también se las conoce con el nombre de *nubes ardientes*. Los flujos piroclásticos constan de dos partes; un componente inferior, más denso, constituido por ceniza, frag-

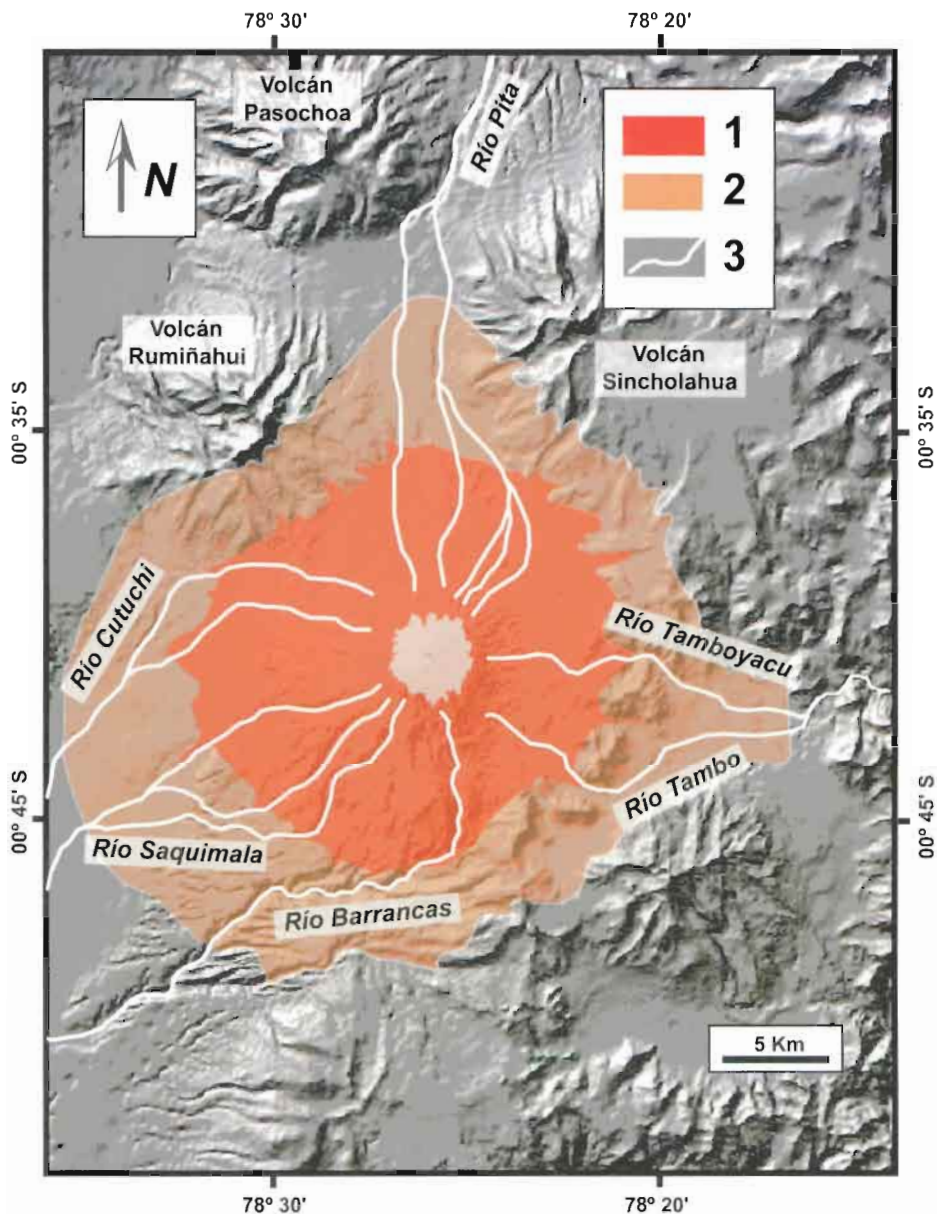


Figura 14. Mapa de peligros simplificado en el que se muestra las zonas del Coto-paxi que podrían ser afectadas en caso de producirse flujos de lava, flujos piroclásticos o lahares secundarios. 1) Zona potencialmente afectada por flujos piroclásticos y/o coladas de lava en caso de una erupción grande, como la de 1877 (Escenario III, ver Capítulo 5); 2) Zona potencialmente afectada por flujos piroclásticos y/o coladas de lava en caso de una erupción muy grande (Escenario IV, ver Capítulo 5); 3) Algunos de los ríos más importantes en donde podrían ocurrir lahares secundarios. (Escenarios I y II, ver Capítulo 5) (modificado de Hall, *et al.*, 2004a y 2004b).

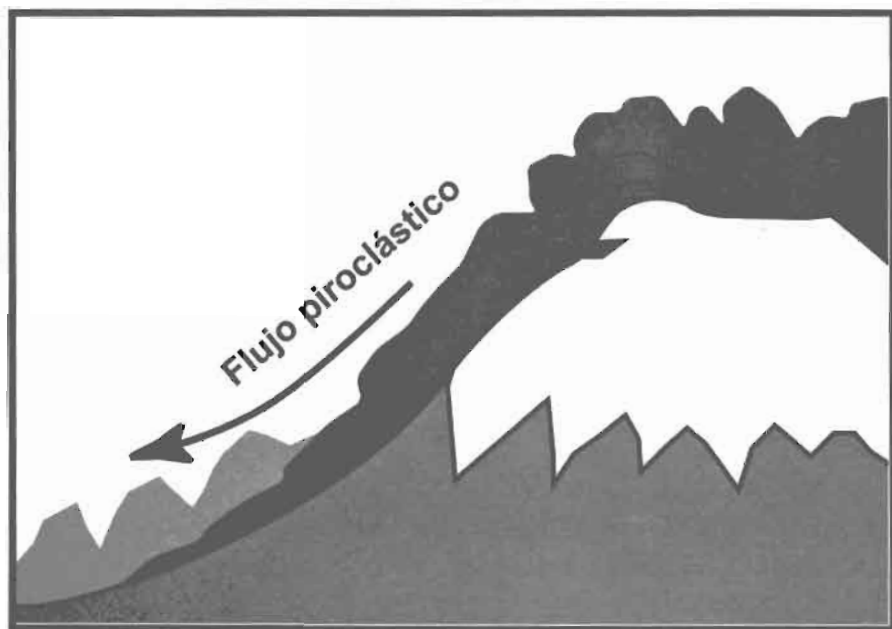


Figura 15. Arriba: fotografía de flujos piroclásticos descendiendo por los flancos del volcán Mayón (Filipinas) durante una erupción en septiembre de 1984. Abajo: esquema del aspecto de los flujos piroclásticos descendiendo sobre los flancos del Cotopaxi. (Foto cortesía de C. Newhall, USGS).

mentos de roca y bloques de escoria, que se desplaza por el fondo de los valles y quebradas; y, un componente superior, mucho menos denso pero más voluminoso, constituido mayormente por ceniza volcánica y gases calientes, que se desplaza por sobre el componente inferior, pudiendo salir de los valles y sobrepasar relieves importantes (Fig. 15).

Historia: Los flujos piroclásticos siempre han sido fenómenos muy comunes en las erupciones del Cotopaxi; se los reconoce fácilmente por el sinnúmero de grandes bloques redondos de escoria negra que contienen sus depósitos (Fig. 16). Los estudios geológicos detallados (Hall, *et al.*, 2005) muestran que estos fenómenos han ocurrido en prácticamente todos los ciclos eruptivos de los últimos 2000 años. En cambio, en la historia escrita los reportes de flujos piroclásticos no son explícitos a excepción del caso de la erupción del 26 de junio de 1877 (Sodiro, 1877 y Wolf, 1878). Sin embargo, se puede reconocer la ocurrencia de estos fenómenos durante las erupciones de 1742, 1744, 1766 y 1768 por los depósitos observados en las cercanías del volcán, y debido a que en los cuatro casos se produjeron lahares de gran tamaño que descendieron por los ríos Cutuchi y Pita.

Peligros: En el caso del Cotopaxi (Hall, *et al.*, 2005), los flujos piroclásticos se originan de tres formas principales: 1) por el desborde de material piroclástico sobre el borde del *cráter* (proceso conocido como “boiling over”, ocurrido en 1877); 2) por el colapso de una *columna eruptiva* que sea mucho más densa que la atmósfera y que empiece a caer por su propio peso; y, 3) por el colapso del frente de una colada de lava derramada sobre los flancos del cono, o de un *domo* de lava formado sobre el cráter (ver “Flujos y Domos de Lava” más arriba). Los flujos piroclásticos producidos por los dos primeros mecanismos podrían afectar varios flancos del vol-



Figura 16. Fotografía del depósito dejado por un flujo piroclástico ocurrido en el flanco nor-oriental del Cotopaxi, luego de la erupción del 26 de junio de 1877. Nótese la forma alargada del depósito y que, en el Cotopaxi, uno de los componentes principales de estos flujos son bloques de escoria negra de diversos tamaños. La flecha indica el sentido de movimiento del flujo al momento de depositarse. (Foto: P. Mothes).

cán simultáneamente (Fig. 15), mientras que los producidos por el derrumbe de un flujo o domo de lava, afectarían los flancos inmediatamente inferiores a dicho domo o flujo de lava, siendo en general los flancos oriental y occidental los más propensos a ser afectados por estos fenómenos (Fig. 14).

En las erupciones *andesíticas* de los últimos 4 000 años, con $VEI= 2-4,5$, los flujos piroclásticos han recorrido distancias de entre 4 y 9 km desde el cráter, si bien durante algunas erupciones de este período y otras más antiguas (con $VEI > 4,5$) han alcanzado distancias mayores a 20 km. Así, en el caso del Cotopaxi los flujos piroclásticos representan peligros menores, pues la gran mayoría de las zonas pobladas se encuentran fuera de su alcance. Sin embargo, zonas como el Refugio, Tambopaxi, Mudadero, Limpiopungo y el Campamento Mariscal Sucre (Fig. 3), que cuentan con importantes poblaciones flotantes de turistas, se encuentran efectivamente dentro del área que podría ser alcanzada por los flujos piroclásticos (Fig. 14). Debido a que es casi imposible predecir su ocurrencia y a que la probabilidad de sobrevivir al impacto directo de un flujo piroclástico es nula, es necesario, en caso de una erupción inminente, la evacuación de las zonas potencialmente afectadas.

Sin duda, la mayor consecuencia que tendría un flujo piroclástico es el producir la fusión casi instantánea de grandes sectores del glaciar del Cotopaxi. Efectivamente, debido a su alta temperatura, gran movilidad y volumen, los flujos piroclásticos son capaces de derretir de forma muy eficiente grandes superficies de hielo y nieve dando lugar a la formación de enormes volúmenes de agua en pocos minutos. Este es el único medio de producir volúmenes de agua suficientes para formar lahares primarios como los descritos por Sodiro y por Wolf en 1877 (ver Anexo 3).

■ LLUVIA DE CENIZA Y PIROCLASTOS

Definición: Durante las explosiones volcánicas, los gases y el material piroclástico (*ceniza*, fragmentos de roca y *piedra pómez*) son expulsados desde el cráter. Los fragmentos de roca más grandes y densos siguen trayectorias *balísticas* y caen cerca del cráter, y en las partes altas del volcán; estos fragmentos son conocidos como *bombas volcánicas* (Fig. 17). En cambio, las partículas más pequeñas suben mayores alturas, donde son acarreadas por el viento y finalmente caen a mayor distancia del cráter; estas partículas son conocidas como *ceniza volcánica* o *lapilli* (Figs. 17 y 18). Al caer, el material piroclástico (bombas y lapilli) puede cubrir grandes áreas cercanas al volcán con una capa de varios centímetros o decímetros de espesor. Las erupciones que producen *piroclastos* varían desde explosiones pequeñas que expulsan el material hasta pocos kilómetros de altura sobre el cráter y duran pocos minutos, hasta grandes explosiones que pueden durar decenas de minutos hasta varias horas y que lanzan material *piroclástico* hasta varias decenas de kilómetros de altura.

Historia: Las caídas o lluvias de piroclastos siempre han sido fenómenos muy comunes en las erupciones del Cotopaxi y, al igual que los flujos piroclásticos, han estado presentes en todos los ciclos eruptivos de los últimos 2 000 años (Fig. 18). En los reportes históricos escritos se mencionan los “nubarrones de humo y ceniza” y las “columnas de fuego y lava” saliendo del cráter del volcán, que luego dieron lugar a lluvias de ceniza en extensas zonas al occidente y norte del volcán. Estas caídas de ceniza provocaron grandes pérdidas para la agricultura y ganadería, así como la destrucción de ciertas edificaciones antiguas que no soportaron su peso.

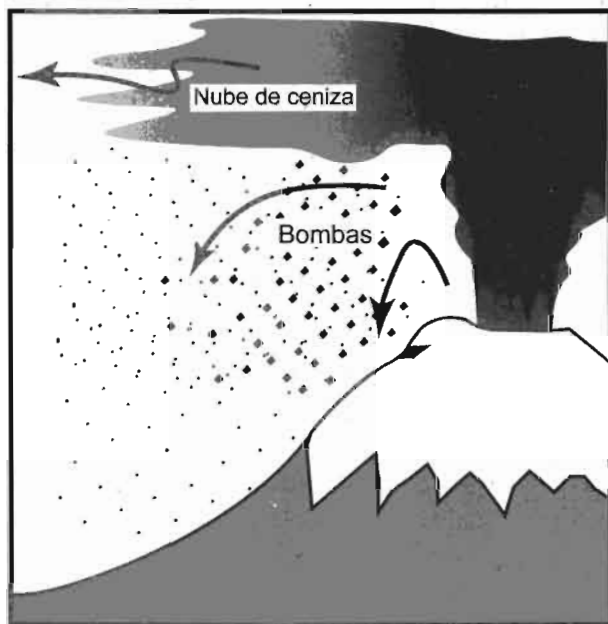


Figura 17. Arriba: fotografía de una explosión volcánica en el volcán Tungurahua en 2004. Abajo: esquema de una explosión volcánica, con bombas volcánicas y una columna de ceniza saliendo del cráter del Coto-paxi. (Foto: J-L Le Penneç).

La extensión que alcanzan las caídas de ceniza asociadas a las erupciones del Cotopaxi puede llegar a ser muy importante. Recordemos que Sodiro (1877) anotó que luego de la erupción de 1877, en Quito se depositó una capa de ceniza de 6 mm de espesor, es decir, más del doble de lo que cayó durante las últimas erupciones del Guagua Pichincha en octu-

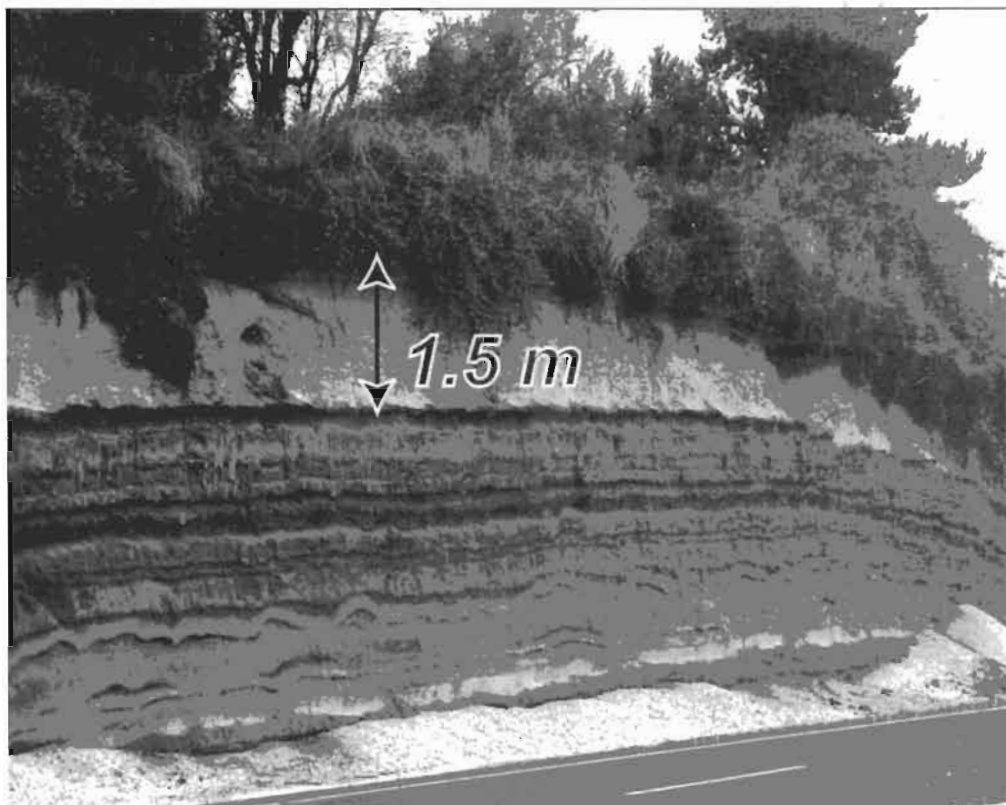


Figura 18. Capas de lapilli (fragmentos de escoria, pómez y ceniza), correspondientes a lluvias de ceniza y piroclastos de diferentes erupciones del Cotopaxi (carretera Panamericana, entre El Boliche y Lasso). La capa más gruesa, de color blanquecino, corresponde a una erupción muy grande ocurrida hace aproximadamente 1 000 años. En esta zona, la capa de ceniza correspondiente a la erupción del 26 de junio de 1877 es muy pequeña y no se aprecia en la imagen ya que está cubierta por la vegetación (Foto: P. Mothes).

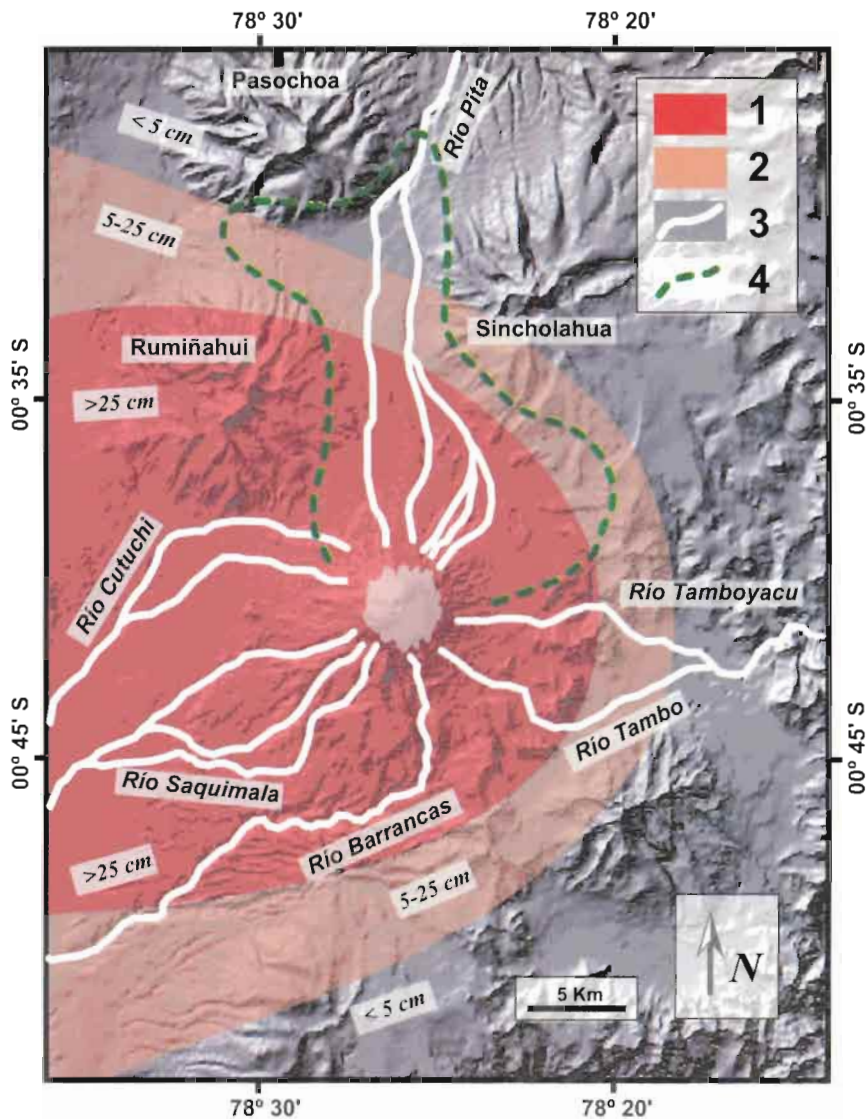


Figura 19. Mapa de peligros simplificado en el que se muestra las zonas del Cotopaxi que podrían ser afectadas por lluvias de ceniza y piroclastos, lahares primarios y avalanchas de escombros. 1) Zona que sería afectada por una lluvia de escoria y ceniza de más de 25 cm de espesor en caso de una erupción igual o mayor que la de 1877 (Escenario III, capítulo 5); 2) Zona que sería afectada por una lluvia de ceniza y piroclastos de entre 5 y 25 cm de espesor en caso de una erupción igual o mayor que la de 1877; por fuera de esta zona la capa de caída de ceniza tendría siempre un espesor menor a 5 cm; 3) Principales ríos donde ocurrirían lahares primarios en caso de una erupción como la de 1877 (para obtener más detalles sobre las zonas amenazadas por lahares primarios se recomienda consultar los Mapas de Peligros Volcánicos Potenciales del Cotopaxi, Zonas Norte y Sur, publicados por el Instituto Geofísico - EPN); 4) Zona que fue cubierta por el depósito de la avalancha de escombros ocurrida hace 4 500 años. (Modificado de Hall *et al.*, 2004a y 2004b). Las zonas 1) y 2) pueden variar substancialmente dependiendo de la dirección del viento al momento de la erupción.

bre-diciembre de 1999. Otros relatos indican que, por ejemplo, en la erupción de abril de 1768 hubo caídas de ceniza notorias inclusive en la zona de Pasto (Colombia) a más de 400 km al norte del volcán, mientras que Wolf (1878) relata que durante la erupción de junio de 1877 hubo caídas de ceniza en las actuales provincias de Guayas, Manabí y Esmeraldas.

Peligros: Las lluvias de ceniza y material piroclástico se depositan sobre la superficie terrestre formando una elipse que puede extenderse por cientos de kilómetros en la dirección del viento, y cuyo espesor disminuye progresivamente desde el volcán (Figs. 9 y 19). Así, la peligrosidad de este fenómeno estará controlada por el volumen de material emitido, la intensidad y duración de la erupción, la dirección y la velocidad del viento y la distancia al volcán.

En el Cotopaxi las mayores lluvias de ceniza se han producido normalmente en las zonas occidentales del volcán, debido a la dirección predominante de los vientos desde el este. En la Figura 19 se presentan las zonas que tienen mayor probabilidad de ser afectadas por las caídas de piroclastos en caso de que ocurra una erupción importante del Cotopaxi ($VEI \geq 4$). La curva interna (marcada “25 cm”, Fig. 18) encierra el área que podría recibir un espesor superior a 25 cm de ceniza. La curva externa (marcada “5 cm”, Fig. 18) encierra el área que podría recibir un espesor superior a 5 cm y máximo de 25 cm de ceniza. La parte exterior a la curva externa recibiría un espesor menor a 5 cm.

El impacto de una lluvia de ceniza y piroclastos depende principalmente del espesor de material acumulado. La afectación sobre la población y la agricultura empieza a hacerse presente con espesores pequeños, menores a 1 mm de ceniza y se incrementa sustancialmente si la ceniza se mezcla con agua ya que el peso acumulado aumenta notablemente. Los

efectos negativos producidos por las lluvias de ceniza incluyen problemas de salud (irritación de los ojos y de las vías respiratorias), problemas con el ganado, destrucción de plantaciones, daños a los motores (vehículos, aviones, maquinarias en general, transformadores, etc.), contaminación de fuentes y reservorios de agua, y, en caso de caídas fuertes, problemas de visibilidad, riesgos de colapso de los techos, etc. Todos estos efectos, descritos de manera progresiva desde espesores menores a 1 mm hasta mayores a 30 cm están resumidos en el Anexo 1.

■ FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS (LAHARES)

Definición: Los lahares son mezclas de materiales volcánicos (rocas, piedra pómez, arena) con agua proveniente de la fusión de un casquete *glaciar*, de la ruptura de un lago ubicado en un *cráter* o de fuertes lluvias. Estos flujos se mueven ladera abajo por la fuerza de la gravedad, a grandes velocidades (hasta 100 km/h) y siguiendo los drenajes naturales, de manera similar a un gran río de lodo y escombros. El tipo de material movilizado por estos flujos es muy variable pudiendo ser desde arcilla o arena hasta bloques de varios metros de diámetro. Una vez formados, los lahares viajan por todo lo largo de los drenajes que los conducen, provocando mayores o menores daños según su volumen y velocidad, dado que se comportan de forma similar a una crecida de río o a un aluvión.

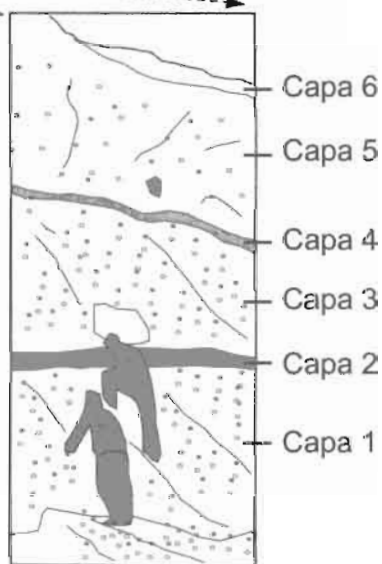
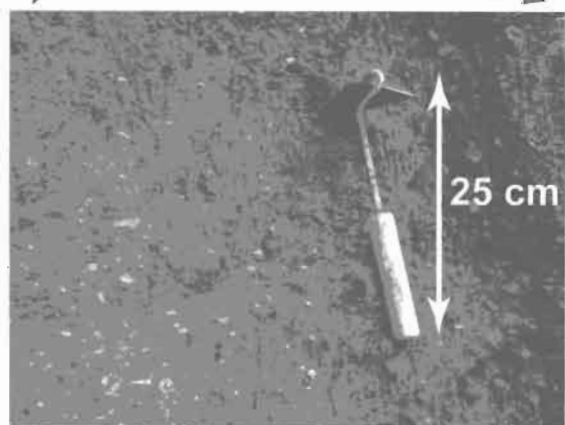
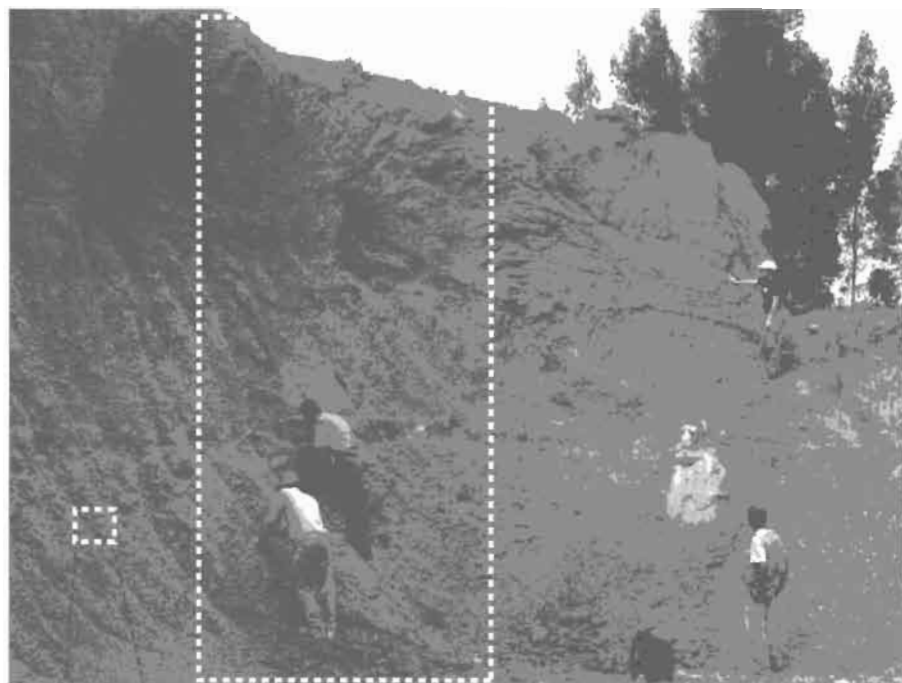
En el caso del Cotopaxi, los lahares se pueden formar por dos mecanismos principales. En primer lugar, los lahares más voluminosos y destructivos se forman cuando *flujos piroclásticos* desbordados desde el *cráter* provocan la fusión violenta de la nieve y el hielo en grandes sectores del casquete *glaciar* del volcán; este tipo de flujos se conocen como **lahares pri-**

marios. En segundo lugar, lahares de tamaños más modestos y en general con menor alcance lateral y longitudinal se forman cuando las cenizas y piroclastos depositados por la erupción son removilizados por fuertes lluvias ocurridas en el volcán; este tipo de flujos se conocen como **lahares secundarios**. Inclusive si la acumulación de ceniza nueva es suficiente, lahares secundarios pueden ocurrir en zonas distantes del volcán. La gravedad y el efecto de arrastre de las lluvias tienden a removilizar las cenizas depositadas para formar lahares secundarios pequeños.

Historia: Los lahares primarios y secundarios han sido fenómenos muy comunes durante las erupciones del Cotopaxi. Los estudios geológicos detallados (Hall, *et al.*, 2005) muestran que estos fenómenos han ocurrido en todos los ciclos eruptivos de los últimos 2 000 años. Por otra parte, la interpretación de los relatos históricos concluye que se produjeron lahares primarios en las erupciones de los años 1742, 1743, 1744, 1766, 1768, 1855 y 1877: así, por el cauce del río Cutuchi han bajado un total de veinte (20) lahares primarios en todos esos años, mientras que por el río Pita han bajado tres (3) lahares primarios en los años 1744, 1768 y 1877 (Fig. 19). Con respecto al río Tamboyacu (drenaje oriental, Fig. 19), Sodiro y Wolf reportan que bajaron lahares primarios en las erupciones de 1744 y 1877, pero se conoce muy poco sobre lo ocurrido en las otras erupciones, sin duda debido al aislamiento y lejanía de la zona (Ettinger, *et al.*, 2005). En todo caso, los relatos históricos siempre hablan de catástrofes, pérdidas cuantiosas y extensos daños provocados por los lahares que han bajado por los ríos Cutuchi y Pita, en donde han resultado particularmente afectados los valles de Los Chillos al norte, y de Latacunga al sur.

Sin duda el lahar más devastador que haya provocado una erupción del Cotopaxi ocurrió durante la última erupción riolítica del Cotopaxi II-A (ver Capítulo 2) hace aproximadamente 4 500 años. Como se había mencionado, durante esa erupción se derrumbó el flanco nor-oriental del Cotopaxi, lo que dio lugar a la formación a una avalancha de escombros seguida de un lahar de volumen formidable ($3,8 \text{ km}^3$), cuyos depósitos son aún visibles a lo largo de los ríos San Pedro y Guayllabamba, y hasta en la desembocadura del río Esmeraldas (Fig. 8). Para comparación, podemos mencionar que el volumen calculado para el lahar que bajó por sistema del río Pita el 26 de junio de 1877 es de aproximadamente $0,07 \text{ km}^3$ ($70 \text{ millones de m}^3$) (Mothes, 2004). Es muy poco probable que un evento como el de hace 4 500 años se repita en el futuro próximo ya que, por un lado, no se espera una erupción riolítica grande, y, por otro, porque el volumen del casquete *glaciar* actual es significativamente menor a lo que fue en aquel tiempo.

Peligros: No hay duda de que los lahares son los fenómenos más peligrosos en caso de suceder una erupción del Cotopaxi como cualquiera de las ocurridas en los últimos 4 000 años (Mothes, 1991; Aguilera, *et al.*, 2004). La peligrosidad de estos fenómenos está determinada por el volumen de agua disponible (tamaño del glaciar) y de los materiales sueltos disponibles, de las pendientes y del encañonamiento de los valles por donde fluyen. Las personas alcanzadas por un lahar tienen muy pocas posibilidades de sobrevivir, por lo cual, durante una crisis volcánica se recomienda la evacuación de las zonas pobladas que se encuentren en los márgenes de drenajes peligrosos que bajan del volcán (Figs. 19 y 20). Debido a su alta velocidad y densidad, los lahares primarios pueden mover y aun arrastrar objetos de gran tamaño y peso, tales como puen-



tes, vehículos, grandes árboles, etc. Las edificaciones y la vegetación que se encuentren a su paso serán destruidas o seriamente afectadas. Para el caso específico del lahar del 26 de junio de 1877, en el río Pita, se ha calculado que su velocidad variaba entre 50 y 82 km/h en el curso alto, entre 20 y 30 km/h en el Valle de los Chillos, y su caudal pico entre 50 000 y 60 000 m³/seg (Mothes, 2004).

A base de estudios llevados a cabo a lo largo de los últimos 15 años, se destaca que la erupción y el lahar ocurridos el 26 de junio de 1877 fueron importantes pero de poca duración. El derrame de los flujos piroclásticos desde el cráter no habría durado más de 15 minutos, mientras que el paso de los lahares más agresivos y espantosos habría durado solamente entre 30 a 60 minutos en las diferentes localidades. Sin embargo, es muy probable que, por un período de varios meses después del evento principal, ocurrieran otros flujos de lodo más pequeños, mientras los ríos intentaban restablecer sus cauces, especialmente en las zonas planas.

En la Figura 19 se puede apreciar las zonas cercanas al volcán que tienen la mayor probabilidad de ser impactadas por lahares primarios si ocurriese una erupción similar a la de 1877. Por su escala, el mapa presentado aquí es solamente referencial y, si se desea tener información más detallada sobre zonas pobladas o sitios específicos, se recomienda consultar los Mapas de Peligros Volcánicos de las zonas Norte y Sur del

Figura 20. Vista general y detalles de los depósitos (capas) de lahares recientes, que se pueden observar en el río Cutuchi, a las afueras de Salcedo. Nótese el espesor de cada capa en este corte que se encuentra a más de 30 metros de distancia del cauce actual del río Cutuchi. Capa 1= Depósitos de un lahar ocurrido hace más de 800 años; Capa 2= Depósito de ceniza de una gran erupción del volcán Quilotoa ocurrida hace ~800 años (alrededor del siglo XII de nuestra época); Capa 3= Depósito de lahar con restos antrópicos pre-coloniales (antes del siglo XVI); Capa 4= Suelo antiguo con restos de plantas; Capa 5= Depósito del lahar ocurrido en el año 1742 con abundantes restos de cerámica colonial y tejas; Capa 6= Pequeño depósito de lahar de grano fino (1746?, 1877?). (Fotos: P. Mothes).

volcán Cotopaxi, publicados a escala “1:50 000” por el Instituto Geofísico (Hall, *et al.*, 2004a y 2004b).

Sin embargo, es muy importante informar al lector que en cualquier mapa de peligros volcánicos, los límites de las diferentes zonas de peligros son solamente aproximativos y de ninguna manera constituyen límites absolutos. Esto se debe a que los fenómenos volcánicos pueden variar enormemente en su magnitud, su volumen, su alcance vertical y por lo tanto en su extensión lateral y longitudinal. Por ejemplo, la trayectoria de un flujo de lodo (lahar) puede sufrir cambios al ser desviado por árboles, muros, puentes, edificios y otras obras que obstruyan su paso o generen represas temporales.

En el año 2001, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional instaló una red de once (11) detectores de lahares en los principales drenajes del volcán Cotopaxi, con la colaboración del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Esta red tiene el objetivo primordial de dar a las autoridades y a la población una alerta temprana en caso de ocurrencia de lahares. Más adelante se describirá el funcionamiento y las ventajas de estos instrumentos de monitoreo.

■ AVALANCHAS DE ESCOMBROS

Definición: Las avalanchas de escombros corresponden a grandes colapsos o derrumbes de rocas que pueden ocurrir cuando los flancos de un volcán se vuelven inestables. La inestabilidad de un volcán puede deberse al ascenso de una gran cantidad de magma en el edificio volcánico, o a un sismo de gran magnitud en las cercanías del volcán, o al debilitamiento de la estructura interna del volcán inducida por ejemplo por la alteración *hidrotermal* de las rocas que lo conforman. Normalmente, el colapso del flanco de un volcán sucede por la combinación de varios factores y el volumen de la avalancha resultante puede ser muy variable (desde 0,01 hasta 15 km³). La inestabilidad de los flancos de un volcán se ve favorecida cuando sus pendientes exceden los 30° de inclinación (Fig. 21). El colapso del flanco de un edificio y la avalancha de escombros puede estar acompañado y seguido por erupciones explosivas, dado que el gran deslizamiento puede destapar súbitamente el *conducto volcánico* y generar explosiones de extrema violencia conocidas como “*blast*” que producen flujos piroclásticos de gran magnitud y alto poder destructivo.

Como resultado, una *avalancha de escombros* deja un *anfiteatro* de tamaño variable en el edificio volcánico que corresponde al sector del edificio que se derrumbó (por ejemplo, las calderas de avalancha de los volcanes Guagua Pichincha y El Altar; Fig. 21). Las avalanchas de escombros son flujos muy móviles, y sus depósitos cubren áreas de enorme extensión (10-1 000 km²) con un manto de escombros rocosos de varios metros de espesor que han arrasado con todo lo que se encontraba a su paso. Muchos *estratovolcanes* del planeta han sufrido, al menos una vez durante su historia geológica, un evento de este tipo; sin embargo, se debe recalcar que son fe-

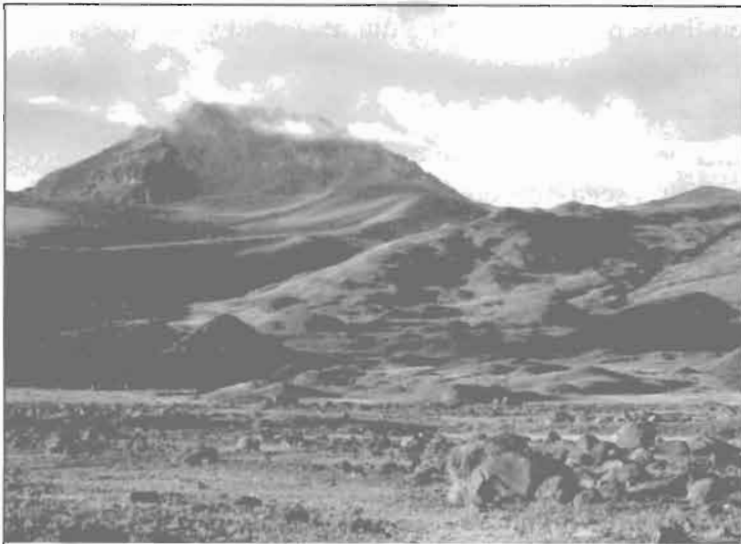
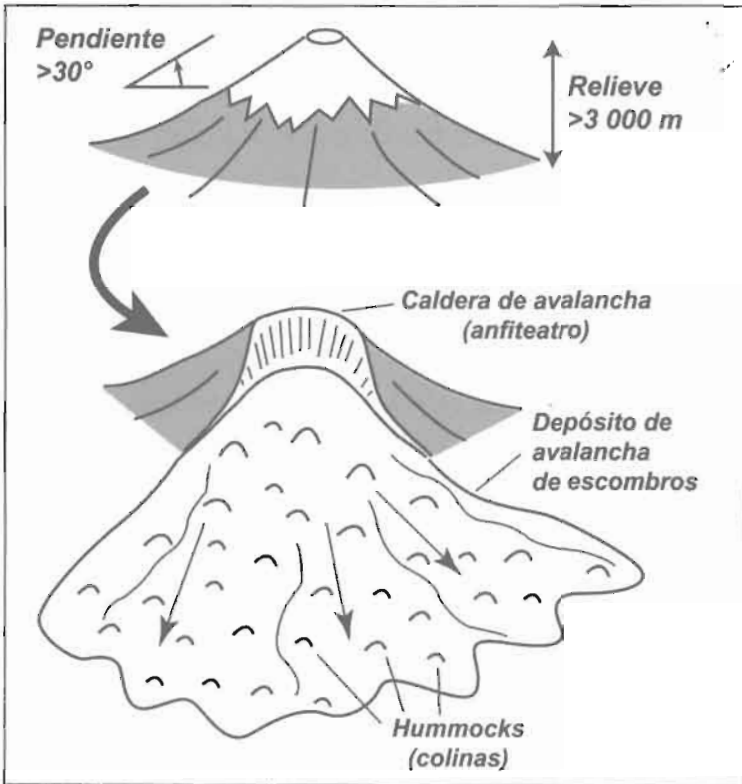


Figura 21. Arriba: esquema de un colapso (derrumbe) de flanco y una avalancha de escombros ocurriendo en un volcán similar al Cotopaxi. Abajo: fotografía del paisaje con “hummocks” (pequeñas colinas) dejado por el depósito de la avalancha ocurrida en el flanco nor-oriental del Cotopaxi hace 4 500 años, que recorrió parcialmente las faldas del volcán Sincholhua (al fondo) (Foto: P. Mothes).

nómenos muy poco frecuentes en el tiempo (aproximadamente un evento cada varios miles de años o más).

Historia: En la historia geológica del Cotopaxi se ha reconocido la ocurrencia de un colapso de flanco hace 4 500 años, el cual destruyó una parte del edificio del Cotopaxi II-A (ver Capítulo 2). La avalancha de escombros resultante fluyó en dirección norte y nor-este hasta chocar con los flancos bajos de los volcanes Sincholhua, Rumiñahui y Pasochoa, cubriendo una superficie de ~140 km² con una capa de escombros de decenas de metros de espesor (Fig. 19). En la actualidad aún se puede reconocer la zona que fue arrasada por la avalancha ya que presenta un paisaje adornado con una gran cantidad de pequeñas colinas conocidas como *hummocks*, las cuales constituyen enormes pedazos del Cotopaxi II-A que fueron transportados y depositados por la avalancha (Fig. 21).

En tiempos históricos nunca se ha observado un fenómeno de este tipo en el Cotopaxi.

Peligros: Dada la magnitud y violencia de las avalanchas de escombros, todo lo que se encuentre en su camino es destruido y, por lo tanto, las personas no tienen ninguna posibilidad de sobrevivir. Por esta razón, se recomienda la evacuación de las zonas potencialmente afectadas, si la información científica señala la posibilidad de ocurrencia de un evento de estas características en el futuro cercano. Se debe recalcar sin embargo que se trata de un evento muy poco frecuente en el tiempo y que no sucede de forma súbita, sino que normalmen-



"Cotopaxi" por Gaetano Osculati, 1846.

te presenta muchas señales premonitoras (por ejemplo, deformación amplia y acelerada del flanco inestable) que pueden ser adecuadamente detectadas y evaluadas por los científicos familiarizados con el volcán.

4. Monitoreo del volcán Cotopaxi

El ingreso de *magma* nuevo por debajo de un volcán puede provocar importantes perturbaciones y cambios en la estructura del mismo, y en la mayoría de las ocasiones termina por dar lugar a una erupción. El ascenso del magma hasta la superficie es un proceso muy complejo y dificultoso, ya que debe abrirse paso por entre las formaciones rocosas que se encuentran sometidas a gran presión bajo la superficie del volcán. La idea esencial de la vigilancia o monitoreo volcánico es utilizar cualquier medio con el fin de conocer el estado de “reposo” del volcán así como percibir las perturbaciones y cambios que ocurren en el mismo cuando un cuerpo de magma se acerca a la superficie; esto permite conocer por anticipado sobre la posible ocurrencia de una erupción en el futuro cercano. El monitoreo volcánico puede realizarse esencialmente por dos métodos: vigilancia visual y vigilancia instrumental.

■ MONITOREO POR VIGILANCIA VISUAL

Se denomina de esta forma a todas las observaciones que se realizan en un volcán que no son asistidas por instrumentos de medición. En general están basadas únicamente en los sentidos humanos y por tanto pueden ser descubiertas y descritas por toda la población, si bien su interpretación puede variar de individuo en individuo.

Cuando es realizado por un grupo de vulcanólogos, el monitoreo por vigilancia visual consiste en realizar observaciones de manera sistemática para determinar la formación de fracturas, deslizamientos o hinchamientos del edificio del volcán,

del *cráter* activo o de sus flancos; la detección de cambios en las emisiones fumarólicas, como altura relativa de la columna de gases, color, olor, intensidad, etc.; o de cambios en el caudal, color, olor de las fuentes termales; la detección de daños o muerte de la vegetación; la percepción de cambios en el comportamiento de los animales, entre otros. Este método incluye además la percepción de ruidos subterráneos y temblores de origen volcánico.

Además de las observaciones hechas por los científicos, muchas personas que visiten a menudo un volcán, por recreación o por motivos profesionales, pueden percatarse de cambios que ocurran en sus flancos o en su cráter. Con el fin de reportar y recibir estas valiosas observaciones, se incluye en el Anexo 5 un formulario que puede ser utilizado por cualquier persona que desee colaborar con las tareas de vigilancia del Cotopaxi.

Sin embargo, dado que no utiliza instrumentos de medición, el monitoreo por vigilancia visual es un método cualitativo y subjetivo, y por lo tanto puede dar lugar a serias confusiones, malentendidos e interpretaciones erróneas. Por eso, siempre que sea posible, es necesario que sea complementado y asistido por la vigilancia instrumental.

Para reforzar la vigilancia visual, en febrero de 2005 se instaló una cámara de video en el borde del cráter del Cotopaxi que envía imágenes del mismo con intervalos de 15 seg (Fig. 22). La instalación estuvo a cargo de técnicos del Instituto Geofísico apoyados por expertos montañistas del Club de Andinismo Politécnico. Esta cámara permite ahora tener un buen control de los posibles cambios y procesos que ocurran en el cráter del Cotopaxi en tiempo real. En los próximos meses las imágenes obtenidas en tiempo real por esta cámara estarán disponibles al público en el sitio web del Instituto Geofísico (www.igepn.edu.ec).



INSTITUTO GEOFÍSICO - Abril 01 08:12 2005

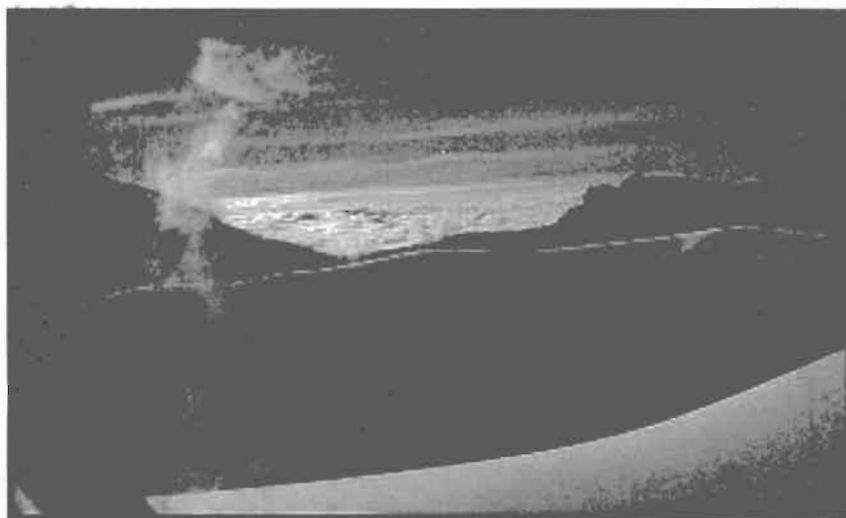


Figura 22. Arriba: Cámara de video instalada por el Instituto Geofísico en el borde del cráter del Cotopaxi, para mejorar la vigilancia visual e instrumental del volcán (Foto: D. Barba). Abajo: Imagen obtenida el 1 de abril de 2005 mediante la cámara de video instalada. Estas imágenes en tiempo real estarán muy pronto disponibles al público en general a través del portal www.igepn.edu.ec, gracias al apoyo tecnológico de ACOSA (Aglomerados Cotopaxi S.A.).

■ MONITOREO

POR VIGILANCIA INSTRUMENTAL

Se denomina de esta manera a todas las observaciones que se realizan en un volcán para las cuales se utilizan instrumentos de medición. Los instrumentos que se pueden utilizar para vigilar un volcán son muy variados, y van desde los más elementales como los termómetros o las cintas métricas, hasta instrumentos de altísima tecnología como las estaciones sísmicas de banda ancha, las cámaras termográficas y los satélites.

A continuación pasamos a resumir los parámetros vigilados y los métodos instrumentales que son utilizados por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional para monitorear la actividad del volcán Cotopaxi y de otros volcanes del Ecuador.

La sismicidad

Como habíamos mencionado, el ascenso del *magma* es un proceso muy complicado, pues para llegar a la superficie tiene que abrirse paso por entre formaciones rocosas, a través de fracturas sometidas a gran presión. Este proceso es especialmente dificultoso al principio de la reactivación del volcán, que generalmente ocurre luego de un período de reposo que puede haber durado varias décadas. Así, el ascenso de magma da lugar a la ocurrencia de muchos sismos (*sismicidad*), los cuales pueden ser fácilmente detectados por medio de *sismómetros* instalados en las cercanías del volcán. Vale mencionar que cuando un volcán está “dormido” o inactivo, también se producen sismos en su interior, pero su número y magnitud son muy pequeños respecto a cuando el volcán sufre una inyección de magma nuevo o cuando ya ha entrado en erupción.

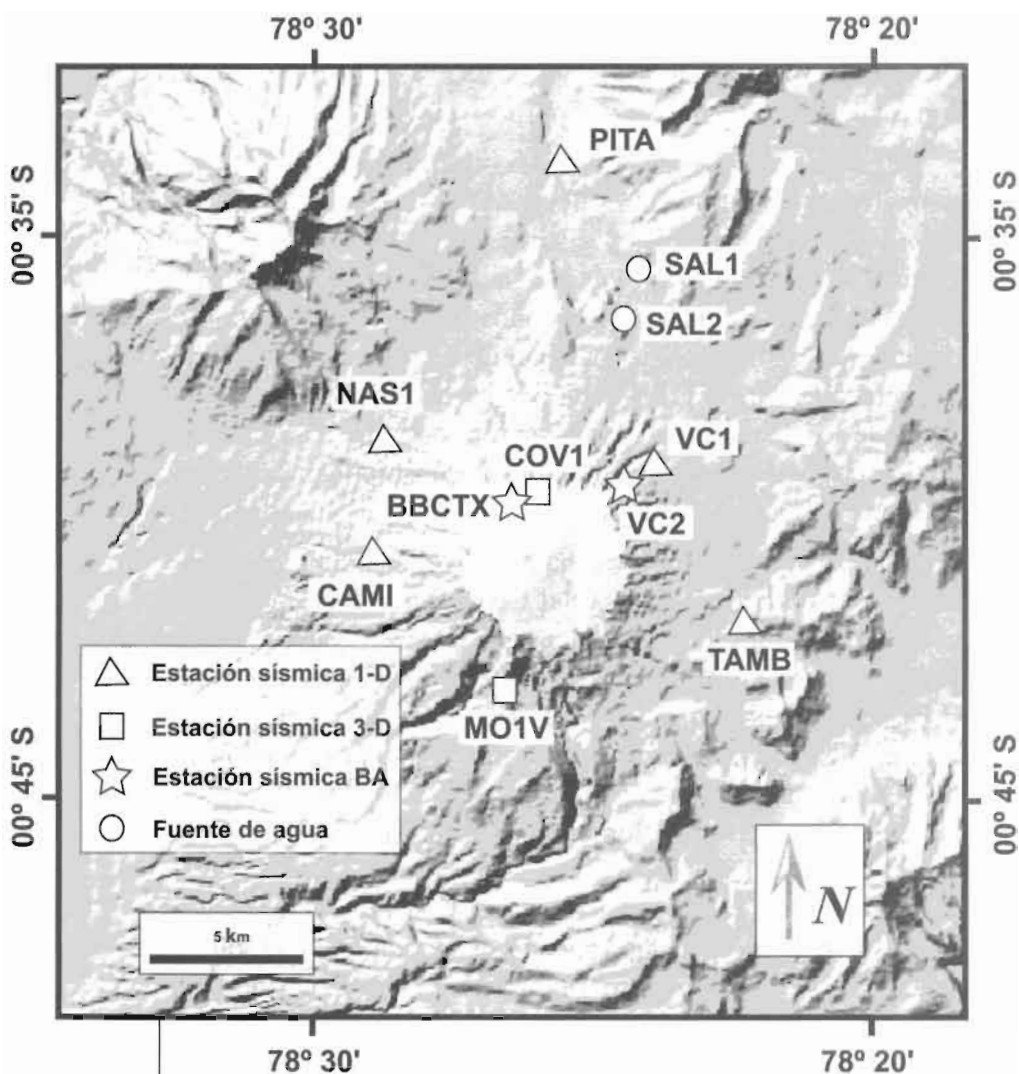


Figura 23. Mapa con la ubicación de todas las estaciones sísmicas instaladas en el Cotopaxi y de las dos fuentes de agua que son utilizadas como parte del monitoreo geoquímico. Las estaciones sísmicas del Cotopaxi son de tres tipos: "1-D" (detecta movimiento vertical), "3-D" (detecta movimientos verticales y en dos ejes horizontales), y "BA" (sensor banda ancha de 3-D, instalados bajo un convenio de cooperación con el gobierno alemán).

En cualquier caso, la gran mayoría de los sismos volcánicos son totalmente imperceptibles por los sentidos humanos.

En el Cotopaxi, actualmente está instalada una red de 9 sismómetros en los alrededores del cono, de los cuales 7 son *sismómetros* convencionales y 2 son de *banda ancha* (Fig. 23). El más antiguo de estos instrumentos fue instalado experimentalmente a mediados de los años 70, en tanto que la red obtiene datos sísmicos permanentemente desde mediados de los años 80 y ha sido mejorada con el tiempo. Casi todos los datos de los sismómetros se transmiten vía radio y se reciben en tiempo real en la base del Instituto Geofísico de Quito, las 24 horas al día, los 365 días al año.

Con estos instrumentos se ha hecho un seguimiento constante de la actividad sísmica del Cotopaxi en los últimos 30 años, y se ha llegado a determinar que los eventos más típicos son los sismos volcano-tectónicos (VT), los de largo período (LP), los de tipo “tornillo” y el temblor volcánico (Fig. 12). Los sismos VT corresponden a la formación o propagación de fracturas al interior del volcán, los sismos LP y los “tornillos” a movimientos de corta duración de fluidos (gases o magma) en el interior del volcán, mientras que el temblor corresponde al movimiento de fluidos de larga duración. Además, ocurren sismos llamados “híbridos” que corresponden, por ejemplo, a la formación de una fractura seguida de movimientos de fluidos al interior del volcán. Casi siempre estos eventos sísmicos son de pequeña magnitud (< 3 en la *escala de Richter*), pero proveen información fundamental sobre el estado de actividad del volcán.

También, mediante el seguimiento sistemático de la *sismicidad* del Cotopaxi se ha podido determinar una línea de base o “actividad de fondo”, que corresponde a cuando el volcán está tranquilo (Fig. 34). Así mismo, a partir de noviembre de

2001, se ha observado claramente que la sismicidad del volcán ha tenido un aumento significativo (Fig. 34). Sobre esto hablaremos con mayor detalle en el último capítulo de este trabajo: “Actividad Actual y Potenciales Escenarios Eruptivos”.

Por otro lado, es importante mencionar que en el segundo semestre del año 2005 se instalará una nueva red de sismógrafos de banda ancha (“BB”, Broad Band) de última tecnología, lo que permitirá mejorar la vigilancia, así como aumentar el conocimiento de los procesos y la dinámica interna del Cotopaxi. Esta red será instalada bajo un convenio de cooperación con la “Japanese International Cooperation Agency” (JICA).

Muy a menudo los primeros signos de reactivación de un volcán están representados por un claro aumento en la sismicidad del mismo. Otros signos de reactivación pueden venir dados, por ejemplo, por aumentos en las emisiones gaseosas de las fumarolas o deformación de los flancos del volcán. Estos y otros parámetros vigilados en el Cotopaxi se describen a continuación.

La deformación

El ascenso de un volumen de *magma* hacia la superficie es capaz de provocar “cambios en la forma” (deformación) del volcán; en principio, mientras más grande sea el volumen de magma inyectado, mayor será la deformación que se pueda producir. El fenómeno más comúnmente observado es que los flancos del volcán se hinchan por la inyección de *magma*. Casi siempre el hinchamiento o deformación de un volcán es imperceptible a los ojos humanos ya que suele ser de tan solo pocos centímetros o decímetros, y por eso es necesario utilizar instrumentos de mucha precisión para detectarlo.

En el Cotopaxi se utilizan tres redes de instrumentos diferentes para vigilar la deformación: inclinómetros electrónicos, distanciómetros electrónicos (EDM) y estaciones GPS (Geographical Positioning System) (Figs. 24 y 28). Los inclinómetros son instrumentos muy sensibles que miden continuamente la inclinación del suelo en un punto fijo y envían sus registros vía radio en tiempo real de forma periódica (por ejemplo, toman varias medidas por hora). Si la inclinación del suelo no cambia, los valores medidos permanecen constantes en el tiempo y se interpreta que no existe deformación en el volcán. Al contrario, cuando los valores de inclinación medidos empiezan a cambiar de forma sistemática se puede interpretar que está ocurriendo una deformación en el edificio (Fig. 25).

Los distanciómetros electrónicos (EDM), en cambio, miden con gran precisión la distancia entre dos puntos fijos. Para esto se utiliza un emisor y un reflector de rayos láser que son instalados en sitios fijos de las cercanías del volcán (Figs. 24 y 26). Igual que en el caso de los inclinómetros, si la distancia medida permanece constante en el tiempo, se interpreta que no ocurre ninguna deformación, y lo contrario en caso de que las distancias medidas cambien sistemáticamente (Fig. 27).

Finalmente, los GPS son instrumentos que reciben constantemente datos muy precisos de latitud, longitud y altura desde una extensa red de satélites que orbitan la Tierra; la precisión de las medidas es de pocos centímetros, lo que permite así detectar cualquier desplazamiento en tres dimensiones que se produzca a lo largo del tiempo en un punto determinado o fijo (Fig. 28).

En la actualidad, la red de monitoreo de deformación del Cotopaxi consta de 2 inclinómetros electrónicos, un sistema de 14 líneas de EDM, 9 puntos de control de GPS itinerantes y 4 estaciones de GPS permanentes.

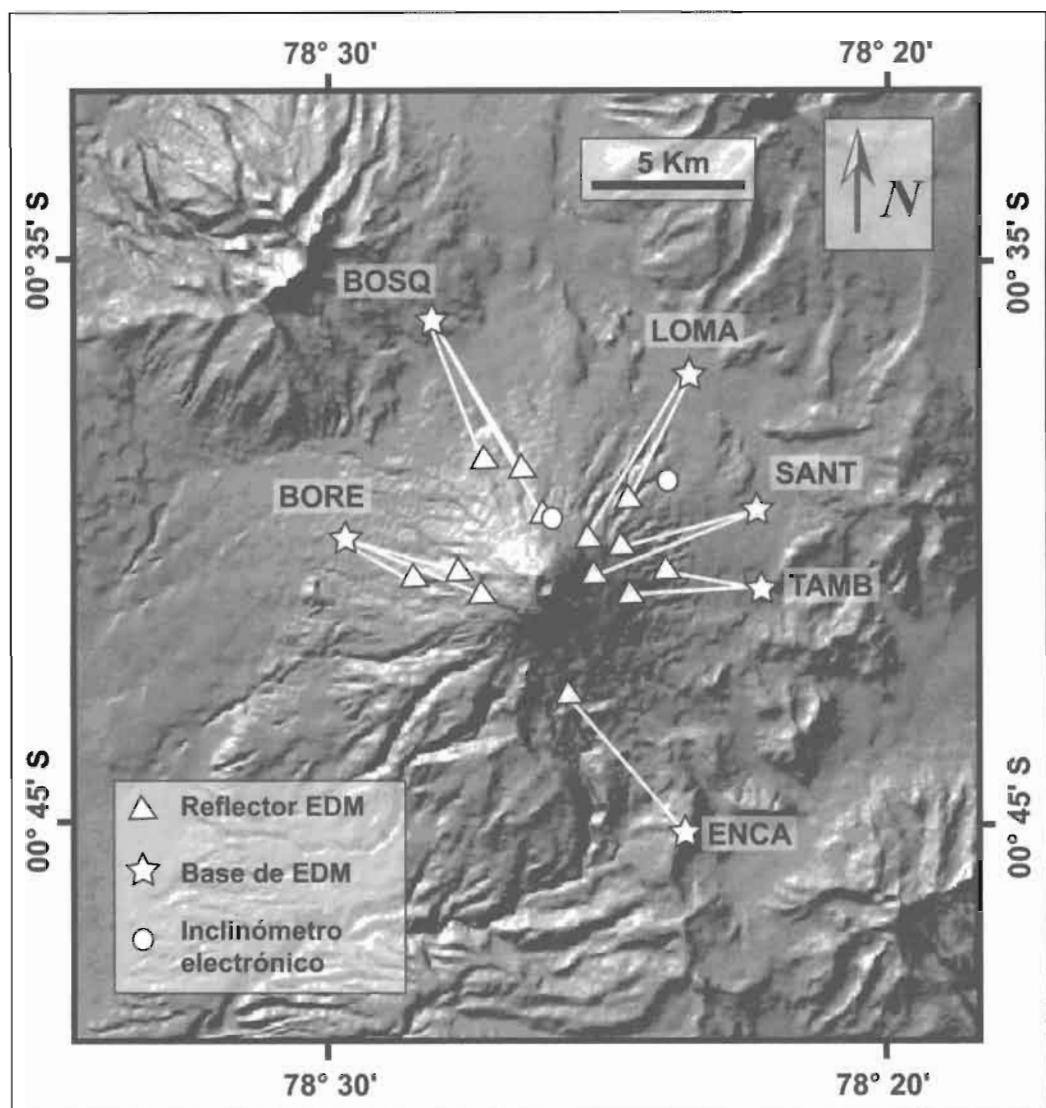


Figura 24. Mapa con los sitios de instalación de inclinómetros electrónicos y con la red de líneas de control EDM del Cotopaxi.

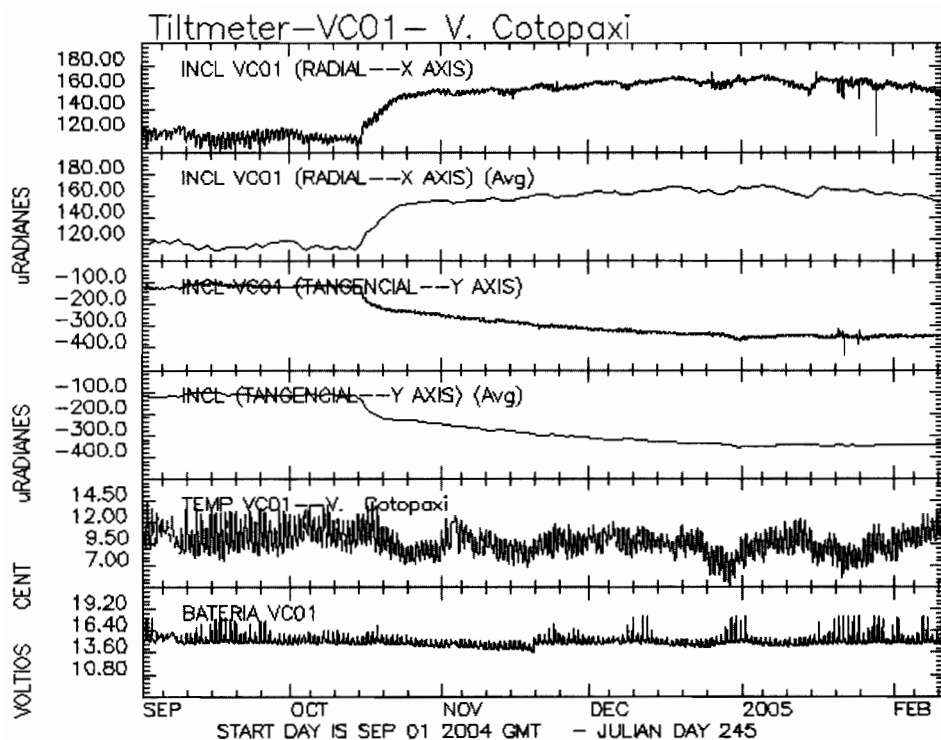


Figura 25. Ejemplo del registro obtenido por uno de los inclinómetros del Cotopaxi, entre septiembre de 2004 y febrero de 2005. Se puede interpretar que a lo largo de este período ocurrió un ligero cambio en la inclinación del punto de medida a principios de octubre de 2004. Estos instrumentos realizan medidas, en promedio, quince veces por hora (una medida cada cuatro minutos), y envían datos de inclinación radial, tangencial y de temperatura atmosférica local.



Figura 26. Mediciones de EDM realizadas desde la base BOSQ (ver también Fig. 24). El EDM es un instrumento que mide con gran precisión la distancia entre dos puntos fijos mediante un emisor y un reflector de rayos láser. (Foto: P. Mothes).

Con estos instrumentos se asegura una adecuada vigilancia de la deformación del volcán (Figs. 24 y 28).

Últimamente se ha puesto en experimentación un nuevo método para medir la deformación del Cotopaxi conocido como INSAR (Interferometría de Radar de Apertura Sintética, por sus siglas en inglés). Este método se basa en barridos de radar realizados a partir de satélites o aeronaves con los cuales se obtiene imágenes digitales muy detalladas de la superficie del terreno. Las posibles deformaciones se detectan cuando se compara imágenes obtenidas en diferentes períodos de tiempo, pudiendo las mismas ser del orden de unos pocos centímetros sobre áreas de cientos de kilómetros cuadrados. Las ventajas de INSAR incluyen su gran cobertura y su inde-

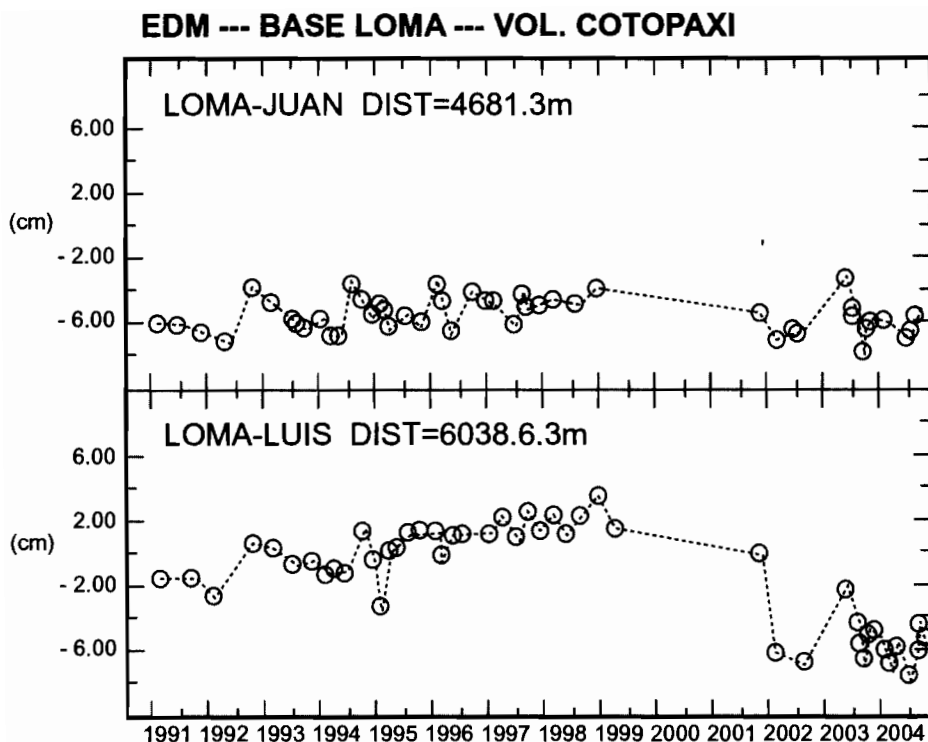


Figura 27. Registro de medidas de EDM obtenidas en el Cotopaxi desde 1991 hasta el presente mediante las líneas LOMA-JUAN y LOMA-LUIS (ver Fig. 24). Hasta la actualidad no se han observado deformaciones importantes en este segmento del Cotopaxi, si bien la línea LOMA-LUIS parece mostrar una ligera disminución de la distancia medida a partir de principios del año 2002.

pendencia de las condiciones climáticas al momento de realizar las mediciones. En el caso del Cotopaxi, este método tiene ciertas limitaciones, debido principalmente a los continuos cambios topográficos que sufre el glaciar del volcán, los mismos que pueden dar lugar a interpretaciones erróneas.

Las fumarolas y aguas termales

Es muy común la ocurrencia de *fumarolas* y aguas termales en los alrededores de los volcanes. Tanto las *fumarolas* co-

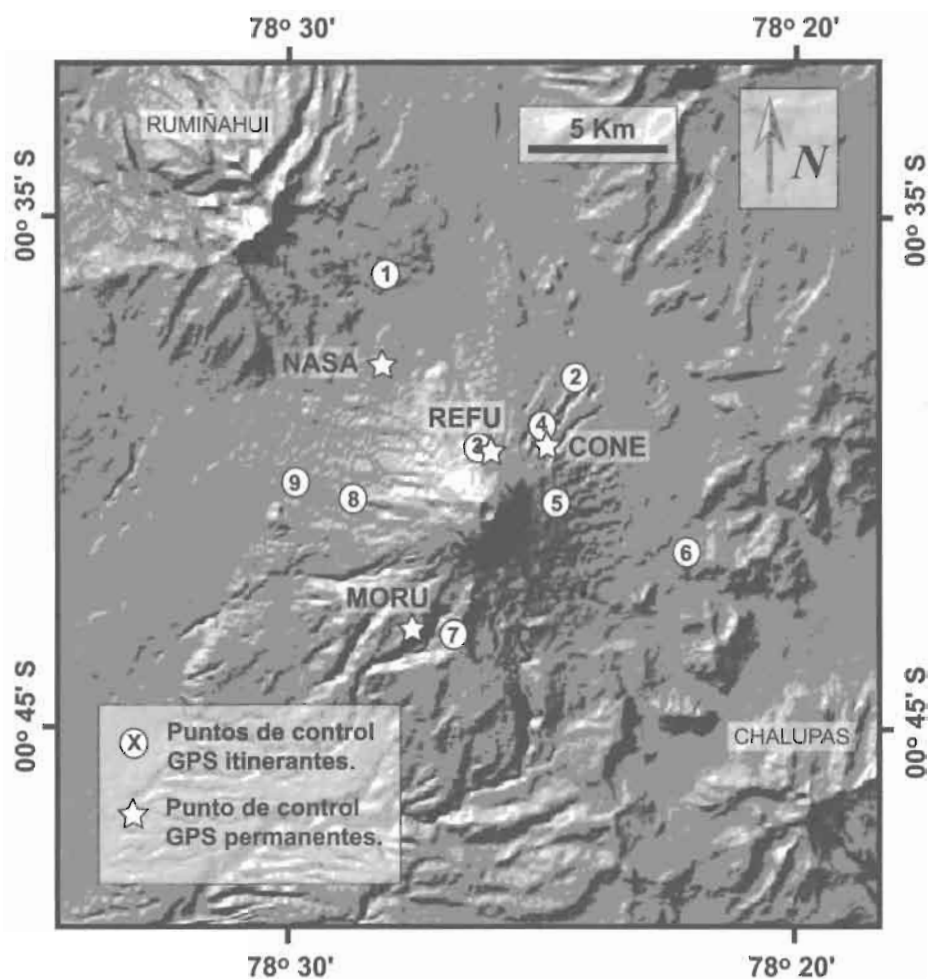


Figura 28. Red de puntos de control mediante GPS. El Instituto Geofísico cuenta con 4 estaciones GPS permanentes (adquisición de datos permanente) y una red de 9 puntos donde se realizan mediciones itinerantes (adquisición de datos itinerante).

mo las aguas termales son la consecuencia de la pérdida de gases del *magma* en profundidad y/o de la interacción que tienen las aguas subterráneas con el magma a cierta profundidad. El ascenso de magma nuevo puede provocar importantes cambios físicos y químicos en las fumarolas y aguas termales

asociadas al volcán, que pueden ser medidos y detectados con instrumentos apropiados.

Los cambios químicos en las aguas termales y fumarolas se detectan al realizar análisis químicos periódicos de las mismas, pero esto solamente es posible cuando las muestras de aguas o gases se pueden recolectar en sitios accesibles y seguros. En el flanco norte del Cotopaxi existen dos fuentes de agua que son muestreadas y analizadas periódicamente (Fig. 23).

Sin embargo, muchas veces las fumarolas se encuentran en sitios peligrosos o de muy difícil acceso: específicamente en el cráter del volcán. Para estos casos se utilizan instrumentos especiales conocidos como *sensores remotos* que, como su nombre lo indica, realizan las medidas a distancia, sin contacto directo con las fumarolas. En el caso del Cotopaxi, y de otros volcanes del Ecuador, se utiliza un *sensor remoto* llamado **COSPEC** (Correlation Spectrometer) que mide los contenidos en las emisiones gaseosas de un importante gas volcánico: el dióxido de azufre (SO₂) (Fig. 29).

También se encuentran actualmente en período de pruebas dos nuevos sensores remotos, adquiridos por el Instituto Geofísico, llamados **DOAS** (Differential Optical Absorption Spectrometer, que es una versión moderna, más rápida, automatizada y más eficiente, del **COSPEC**) y **FTIR** (Fourier Transform Infra-Red). Los resultados preliminares han sido muy prometedores.

Tanto para las aguas termales como para las fumarolas accesibles también se realizan mediciones directas y vigilancia de parámetros físicos tales como la temperatura, el caudal, la acidez-alcalinidad (pH), la conductividad, etc., siempre con la ayuda de instrumentos de medición adecuados.



Figura 29. El *sensor remoto* COSPEC (espectrómetro de correlación, por sus siglas en inglés) mide a distancia el contenido de gases magmáticos en las emisiones volcánicas. Un alto contenido de gases magmáticos (p.e. SO_2) puede significar que un período de actividad volcánica se aproxima. Izquierda: medidas realizadas en el Cotopaxi. Derecha: medidas realizadas en el Tungurahua. (Fotos: P. Mothes y D. Andrade).

La temperatura superficial

Es muy acertado pensar que un *magma* cercano a la superficie provoque un aumento en la temperatura de la misma y también en la temperatura de las fumarolas, como ya se había discutido más arriba. Las zonas en las que se esperaría observar los mayores incrementos de temperatura antes de una erupción serían el *cráter* del volcán y sus alrededores, incluidas las *fumarolas* que allí existan. En el caso del Cotopaxi, y en general de cualquier volcán activo, sería muy complicado y peligroso el llevar un control de la temperatura superficial del cráter y sus alrededores por medidas directas, por lo que también en este caso se utiliza un *sensor remoto* para realizar el trabajo: una cámara de imágenes termográficas (Fig. 30). Esta cámara es montada en una avioneta y las imágenes se obtienen durante sobrevuelos al volcán.

La cámara termográfica obtiene imágenes digitales de la temperatura superficial del terreno, de manera similar a un sensor infrarrojo. Estas imágenes se vienen tomando desde el año 2001 en el Cotopaxi y en otros volcanes del Ecuador, incluidos los de Galápagos, gracias a un convenio de cooperación entre el Instituto Geofísico y el BGR de Alemania (Ramón, *et al.*, 2004). Con estas imágenes se ha podido apreciar que, durante los últimos 3 años, las fumarolas y algunas zonas del cráter del Cotopaxi han sufrido un aumento apreciable en su temperatura superficial.

Los detectores de lahares

Como ya habíamos discutido en capítulos anteriores (ver Capítulos 2 y 3), los lahares o “flujos de lodo y escombros” son probablemente los fenómenos volcánicos más peligrosos asociados a las erupciones del Cotopaxi (Mothes, 1991; Aguilera, *et al.*, 2004). Por lo tanto, estos fenómenos merecen especial atención en cuanto tiene que ver con la vigilancia y el monitoreo.

Existen diversos métodos para detectar y vigilar flujos de lodo, los cuales están basados en diferentes características de estos fenómenos. Los detectores usados por el Instituto Geofísico son conocidos como *AFM* (Acoustic Flow Monitor) y ya han sido probados con gran éxito durante las erupciones del Tungurahua desde 1999 y del Reventador entre 2002 y 2003, (Andrade, *et al.*, 2004 y 2005) y en otras como la del volcán Pinatubo (Filipinas) en 1991 (Marcial, *et al.*, 1996). Estos instrumentos funcionan de forma similar a una estación sísmica, pues detectan las fuertes vibraciones que producen los lahares al fluir por los valles y quebradas cercanas, y envían esas señales en tiempo real por medio de un enlace de radio al Instituto Geofísico en Quito (Fig. 31). Al es-

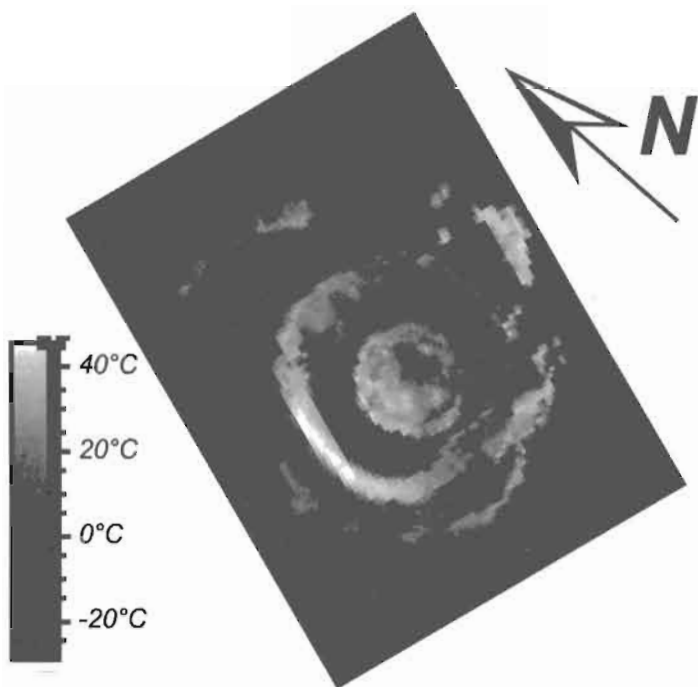


Figura 30. Fotogramas térmico (arriba) y natural (abajo) del cráter del Cotopaxi, obtenidos durante un sobrevuelo realizado en octubre de 2004. La cámara termográfica es un sensor remoto que permite medir temperaturas superficiales. Si se realizan medidas periódicas se pueden detectar cambios (aumento o disminución de temperatura) que podrían estar relacionados con la cercanía o aproximación de magma a la superficie. (Fotos: P. Ramón y F. Böker).

tar colocados en los cursos altos de los *drenajes* de un volcán, los AFM pueden detectar los lahares con anticipación a su llegada a centros poblados. Así, el propósito principal de los AFM es poder emitir alertas tempranas a la población, pero además pueden proveer datos precisos sobre la velocidad, duración y tamaño del lahar. En el Cotopaxi se han instalado 3 AFM en el río Pita y 8 AFM en los afluentes más importantes del río Cutuchi (Fig. 32). La instalación de estos instrumentos en los ríos Tambo y Tamboyacu está prevista para los próximos meses.

Sin embargo, se debe recalcar que la red de AFM, por sí sola, no representa de ninguna manera un sistema de alerta temprana. En un caso hipotético ideal, una vez que un gran lahar hubiere sido detectado por los AFM y confirmado por los científicos, **el siguiente paso sería que inmediatamente se comunique a la población en peligro, por medio de sirenas por ejemplo, para que pueda ponerse a buen resguardo.** Este último paso, es decir la comunicación final de la alerta, es responsabilidad de las autoridades a cargo de las crisis volcánicas y no del grupo técnico-científico que monitorea el volcán y su erupción. Aunque parezca complicado, similares sistemas de alertas en caso de lahar, que utilizan AFM, han sido implementados en el caso de las erupciones del Tungurahua y del Reventador, los mismos que han probado ser muy eficaces (Andrade, *et al.*, 2005). Sin embargo, la eficacia y el éxito de cualquier sistema de alertas tempranas depende en alto grado de la participación decidida y responsable de las autoridades a cargo de la crisis y sobre todo de la población en potencial peligro.

El glaciar del Cotopaxi

Todos quienes vivimos en las cercanías del Cotopaxi hemos observado que durante las últimas décadas el *glaciar* del volcán ha ido disminuyendo de tamaño en forma progresiva.

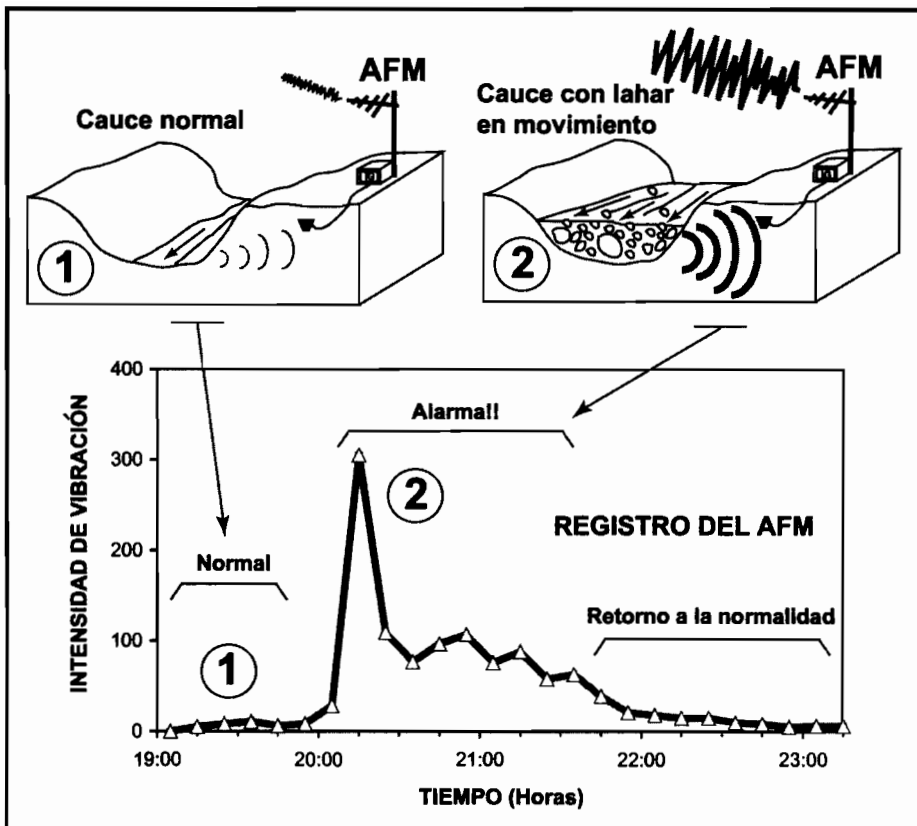


Figura 31. Esquema del funcionamiento de un detector de lahares AFM. 1) El agua del río que baja por un cauce normal provoca débiles vibraciones que son detectadas por el instrumento en forma continua; 2) Cuando un lahar baja por el cauce, la intensidad de vibración aumenta fuertemente. Dado que las señales de vibración son recibidas en tiempo real, las alertas pueden ser reconocidas rápidamente. El registro de esta figura corresponde a un lahar que fue detectado en el volcán Tungurahua en abril de 2000. En el caso del Tungurahua, los AFM han mostrado ser muy confiables pues más del 90% de las alertas emitidas resultaron certeras.

En gran parte, este fenómeno está relacionado con los cambios climáticos globales que afectan a la Tierra, sobre todo en cuanto tiene que ver con los retrocesos observados en los bordes inferiores de los glaciares del Cotopaxi. Retrocesos simi-

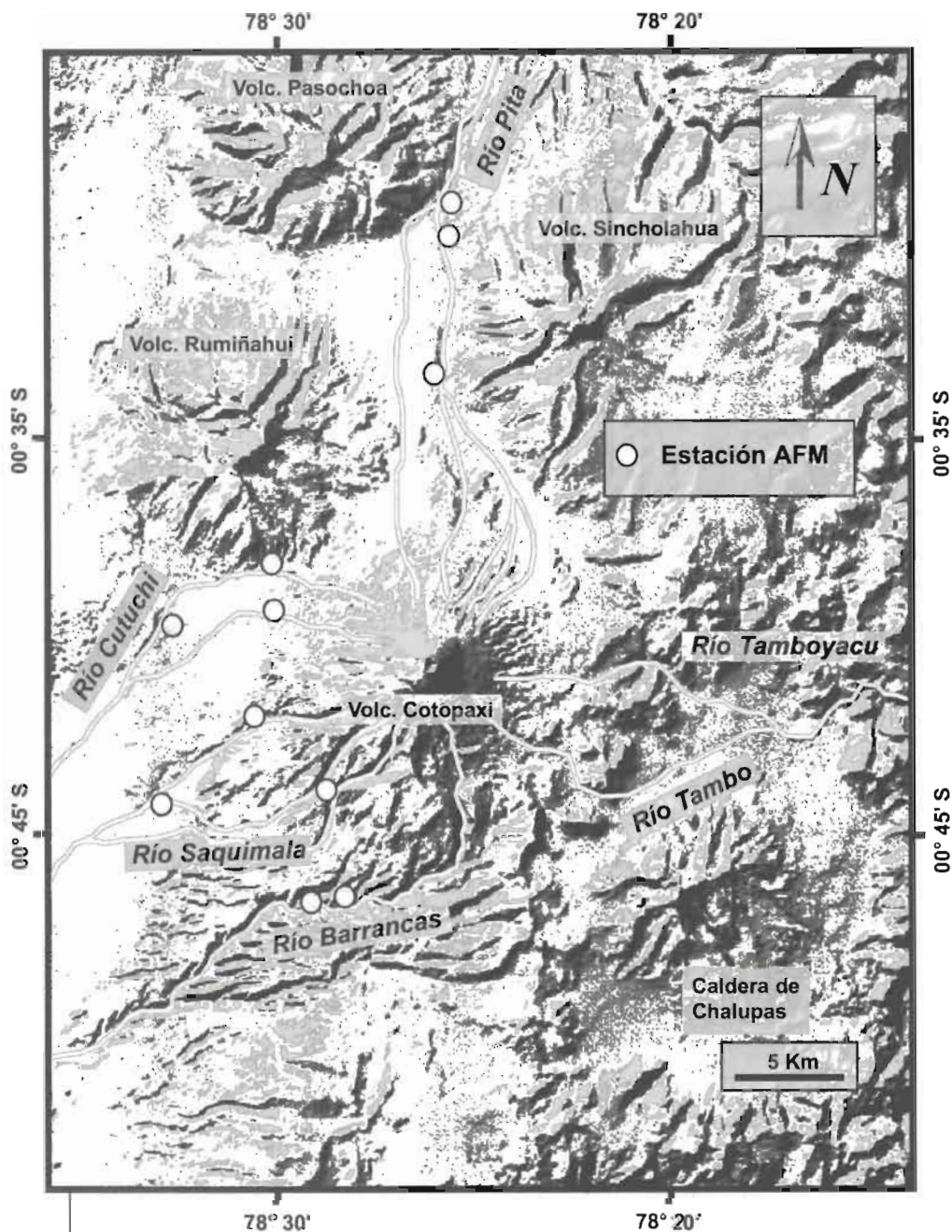


Figura 32. Red de detectores de lahares AFM del Cotopaxi. Se han instalado un total de 11 instrumentos en los principales drenajes que alimentan los ríos Pita y Cutuchi. En el futuro se piensa extender esta red para vigilar también los ríos del drenaje oriental (ríos Tambo y Tamboyacu).

lahares se observan en todos los glaciares de los volcanes del Ecuador (por ejemplo Antisana, Chimborazo, Cayambe, Illiniza y Tungurahua) y del planeta. Sin embargo, el también importante descongelamiento observado a nivel del cráter más probablemente se deba a las temperaturas cada vez más altas en esa zona, que han sido observadas con la cámara termográfica (Rivero, en prep.) (Fig. 36).

Como ya hemos mencionado, los *glaciares* del Cotopaxi son las fuentes del agua que conformaría los mayores lahares primarios durante una erupción grande. Por esto, a principios de 2004 se realizó una campaña de campo para intentar medir con precisión el volumen actual del glaciar, así como estimar su tasa de retroceso en las últimas décadas, lo que contribuye a mejorar las estimaciones del tamaño de los lahares que podrían formarse durante una erupción futura. Es así que se utilizaron fotografías aéreas antiguas y recientes para medir la disminución del área del glaciar y un equipo especial de radar para medir el espesor actual de la capa de hielo en varios puntos alrededor del cono (Cáceres, *et al.*, 2004). Este trabajo se llevó a cabo con la cooperación de instituciones ecuatorianas (INAMHI, IG-EPN, Club de Andinismo Politécnico), así como francesas (IRD), colombianas (INGEOMINAS) y alemanas (IPI-Hannover y Universidad de Dusseldorf).

Los primeros resultados preliminares de este proyecto confirman que en promedio la longitud de los glaciares del Cotopaxi ha disminuido en un 18% entre 1976 y 1997, mientras que su superficie total ha disminuido en 31%, para el mismo período. Así mismo, se ha podido estimar que la superficie cubierta actualmente por los glaciares del Cotopaxi sería de aproximadamente 14 km² (14 millones de m²), mientras que el volumen total aproximado de los mismos sería de 0,7 km³ (700 millones de m³) (Cáceres, *et al.*, 2004).

Es muy importante conocer con la mejor aproximación posible estos parámetros ya que, según los estudios realizados en los volcanes Nevado del Ruiz (Colombia) y Mount Saint Helens (EE.UU.), la superficie del glaciar es el principal factor que controla el volumen de agua generado durante su interacción con un flujo piroclástico (Pierson, *et al.*, 1990; Thouret, 1990). Es decir que mientras más extensa sea el área de un glaciar, más voluminoso podrá ser el lahar que se forme por interacción con un flujo piroclástico. En cambio, el espesor del glaciar parece ser un factor menos determinante. Por supuesto, como ya se ha mencionado, la superficie de glaciar derretida dependerá también del tamaño del flujo piroclástico: mientras más grande sea el flujo piroclástico, más grande será la superficie derretida.

Se espera que en el futuro se puedan realizar medidas periódicas del área y de los espesores de los glaciares del Coto-paxi para constreñir más precisamente los cambios ocurridos en los mismos, así como la cantidad de agua que estaría disponible para formar grandes lahares en erupciones futuras.

■ EL MONITOREO VOLCÁNICO Y LA COMUNICACIÓN

A lo largo de este capítulo hemos descrito la importante variedad de métodos de monitoreo y de parámetros vigilados en el Cotopaxi, todo lo cual sin duda permitirá un mínimo de anticipación ante una erupción futura de este volcán. Sin embargo, hay dos puntos importantes que deben ser tomados en cuenta respecto al monitoreo.

En primer lugar, la vigilancia visual e instrumental por sí solas no garantizan que las erupciones volcánicas sean menos peligrosas. Todo trabajo de vigilancia por parte de los científicos (Instituto Geofísico) resultará completamente inútil si sus observaciones, resultados y posibles alertas no son comunicados a las autoridades y a la población de forma oportuna y comprensible. Lo mismo sucederá si las autoridades y la población se muestran indiferentes ante los comunicados emitidos por los científicos oficialmente responsables del monitoreo (Instituto Geofísico).

En segundo lugar, es necesario recalcar que los resultados del monitoreo volcánico nunca serán 100% certeros debido a la gran cantidad de variables que actúan y controlan las erupciones volcánicas y sus fenómenos asociados. Es por eso que **toda información sobre una erupción futura deberá ser emitida e interpretada como una probabilidad**, lo que a su vez implica que las autoridades, la población y los científicos deben estar listos para afrontar eventos de magnitud diferente a la esperada (más grandes o más pequeños), así como falsas alarmas.

Para esto es necesario que tanto las autoridades como la población tengan un buen nivel de capacitación en cuanto a fenómenos volcánicos peligrosos y vigilancia de volcanes. Especialmente la población que vive dentro o cerca de zonas

de peligro volcánico debe ser conciente de la amenaza y aprender a vivir con ella, así como estar lista a reaccionar de manera razonable y planificada en caso de emergencia.

En general, la comunicación sobre los peligros volcánicos puede ser dividida en tres etapas principales: 1) **antes del evento**, 2) **durante el evento**, y 3) **después del evento**. Sin duda que lo más trascendental es mantener comunicación **antes del evento**, ya que este período puede ser bastante largo (meses, años y hasta décadas) y permitiría el diseño, implementación, práctica y evaluación de planes de contingencia y emergencia, con la asistencia de los científicos que pueden aportar con ideas, opiniones y datos importantes.

En cambio, **durante y después del evento**, la comunicación con los científicos será siempre más complicada, primero por el propio estado de crisis y segundo porque los científicos tendrán la mayor parte de su tiempo y energías sumamente ocupados en el monitoreo y evaluación de la erupción en marcha. En estas etapas la comunicación de los científicos con las autoridades y la población será más típicamente llevada a cabo mediante avisos de alerta, boletines informativos y conferencias de prensa.

En el caso específico del Cotopaxi, actualmente nos encontramos en la etapa de “**antes del evento**”, y por eso, nos permitimos hacer algunas preguntas al lector:

- ¿conoce sobre los peligros volcánicos asociados al Cotopaxi?
- ¿conoce los peligros volcánicos que amenazan las zonas donde usted y su familia viven, trabajan, se educan o se recrean?
- ¿tiene o conoce usted algún plan de emergencia en caso de que ocurriera una erupción del Cotopaxi?

- ¿sabe usted por qué medios se le comunicaría en caso de que una gran erupción del Cotopaxi sea inminente?
- ¿y en caso de que ocurra un lahar de gran tamaño en el Cotopaxi?

Pensamos que la presente obra ayudará a responder algunas de estas importantes preguntas, pero las otras solamente pueden ser respondidas con la participación responsable y decidida de las autoridades y la población. El deber principal del Instituto Geofísico es vigilar y comunicar sobre los peligros volcánicos en el Ecuador. Los medios para mantener la comunicación deben ser exigidos por la población y proveídos por las autoridades.



Detalle del flanco occidental del Cotopaxi. (Foto: P. Mothes).

5. Actividad actual del volcán Cotopaxi y potenciales escenarios eruptivos futuros

En los capítulos precedentes se ha mostrado que en el Cotopaxi se han llevado a cabo una gran cantidad de estudios históricos, geofísicos, geoquímicos, vulcanológicos y glaciológicos de mayor o menor detalle, desde hace ya varios siglos. Sin embargo, no cabe duda que los más importantes avances han tenido lugar en los últimos 25 años, y es a base de los mismos que ahora vamos a describir brevemente, en primer lugar, el estado de actividad actual del volcán, y luego, los potenciales escenarios que se podrían esperar en una futura erupción del Cotopaxi.

■ ACTIVIDAD ACTUAL DEL COTOPAXI

El Instituto Geofísico de la EPN inició la tarea de monitorear la actividad sísmica del volcán Cotopaxi a mediados de los años 70. Sin embargo ha sido desde los años 80 hasta la actualidad que se reciben permanentemente los registros proporcionados por la red de monitoreo instalada alrededor del volcán (Figs. 23, 24, 28 y 32). Como se ha visto, estos registros permanentes permiten estudiar la localización, magnitud, profundidad y orden secuencial de todos los sismos que ocurren en las cercanías o bajo el volcán, así como las posibles deformaciones de sus flancos, las variaciones químicas de los gases volcánicos o la ocurrencia de lahares. Los datos más abundantes con los que cuenta el Instituto Geofísico corresponden a la sismicidad del Cotopaxi.

Para una mejor comprensión de la actividad actual del Cotopaxi, vamos a describir brevemente primero lo que ha sido observado entre 1989 y 2001, y luego lo observado desde el año 2001 hasta el presente. La descripción estará basada casi exclusivamente en los datos sísmicos obtenidos a lo largo de los años, por ser estos los más abundantes y los que mejor describen la evolución de la actividad del volcán (Troncoso, 2005). En superficie el único cambio importante observado en las últimas décadas ha sido el paulatino deshielo del glaciar, que, ya sabemos, se piensa mayormente ajeno a la actividad volcánica del Cotopaxi.

Período 1989-2001

En este período de 12 años la actividad sísmica del Cotopaxi estuvo caracterizada por ser bastante regular, con presencia de *sismos* volcano-tectónicos “VT” y de largo período “LP” (Fig. 12), con un promedio de 13 sismos VT por mes y de 84 sismos LP por mes (Figs. 33 y 34). Por otra parte, en esos años nunca se observó la ocurrencia de sismos *híbridos*, de *tremor volcánico* o de sismos LP de tipo “tornillo” los cuales aparecen comúnmente en los períodos de reactivación de los volcanes. Por ejemplo, durante los meses precedentes a las erupciones recientes de los volcanes Guagua Pichincha y Tungurahua se había observado la ocurrencia de dichos tipos de sismos volcánicos.

En general, lo más común durante el período 1989-2001 fue detectar y localizar sismos volcánicos ocurridos en un radio de ~10 km alrededor del cráter del Cotopaxi, y a profundidades que variaban entre 2 y 15 km bajo el mismo (Troncoso, 2005).



Figura 34. Histograma del número de sismos (*sismicidad*) registrados mensualmente en el volcán Cotopaxi desde enero de 1989 hasta septiembre de 2005. Obsérvese la “actividad normal” del Cotopaxi, entre 1989 y 2000, así como la clara “actividad anómala” observada en el volcán a partir de finales de 2001.

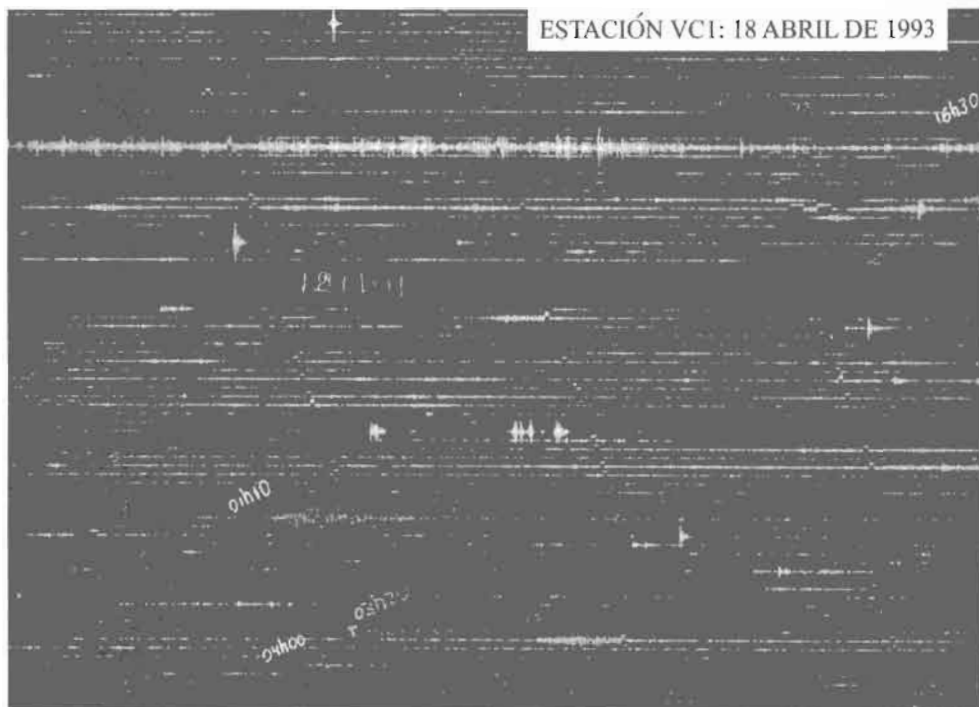
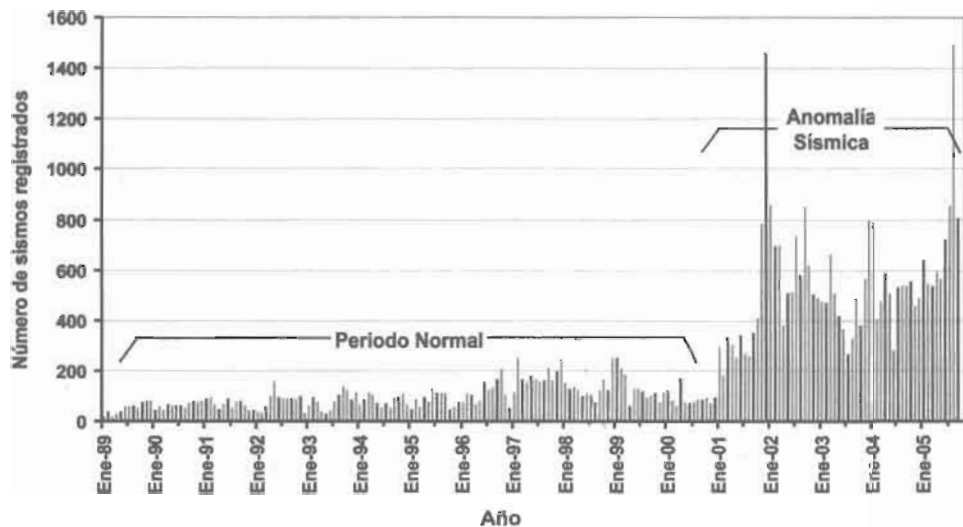


Figura 33. Registro de la actividad sísmica del Cotopaxi obtenida por la estación VCI (ver Fig. 23) en abril de 1993. Se nota que en ese tiempo había poca actividad sísmica en el volcán. La ventana de tiempo del registro mostrado en este ejemplo es de aproximadamente 7 horas.

SISMICIDAD MENSUAL VOLCÁN COTOPAXI 1989-2005



Período 2001 hasta la actualidad

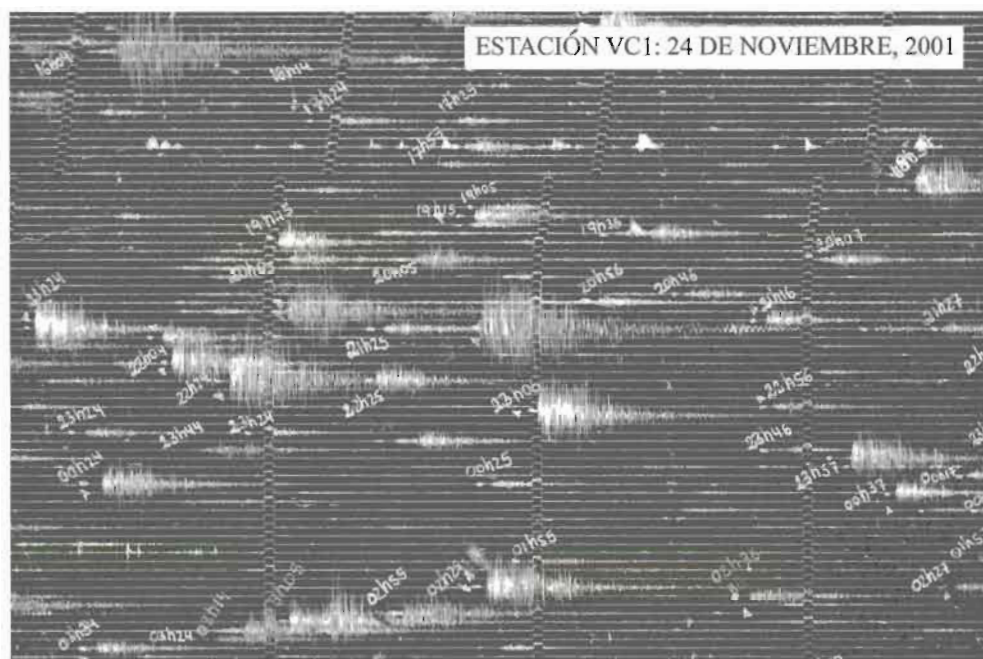
A partir de noviembre del año 2001, y hasta la actualidad, la actividad sísmica del volcán ha mostrado importantes cambios, como son:

Un fuerte aumento en el número diario y en la magnitud de los eventos registrados, llegando a ser en el caso máximo, 7 veces mayor al nivel de base normal (Fig. 34).

Al registro de VT y LP, se añaden nuevas señales sísmicas, como LP tipo “tornillo”, señales de tipo explosión y períodos de *tremor* de varios minutos de duración, cuya ocurrencia nunca antes había sido observada en el Cotopaxi.

Este notable aumento en la *sismicidad* del Cotopaxi, además, tuvo como característica que las fuentes de muchos sismos LP fueron localizadas a profundidades de hasta 25 km

Figura 35. Registro de la actividad sísmica del Cotopaxi obtenida por la estación VCI (ver Fig. 23) en noviembre de 2001. Si se lo compara con el registro de la Figura 33, se nota que la actividad es más intensa en esta época. La ventana de tiempo del registro mostrado en este ejemplo es también de aproximadamente 7 horas.



bajo el volcán y tuvieron magnitudes tales que fueron registrados por estaciones sísmicas ubicadas a más de 200 km de distancia del volcán. El aumento de la sismicidad más importante correspondió a los meses de noviembre y diciembre de 2001, y, si bien en los meses subsiguientes disminuyó, hasta la actualidad el volcán no ha regresado al nivel de actividad sísmica que lo caracterizó entre los años 1989 y 2001 (Figs. 34 y 35) (Troncoso, 2005).

Ante esta clara evidencia de actividad sísmica anormal en el Cotopaxi, el Instituto Geofísico realizó varias campañas de inspección así como la instalación de nuevos equipos de monitoreo, con el fin de intentar observar otros cambios posibles en el volcán. Así, por el método de vigilancia por observación se pudo constatar que la actividad de las fumarolas del cráter registró un claro aumento, mientras que por el método instrumental se observó, con la ayuda de la cámara termográfica, un incremento en las temperaturas superficiales del cráter y sus fumarolas (Fig. 36) (Rivero, en prep.). Sin embargo, varias medidas realizadas con el sensor remoto de gases COSPEC no han dado ningún resultado importante en cuanto a las emanaciones del volcán.

De todas maneras, ante las evidencias de actividad anómala del Cotopaxi, el Instituto Geofísico ha venido emitiendo informes para las autoridades y público en general, explicando las variaciones en el comportamiento del Cotopaxi, con el fin de que se pongan en marcha las planificaciones y acciones necesarias para enfrentar exitosamente un eventual caso de emergencia. Finalmente, podemos concluir que por el momento no existen evidencias suficientes que conduzcan a pensar que el Cotopaxi esté muy cerca de iniciar un nuevo período eruptivo, si bien, como hemos visto a lo largo de este libro, debemos tener en la mente el hecho que sin duda alguna este volcán volverá a erupcionar en el futuro.

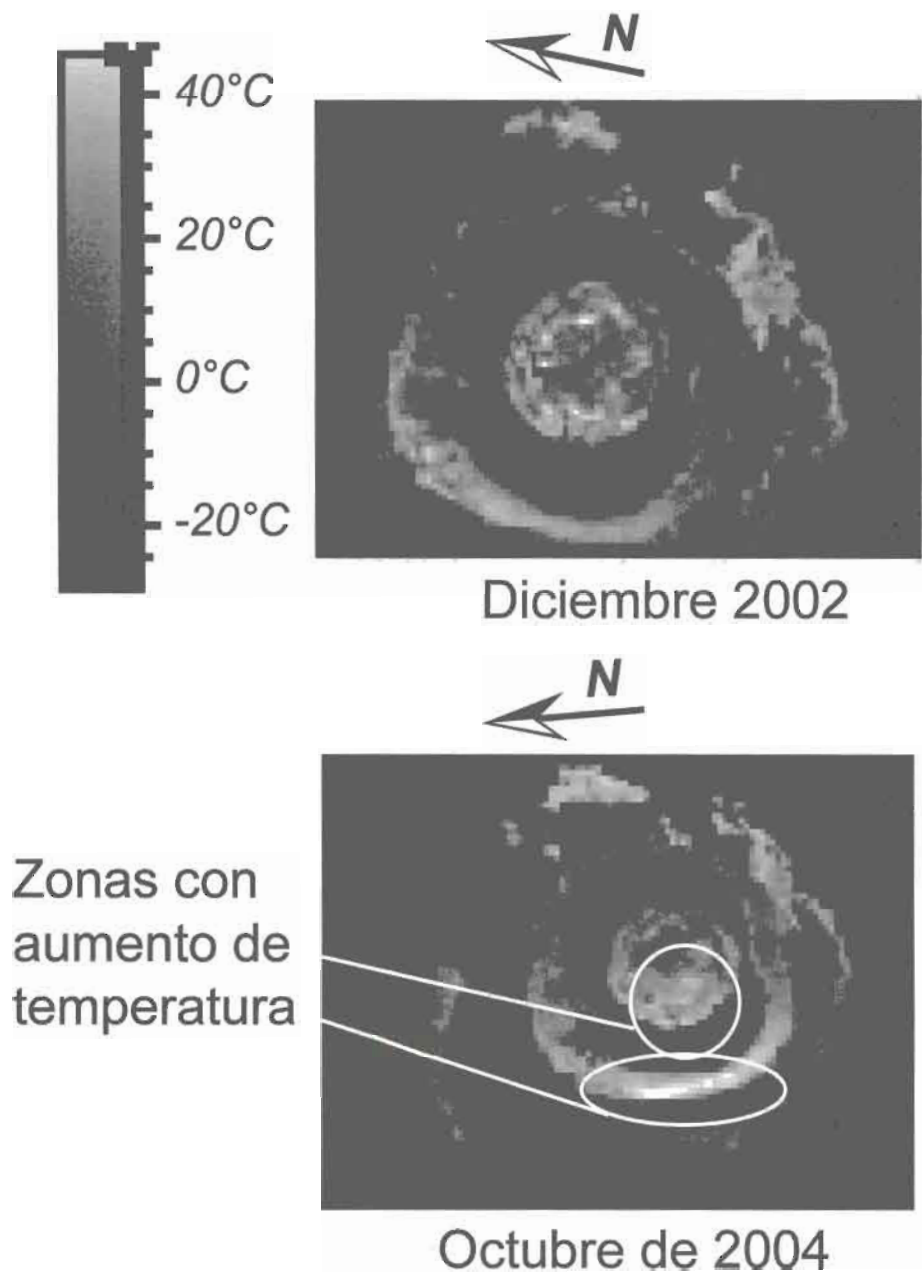


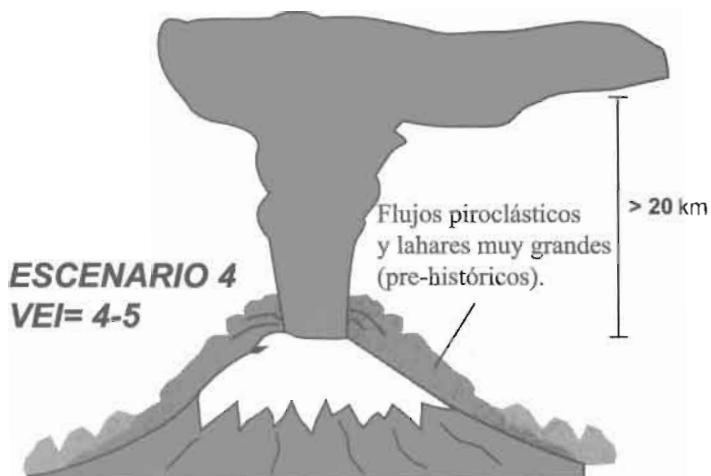
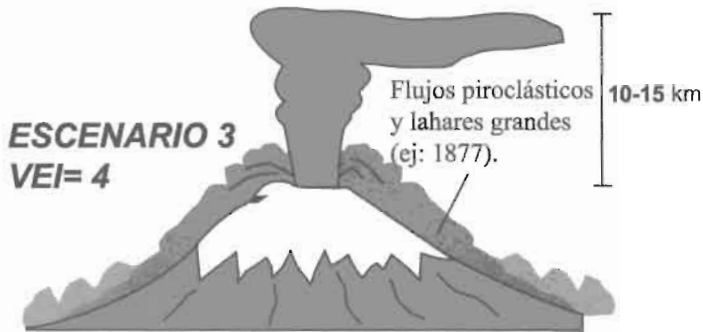
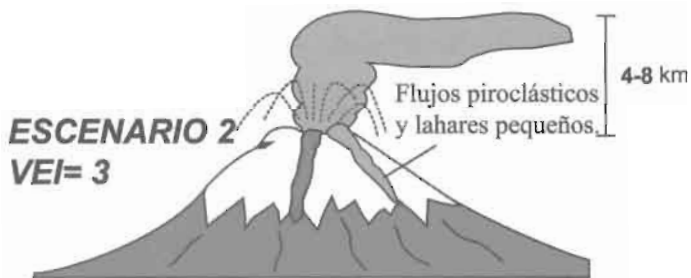
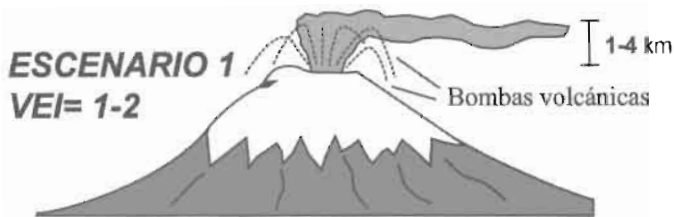
Figura 36. Fotogramas del cráter del Cotopaxi obtenidas con la cámara termográfica en noviembre de 2001 (arriba), y en mayo de 2003 (abajo). Se nota que hay varias zonas de cráter que muestran un aumento en las temperaturas medidas en ese período de tiempo.

■ POTENCIALES ESCENARIOS ERUPTIVOS FUTUROS

Es importante hacer notar al lector que las descripciones que se darán a continuación, lo mismo que en la mayor parte del libro, no pretenden representar de manera exacta los eventos que ocurrirían durante las diferentes posibles erupciones del Cotopaxi en el futuro. Más bien, se debe considerar a las siguientes descripciones como “ejemplos discretos” correspondientes a una escala continua, dentro de cuyo rango pueden ocurrir todas las posibilidades intermedias. Entonces, los cuatro principales escenarios para las futuras erupciones del Cotopaxi serían los siguientes:

Escenario 1: Evento pequeño (V.E.I.=1-2)

Se trata de un evento poco explosivo, caracterizado por una actividad de fuente de lava en el cráter o de tipo *estromboliano* (Fig. 37), como la observada en el volcán Tungurahua desde octubre de 1999. Se piensa que de producirse una reactivación del Cotopaxi, este tipo de actividad sería casi permanente durante todo el ciclo eruptivo, definiendo de esta manera un nuevo “nivel de base” de la actividad volcánica, a partir del cual podría evolucionar hacia niveles con mayores grados de explosividad (ver Escenarios 2, 3 y 4). En este primer escenario, las emisiones de ceniza serían de pequeña a moderada intensidad y afectarían sobre todo los flancos del volcán y las áreas cercanas al mismo. Aunque es muy poco probable, se podrían generar también pequeños flujos piroclásticos o coladas de lava que descenderían por los flancos altos del volcán. De ocurrir, estos dos fenómenos podrían generar lahares primarios y secundarios de tamaño pequeño o moderado que difícilmente afectarían las zonas habitadas de los drenajes del Cotopaxi.



Escenario 2: Evento moderado (V.E.I.= 2-3)

Este escenario considera una actividad algo más explosiva del volcán, de tipo *estromboliana* a *vulcaniana* moderada. Estaría caracterizada por emisiones permanentes de ceniza cuyo impacto sería principalmente local, por flujos piroclásticos pequeños a moderados y por coladas de lava de poca extensión (Fig. 37).

Como fue el caso en la erupción del Cotopaxi de los años 1853-1854, la colada de lava podría tener su centro de emisión en el *cráter* o en una fisura en los flancos superiores. Al descender por uno de los flancos del volcán, la interacción entre la lava y el hielo estaría focalizada sobre dicho flanco. Estudios recientes señalan que, a pesar del evidente contraste de temperaturas entre la lava y el hielo, la superficie de contacto entre ambos es tan limitada que se tiene una deficiente transferencia de calor, y por tanto una fusión limitada del glaciar. Así, los lahares formados por este proceso serían de tamaño pequeño/moderado y de alcance relativamente restringido.

Caso contrario, de formarse *flujos piroclásticos*, los lahares generados alcanzarían volúmenes importantes, aunque menores a los del 26 de junio de 1877. Por lo tanto, estos fenómenos representarían peligros directos para los centros poblados y edificaciones ubicados a lo largo del cauce de los drenajes más importantes del Cotopaxi (ríos Pita, Cutuchi y Tamboyacu).

En cuanto a las caídas de ceniza, igual que en las erupciones pasadas, se esperaría que los flancos superiores sean afectados por lluvias de lapilli de *escoria* volcánica que se acumularía hasta formar capas de 10-15 cm de espesor. En cambio,

Figura 37. Esquemas de los cuatro principales escenarios previsible para una erupción futura del Cotopaxi. Es necesario tener en cuenta que los diferentes escenarios no son exclusivos, sino que deben tomarse como eventos discretos dentro de una serie continua de escenarios donde todos los intermedios son posibles. (El tamaño de las columnas eruptivas es solamente indicativo en los diagramas y no está en escala con el tamaño del volcán).

a mayores distancias del volcán, por ejemplo en las zonas de Lasso, Mulaló o Tanicuchi, se podrían acumular hasta varios milímetros de ceniza, de forma similar a lo que ocurre actualmente en las zonas agrícolas al occidente del volcán Tungurahua. En general, los vientos predominantes de la zona del Cotopaxi tienden a llevar las nubes de ceniza hacia el oeste, suroeste y noroeste del volcán.

Se ha estimado que, una vez iniciado un proceso eruptivo en el Cotopaxi, las probabilidades de que el mismo evolucione solamente hasta el Escenario 2 son del 30% (Samaniego, *et al.*, 2004).

Escenario 3: Evento grande (V.E.I.= 4)

Este escenario corresponde a un evento similar a la última erupción grande del volcán de 1877, la cual es considerada como el “evento típico” de las más importantes erupciones históricas del Cotopaxi. Se trata de una erupción volcánica explosiva, caracterizada por una actividad *vulcaniana* a *subpliniana* (Fig. 37), con emisiones importantes de ceniza que afectarían tanto a los alrededores del volcán como a amplias regiones al occidente del mismo. Se generarían flujos piroclásticos por el desbordamiento del magma del cráter (proceso llamado “boiling over”), los cuales descenderían simultáneamente por varios o todos los flancos del volcán.

Como ha sido mencionado anteriormente, la ocurrencia de flujos piroclásticos daría lugar a la formación de flujos de lodo y escombros (lahares) de gran volumen, que producirían serios estragos en amplias zonas pobladas asentadas en las cercanías y a todo lo largo de los ríos Pita, Cutuchi y Tamboyacu, hasta por cientos de kilómetros aguas abajo.

Igualmente, se debe esperar mayores acumulaciones de escoria y ceniza, quizás de hasta 40-50 cm de espesor sobre los

flancos altos y de 5-10 cm en las áreas cercanas al occidente del volcán, así como acumulaciones de pocos milímetros de ceniza hasta en las provincias costeras de Guayas, Manabí y Esmeraldas. Durante la erupción del 26 de junio de 1877, se reportó que en la zona de Tanicuchi (unos 30 km al suroeste del volcán) cayeron fragmentos de escoria del tamaño de un puño, mientras que en Guayaquil hubo leves lluvias de ceniza muy fina durante los tres días posteriores a la erupción (Wolf, 1878).

Finalmente, también es posible que ocurran coladas de lava *andesítica*. Sin embargo, por las características de las mismas, es poco probable que se extiendan más allá de los pies del cono, sobre cotas inferiores a los 3 500 m.

La historia geológica del volcán muestra que este escenario ocurre con mucha frecuencia, habiéndose producido en al menos 10 ocasiones en los últimos 2 000 años, de las cuales las últimas cuatro corresponden a los años de 1742, 1744, 1768 y 1877. Se ha estimado que, una vez iniciado un proceso eruptivo en el Cotopaxi, las probabilidades de que el mismo evolucione hasta el Escenario 3 son del 60% (Samaniego, *et al.*, 2004).

Escenario 4: Evento muy grande (V.E.I.= 4-5)

Probablemente correspondería a una erupción *pliniana* (magmas *andesíticos ácidos* y *dacíticos*) (Fig. 37), altamente explosiva, como las ocurridas ocasionalmente durante las fases pre-históricas del volcán (ver el Capítulo 2). Las nubes y lluvias de ceniza resultantes tendrían una distribución y un impacto regional muy amplio e importante, pudiendo provocar fácilmente acumulaciones de 1-1,5 m de espesor en las zonas cercanas al Cotopaxi (< 10 km de distancia), similar a lo ocurrido hace 1 000 años (Fig. 18).

Por otro lado, los flujos piroclásticos se originarían por el colapso de la *columna eruptiva*, se desplazarían sucesivamente por varios o todos los flancos del volcán y tendrían un gran alcance, quizás de hasta 20-25 km desde el cráter.

Dentro de este mismo escenario (V.E.I= 4-5), también sería posible que el magma erupcionado sea de tipo *riolítico*. En ese caso se podría esperar que los flujos piroclásticos formados sean aún mayores, y que las acumulaciones de ceniza sean significativas tanto al occidente como al oriente del volcán. Más aún, en una erupción de este tipo también se podrían formar *domos* al interior y sobre el cráter.

En cualquiera de las dos posibilidades del Escenario 4 se formarían lahares de mayor tamaño que cualquiera de los ocurridos en tiempos históricos. Sin embargo, se debe mencionar que las erupciones de magmas *dacíticos* son muy poco comunes en el Cotopaxi, habiéndose producido solamente en dos ocasiones en los últimos 2 000 años; la última hace aproximadamente 1 000 años. Peor aún, las erupciones de *magmas riolíticos* suceden en el Cotopaxi solamente luego de intervalos de varios miles de años.

Se ha estimado que, una vez iniciado un proceso eruptivo en el Cotopaxi, las probabilidades de que el mismo evolucione hasta el Escenario 4 son solamente del 10% (Samaniego, *et al.*, 2004).

6. Referencias

- Aguilera, E., M.T. Pareschi, M. Rosi, y G. Zanchetta,
2004 “Risk from Lahars in the Northern Valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador)”, vol. 33, *Natural Hazards*, pp. 161-189.
- Andrade, D., M.L. Hall, P. Ramón, P. Mothes, A. Ruiz, y S. Hidalgo,
2004 “Observación instrumental de lahares en el volcán Tungurahua entre abril-2000 y agosto-2001”, vol. 1, *Investigaciones en Geociencias*, Quito, CEN-IRD-IGPN, p. 9-12.
- Andrade, D., P. Ramón, W. Enríquez, C. Ramos, M. Vaca, P. Mothes, M. Hall,
2005 “Sistemas de detección de lahares y alertas tempranas: aplicaciones y resultados en los volcanes del Ecuador”, XII Congreso Latinoamericano de Geología, Quito, resúmenes extendidos.
- Barberi, F., M. Coltelli, A. Frullani, M. Rosi, y E. Almeida,
1995 “Chronology and dispersal characteristics of recently (last 5 000 years) erupted tephra of Cotopaxi (Ecuador): implications for long-term eruptive forecasting”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 69, pp. 217-239.
- Cáceres, B.,
2005 “Evaluación reciente del área del casquete glaciar del volcán Cotopaxi mediante la utilización de fotogrametría digital”, memorias del XII Congreso Latinoamericano de Geología, Quito.
- Cáceres, B., J. Ramírez, B. Francou, J-P. Eissen, J-D. Taupin, E. Jordan, L. Ungerechts, L. Maisincho, D. Barba, E. Cadier, R. Bucher, A. Peñafiel, P. Samaniego, y P. Mothes,
2004 “Determinación del volumen del casquete de hielo del volcán Cotopaxi”, Quito, Inamhi-IRD-IG/EPN-IN-Geominas-IGM-HHUD, p. 54.

- Egred, J. (en prep.),
s.f. “Historia de la actividad del volcán Cotopaxi”, serie *Sismología y Vulcanología Históricas*, No. 1, Quito, Instituto Geofísico-EPN, p. 130.
- Ettinger, S., P. Mothes, y R. París,
2005 *Lahar deposits on the eastern drainage of Cotopaxi volcano: sedimentology and implications for hazards*, 6th International Symposium on Andean Geodynamics, Barcelona, volúmenes de resúmenes extendidos.
- Hall, M.,
1977 *El volcanismo en el Ecuador*, IPGH, Sección Nacional del Ecuador.
- Hall, M., y B. Beate,
1991 “El volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador”, en *El paisaje volcánico de la Sierra ecuatoriana, estudios de Geografía*, pp. 5-13.
- Hall, M., y P. Mothes,
1992 “Tefroestratografía holocénica de los volcanes principales del valle Inter-andino, Ecuador”, en *El contexto geológico del espacio físico ecuatoriano, estudios de Geografía*, vol. 6, pp. 47-67.
- Hall, M., P. Mothes, y S. Hidalgo,
2005 “Mapa geológico del volcán Cotopaxi/Geologic Map of Cotopaxi Volcano”, esc. 1:50 000, IGM-IG/EPN, edits., Quito.
- Hall, M., P. Mothes, P. Samaniego, H. Yepes, y D. Andrade,
2004a “Mapa regional de los peligros volcánicos potenciales del volcán Cotopaxi, Zona Norte”, esc. 1:50 000, IGM, IG/EPN, IRD, edits., Emb. de Alemania, Quito.
- 2004b “Mapa regional de los peligros volcánicos potenciales del volcán Cotopaxi, Zona Sur”, esc. 1:50 000, IGM, IG/EPN, IRD, edits., Emb. de Alemania, Quito.
- Hall, M., y C. von Hillebrandt,
1988a “Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Coto-paxi, Zona Norte”, esc. 1:50 000, proyecto Undro-EPN, IG-EPN, Quito.

- Hall, M., y C. von Hillebrandt,
1988b “Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Cotopaxi, Zona Sur”, esc. 1:50 000, proyecto Undro-EPN, IG-EPN, Quito.
- Hammersley, y De Paolo,
2002 *Oxygen isotope evidence for the role of crustal contamination in the evolution of the Chalupas caldera system, Northern Andes, Ecuador*, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco-USA, abstracts.
- Hradecká, L., P. Hradecki, M. Kruta, V. Lysenko, B. Mlcoch, y A. Paulo,
1974 *Cotopaxi: Informe final del grupo de geólogos*. Memoria de la exploración geológica del volcán Cotopaxi hecha por la expedición checo-polaca en el año 1972, p. 60 (inédito).
- Humboldt, A. von,
1810 *Vues des Cordillères et Monuments des Peuples Indigènes de l'Amérique*, París.
- La Condamine, C-M de.,
1751 *Journal du voyage fait par l'ordre du roy à l'Equateur, servant d'introduction historique à la mesure des trois premiers degrés du méridien*, L'imprimerie royal, París.
- Marcial, S., A. Melosantos, K. Hadley, R. LaHusen, y J. Marso,
1996 “Instrumental Lahar Monitoring at Mount Pinatubo”, en C. Newhall y R. Punongbayan, eds., *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, pp. 1015-1022.
- Martínez, A. N.,
1932a *Exploraciones y estudios efectuados en el Cotopaxi y en el Pichincha*, Quito, Imprenta Nacional.
1932b “Contribución para el conocimiento de la región volcánica del Ecuador-El Cotopaxi y las montañas volcánicas que le rodean: Pasochoa, Rumiñahui, Sincholahuá y Quilindaña”, en *Anales de la Universidad Central del Ecuador*, Quito, Imprenta de la Universidad Central.
- Miller, C.D., D.R. Moullineaux, y M. Hall,
1978 *Reconnaissance map of potential volcanic hazards from Cotopaxi volcano, Ecuador*, United States Geological Survey Map, i-1072.

- Mothes, P.,
1991 "Lahars of Cotopaxi Volcano, Ecuador: Hazard and risk evaluation", en G.J.H. McCall, D.J.C. Laming, y S.C. Scott, edits., *Geohazards: Natural and man-made*, London, Chapman & Hall, pp. 53-64.
- Mothes, P., M. Hall, y R.J. Janda,
1998 "The enormous Chillos valley lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi volcano, Ecuador", *Bulletin of Volcanology*, No. 59, pp. 233-244.
- Mothes, P.,
2004 *Flujos de lodo asociados con las erupciones del volcán Cotopaxi*. Informe inédito para Emaap-Quito, p. 54.
- Nairn, I.A.,
1991 "Volcanic hazards of Okataina Volcanic Center", en *Volcanic Hazards Information Series*, No. 2, New Zealand Ministry of Civil Defense, p. 29.
- Neall, V.E., B.F. Houghton, S.J. Cronin, S.L. Donoghue, K.A. Hodgson, D.M. Johnson, J.A. Lecointre, y A.R. Mitchel,
1999 "Volcanic Hazards at Ruapehu Volcano", en *Volcanic Hazards Information Series*, No. 8, New Zealand Ministry of Civil Defense, p. 30.
- Newhall, C., y S. Self,
1982 "The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical eruptions", *Journal of Geophysical Research*, No. 87, pp. 1231-1238.
- Pierson, T., R. Janda, J-C. Thouret, y C. Borrero,
1990 "Perturbation and melting of snow and ice by the 13 november 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 41, pp. 17-66.
- Ramón, P., F. Böker, H. Yepes, y D. Rivero,
2004 *Portable thermal camera measurements on active volcanoes in Ecuador*, IAVCEI General Assembly Pucón, Chile, abstracts.

- Reiss, W.,
 1873 *Carta del Dr. W. Reiss a S.E. el Presidente de la República sobre sus viajes a las montañas Iliniza y Corazón, y en especial sobre su ascensión al Cotopaxi*, Quito, Imprenta Nacional.
- Reiss, y Stübel,
 1902 “Reisen in Sud-Amerika. Das Hochgebirge der Republik Ecuador. II. Petrographische Untersuchungen. 2. Ost-Cordillere”. Trad. por A.N. Martínez (1930), *Pioneros y precursores del andinismo ecuatoriano*, tomo III, ediciones Abya-Yala, 1994.
- Rivero, D. (en prep.),
 s.f. *Estudio de las anomalías térmicas en el volcán Cotopaxi causadas por la intrusión magmática de noviembre de 2001*. Tesis previa a la obtención del título de ingeniero geólogo, Quito, Escuela Politécnica Nacional.
- Samaniego, P.,
 2004 *Escenarios eruptivos en caso de una potencial erupción del volcán Cotopaxi*. Informe inédito para Emaap-Quito, p. 18.
- Simkin, T., y L. Siebert,
 1994 *Volcanoes of the World*, Washington D.C., Geosciences Press, Inc. p. 349.
- Sodiro, L.,
 1877 *Relación sobre la erupción del Cotopaxi acaecida el día 26 de junio de 1877*, Quito, Imprenta Nacional, p. 50.
- Stübel,
 1897 *Die Vulkanberge von Ecuador*. Trad. por A.N. Martínez (1930), *Pioneros y precursores del andinismo ecuatoriano*, tomo III, ediciones Abya-Yala, 1994.
- Thouret, J-C,
 1990 “Effects of the november 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 41, pp. 177-201.

Troncoso, L.,

2005 *Análisis de la actividad sísmica anómala del volcán Cotopaxi y su vínculo con la sismicidad de la zona de Pastocalle, período 2001-2002*. Tesis previa a la obtención del título de ingeniera geóloga, Quito, Escuela Politécnica Nacional, p. 230.

Whymper,

1892 *Viajes a través de los majestuosos Andes del Ecuador*, colección *Tierra Incognita*, No. 4. Edición corregida y aumentada de la versión española de C. Bahamonde, Quito, ediciones Abya-Yala, 1994, p. 448.

Wolf, T.,

1878 *Memoria sobre el Cotopaxi y su última erupción acaecida el 26 de junio de 1877*, Guayaquil, Imprenta del Comercio, p. 64.

1904 *Crónica de los fenómenos volcánicos y terremotos del Ecuador, con algunas noticias sobre otros países de la América Central y Meridional, desde 1533 a 1797*, Imprenta de la Universidad, Ecuador, p. 120.

7. Glosario

AFM: Siglas en inglés de Acoustic Flow Monitor (Monitor de Flujo Acústico). Son instrumentos sísmicos que registran frecuencias de vibración del suelo de entre 10 y 300 Hz. Estas características les permiten detectar el movimiento de flujos lodosos y lahares por un drenaje o quebrada.

Andesita: Roca de origen volcánico de color gris medio, que contiene entre 53 y 63 % en peso de sílice. El color, la composición química, la viscosidad y el carácter eruptivo son intermedios entre un *basalto* y una *dacita*. Es la roca más común del volcán Cotopaxi actual. Andesítico: relativo a las andesitas.

Anfiteatro: Hemiciclo. Edificio de figura redonda, con gradерíos alrededor, en el cual se celebran diversos espectáculos. En el caso de los volcanes, corresponde a la morfología que queda en un volcán luego de un colapso de flanco de gran magnitud acompañado de una erupción.

AP: Siglas utilizadas en ciencias de la Tierra para abreviar "Antes del Presente". Dado que el

tiempo geológico es muy largo, con fines prácticos se considera al "presente" como correspondiente al año de 1950.

Avalanchas de escombros: Deslizamientos volcánicos. Mezclas secas o húmedas, incoherentes y caóticas de suelo y escombros de rocas volcánicas que fluyen o se deslizan desde su fuente a alta velocidad. Ocurren ocasionalmente en estrato-volcanes y están entre los fenómenos volcánicos más peligrosos. Pueden alcanzar volúmenes de entre 0,1 y 10 km³.

Balístico (Fragmento): Fragmento de roca expulsado violentamente por una explosión volcánica y que sigue una trayectoria balística, en forma de parábola.

Basalto: Roca de origen volcánico de color gris muy oscuro, que contiene menos de 53% de sílice. En estado fundido presenta una baja viscosidad, que implica una erupción generalmente no explosiva que produce flujos de lava que fluyen con relativa facilidad (e.g. islas Galápagos). Basáltico: relativo a los basaltos.

Blast: Explosión volcánica de gran escala y extrema violencia producida por la despresurización súbita de un cuerpo de magma cercano a la superficie. Este fenómeno puede deberse a un deslizamiento de una parte de un edificio volcánico. Un “blast” es una mezcla caliente de baja densidad de fragmentos de roca, ceniza y gases que se mueve a altas velocidades a través de la superficie terrestre.

Bombas y bloques volcánicos: Fragmento de lava de tamaño superior a 64 mm de diámetro, expulsado por una explosión volcánica. Si son expulsados en estado sólido se denominan “bloques”, mientras que si son expulsados en estado semi-sólido o plástico se denominan “bombas”.

Caldera: Gran depresión en la superficie terrestre, de origen volcánico, generalmente de forma circular o elíptica, de varios kilómetros hasta varias decenas de kilómetros de diámetro, formada durante gigantescas erupciones volcánicas. La depresión (o anfiteatro) formada por el deslizamiento de un flanco de un volcán (colapso de flanco) se denomina **caldera de avalancha**.

Ceniza volcánica: Fragmentos de roca de origen volcánico de tamaño menor a 2 mm de diámetro, expulsados a la atmósfera durante las explosiones volcánicas.

Columna eruptiva: El material piroclástico expulsado por una explosión/erupción volcánica puede ascender verticalmente sobre el cráter, formando una nube de erupción o columna eruptiva.

Conducto volcánico: Pasaje subterráneo por el cual el magma asciende desde una cámara magmática hacia la superficie. Normalmente se trata de una serie de fracturas interconectadas.

Convección: Tipo de transmisión de la energía calorífica en el seno de un fluido. Depende de las características del movimiento del fluido y de su conductividad interna. Un ejemplo de propagación por convección lo constituye el desplazamiento del aire caliente hacia arriba, debido a su menor densidad, propagando el calor en el mismo sentido.

Cráter: Depresión de forma aproximadamente circular de menos de 2 km de diámetro, con paredes internas muy empinadas, generalmente ubicada en la cima de un volcán. Se forman por las explosiones o los colapsos asociados a las erupciones volcánicas.

Dacita: Roca de origen volcánico de color gris claro y enriquecida en sílice (entre 63 y 68 % SiO₂). En estado fundido presenta generalmente una alta viscosidad. Las erupciones de magmas dacíticos son generalmente explosivas (e.g. Guagua Pichincha) y pueden producir enormes lluvias de ceniza, flujos piroclásticos y *domos* de lava.

Datación radiométrica: Método que permite determinar la edad de un material (p.e. una roca o un hueso) a base del decaimiento radiactivo de diferentes elementos analizados químicamente (e.g. *Carbono-14*).

DOAS: Siglas en inglés de Differential Optical Absorption Spectrometer (Espectrómetro de Absorción Óptica Diferencial). Sensor remoto que se utiliza en volcanología para medir el contenido de ciertas especies químicas (p.e. SO₂, CO₂) en las emanaciones gaseosas de los volcanes.

Domo: Aglomeración o abultamiento en forma de cúpula, formado por la acumulación de lava viscosa, caracterizado por presentar flancos muy pendientes. Generalmente, los domos están formados por lavas de composición *andesítica*, *dacítica* o *riolítica* y pueden alcanzar alturas de cientos de metros.

Drenaje: Operación o sistema natural o artificial que permite eliminar el agua contenida en el suelo. Conjunto de quebradas que desalojan el agua de las zonas montañosas.

Dúctil: Dícese de los materiales que admiten deformaciones permanentes en estado sólido, sin llegar a romperse.

Escoria: Fragmentos de roca volcánica formados cuando pequeños volúmenes de lava (generalmente basaltos o andesitas), aún en estado líquido, es expulsada hacia la atmósfera durante explosiones discretas, se enfrían en el aire y caen en forma de fragmentos oscuros rellenos de cavidades.

Estratigrafía: Sucesión de depósitos sedimentarios generalmente divididos en capas. En la sucesión normalmente es posible establecer al menos un orden cronológico relativo en que las capas fueron depositadas.

Estratovolcán: Edificio volcánico de forma cónica, de flancos con pendientes fuertes (> 20°) construido por el apilamiento de coladas de lava y capas de ceniza/escoria emitidas en sucesivas erupciones.

Estromboliana(o): Tipo de erupción volcánica caracterizada por la ocurrencia periódica y

constante de explosiones discretas de pequeña magnitud. En este tipo de erupción existe una importante producción de ceniza y escoria, la cual se acumula en los alrededores del cráter para formar un cono (cono de escoria o cono estromboliano). Este término proviene del volcán Stromboli (Italia).

Frágil: Quebradizo. Dícese de los materiales en estado sólido que al ser sometidos a un esfuerzo o choque se rompen sin deformación plástica previa.

Freático(a): Relativo al agua subterránea. Erupción freática: explosión de vapor, agua y otros materiales, resultado del calentamiento del agua subterránea y de la acumulación de vapor en niveles bajo la superficie. Este tipo de erupción ocurre cuando el agua subterránea entra en contacto con rocas calientes en las cercanías de un cuerpo de magma. En este tipo de erupción el magma no se encuentra involucrado directamente.

Freato-magmática (Erupción): Explosión volcánica que envuelve gases magmáticos y vapor, combinados con lava y otros fragmentos de roca. Este tipo de actividad volcánica es el resultado de la interacción

entre el agua subterránea, del mar o de un lago y el magma.

Fumarola: Emanación de gases y vapor de agua, generalmente a altas temperaturas, que salen de fracturas o grietas de la superficie de un volcán o de una zona con actividad volcánica. El mayor volumen de los gases emitidos corresponde a vapor de agua, sin embargo se encuentran también otros gases como CO₂, CO, SO₂, H₂S, CH₄, HCl, etc.

Glaciar: Gran masa de hielo formada por la acumulación de nieve en períodos de tiempo relativamente largos. Cuando se forman sobre pendientes son capaces de moverse lentamente de manera similar a un fluido viscoso.

Hidrotermal: Relacionado con las fuentes o sistemas de aguas termales o con la acción de dichos fluidos. Se denomina **alteración hidrotermal** a las transformaciones físicas y químicas que sufren las rocas o minerales por acción de los fluidos (agua y gases) calientes asociados a un cuerpo de magma.

Hummock: Montículo o pequeña colina constituida por una secuencia de depósitos rocosos de un volcán que han sido transportados por una avalancha.

Ignimbrita: Depósito consolidado o semi-consolidado de un flujo piroclástico de gran volumen y extensión ($> 1 \text{ km}^3$).

ka: Símbolo utilizado en varias ciencias para abreviar “miles de años”. $1 \text{ ka} = 1\,000$ años.

Lava: Término utilizado para referirse al magma que alcanza la superficie en estado aproximadamente líquido y que ha perdido la mayoría de su contenido en gases. Roca fundida que erupciona de un *cráter* o una fisura eruptiva.

Lapilli: Fragmento de roca volcánica de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm, emitido durante una explosión volcánica.

Lluvia ácida: Ciertos gases magmáticos (SO_2 , Cl, entre otros) emitidos por un volcán en erupción, al entrar en contacto con el agua atmosférica forman ácidos fuertemente corrosivos que caen a la superficie en forma de lluvia.

Magma: Cualquier roca fundida, constituida normalmente por una fase en estado líquido, gases disueltos, cristales de minerales y eventualmente burbujas de gas. Los magmas se forman a grandes profundidades (entre 10 y 100 km) en el Manto o en la Corteza Terrestre. Cuando el magma ha perdido sus gases y alcanza la superficie en estado

líquido se denomina *lava*. Cuando el magma se enfría al interior de la corteza terrestre forma las rocas intrusitas (gabros y granitos).

Nube ardiente: Denominación que a veces se utiliza para los flujos piroclásticos (ver *Flujos piroclásticos*).

Obsidiana: Roca volcánica completamente vítrea (sin cristales), de color negro, verde muy oscuro o café pardo, normalmente translúcida y con composición química de *riolita*.

Piroclasto: Del griego “piros”=fuego, y “clastos”=fragmento. Cualquier fragmento de roca volcánica emitido durante erupciones volcánicas explosivas. Incluye las piedras pómez, cenizas, escorias, etc. Piroclástico: relativo a los piroclastos. **Flujo piroclástico:** avalancha de piroclastos; flujos compuesto de gases, ceniza y bloques, de alta temperatura ($> 300 \text{ }^\circ\text{C}$) y alta velocidad ($> 70 \text{ km/h}$), que ocurren durante fases eruptivas explosivas. Se los conoce también como “nubes ardientes”.

Pliniana(o): Tipo de erupción volcánica caracterizada por una extrema violencia y explosividad, en la cual grandes cantidades de ceniza y otros materiales piroclásticos son

expulsados de manera continua hacia la atmósfera, formando una columna de erupción de varios decenas de kilómetros de altura (generalmente entre 10 y 40 km). El término hace honor a Plinio el Joven, quién observó y describió con gran detalle la gran erupción del volcán Vesubio (Italia) del año 79 DC, la cual destruyó las ciudades romanas de Pompeya y Herculano.

Pómez: Roca volcánica de color claro, llena de cavidades que la hacen muy poco densa (¡frecuentemente pueden flotar en agua!). Generalmente tiene una composición química *dacítica* a *riolítica*. Las cavidades se forman por la expansión de los gases volcánicos durante el ascenso hacia la superficie.

Richter (escala de): Escala que cuantifica la energía liberada por un sismo o terremoto; a esta cuantificación se la conoce como “magnitud” del sismo. Se trata de una escala logarítmica abierta, es decir que en teoría no tiene límite superior ni inferior. Sin embargo, en la práctica, casi todos los sismos detectados en la Tierra tienen magnitudes de entre -1 y 9.

Riolita: Roca volcánica de color claro (casi blanco), que contiene 69% o más de sílice. En

estado líquido presenta una muy alta *viscosidad*. Riolítico: relativo a la riolita.

Viscosidad: Medida de la resistencia de un material a fluir en respuesta a un esfuerzo. La viscosidad de los materiales depende en gran medida de la temperatura a la que se encuentra. Para el caso de los magmas, entre más alto sea el contenido de sílice, mas alta será su viscosidad a una misma temperatura.

Sensor remoto: Instrumento de medición que no necesita contacto directo con el objeto de la medida, sino que se vale de propiedades físicas o químicas del mismo para realizarla de forma indirecta y a distancia.

Sismo: Sacudón del suelo producido por el movimiento abrupto y violento de una masa de roca a lo largo de una falla o fractura de la corteza terrestre. Los volcanes activos presentan una gran variedad de eventos sísmicos. **Sismos de largo período (LP)**, asociados al movimiento de fluidos magmáticos bajo presión en los conductos volcánicos. **Sismos volcano-tectónicos (VT)**, asociados al fracturamiento de rocas bajo un volcán. **Sismos híbridos**, mezcla de varios tipos de señales sísmicas.

Sismicidad: Número de sismos que han ocurrido en una zona (por ejemplo un volcán) en un período de tiempo determinado. La sismicidad es una medida estadística de la actividad de un volcán.

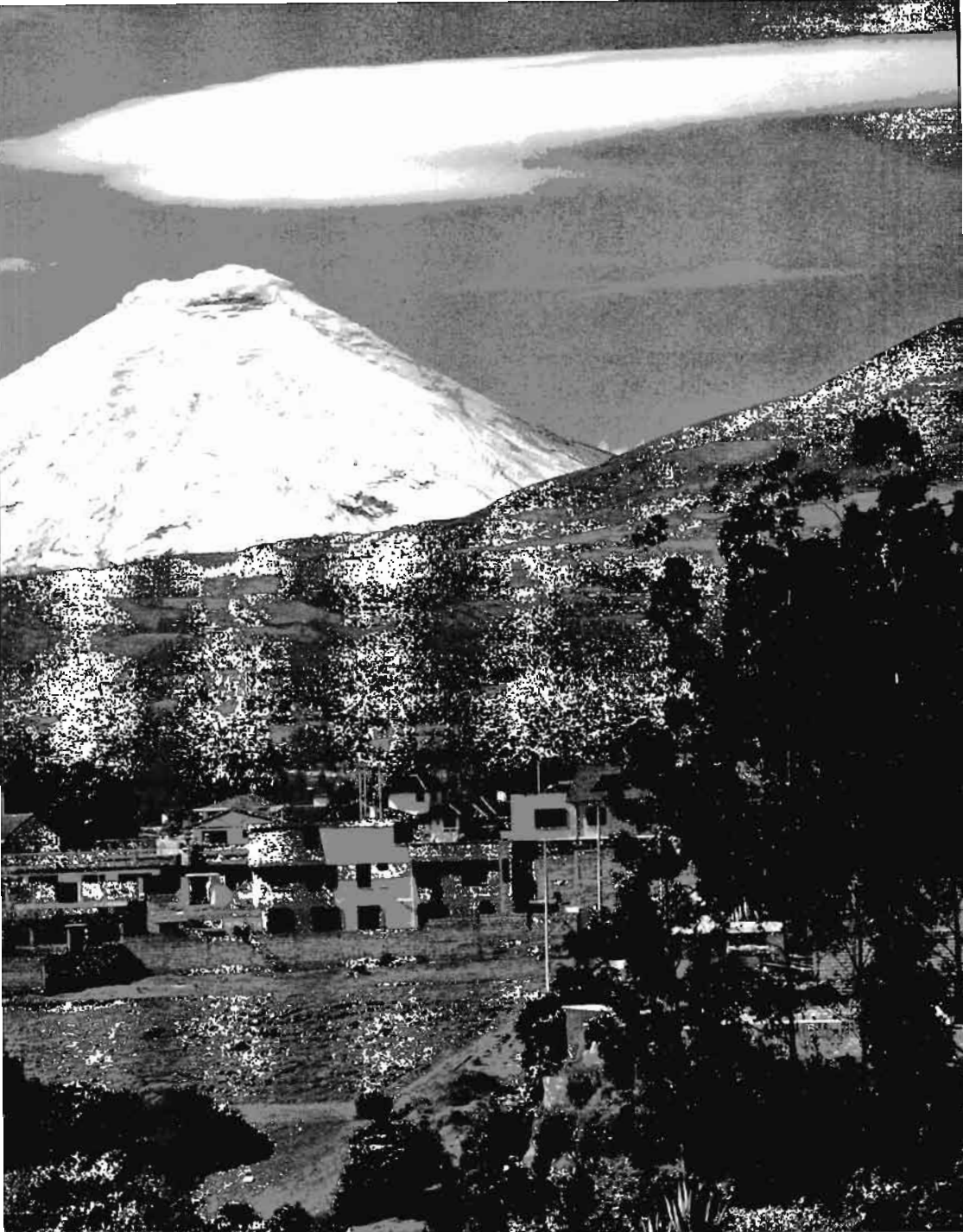
Sismómetro: Instrumento de alta precisión que detecta, amplifica y registra las vibraciones (ondas sísmicas) producidas por los sismos. Existen diversos tipos de sismómetros, dependiendo de las frecuencias de los sismos que se desea detectar. Los **sismómetros de Banda Ancha** detectan un rango de frecuencias muy amplio lo que permite tener mejores interpretaciones del origen y significado de los sismos detectados.

VEI: Siglas utilizadas para abreviar “Volcanic Explosivity Index” (Índice de Explosividad Volcánica). El VEI es una escala ampliamente utilizada para describir el tamaño de las erupciones volcánicas, basada entre otros factores, en el volumen de material emitido. La escala VEI varía entre 0 y 8. Una erupción con un VEI de 0 denota una erupción no explosiva, sin importar el volumen de productos emitidos. Las erupciones con un VEI de 5 o más son consideradas “muy

grandes” y ocurren raramente alrededor del planeta (alrededor de una erupción de éste tipo cada década). Ver también el Anexo 2 para más detalles.

Volcán: Cualquier fractura u orificio de la superficie de la Tierra a través del cual sale *magma*. Con el mismo nombre se denomina a la elevación topográfica que se forma por la acumulación de material volcánico erupcionado desde un cráter.

Vulcaniana(o): Tipo de erupción volcánica caracterizada por la ocurrencia de eventos explosivos de corta duración que emiten material en la atmósfera hasta altitudes del orden de 10 km. Generalmente, este tipo de actividad está asociada a la interacción entre el agua subterránea y el magma (erupción *freato-magmática*).



El Cotopaxi visto desde el Valle de los Chillos. (Foto por P. Mothes).

■ ALGUNOS PROBLEMAS ASOCIADOS CON LA CAÍDA DE CENIZA VOLCÁNICA

(Modificado de Neall, *et al.*, 1999; y Nairn, 1991)

Si usted vive muy cerca a un volcán en erupción, la única protección completamente efectiva ante los fenómenos volcánicos peligrosos es la evacuación. Por el contrario, la gente que vive a distancias moderadas a grandes del volcán puede continuar habitando en sus casas, siempre y cuando adopten algunas medidas de prevención.

El impacto de la caída de ceniza en las personas, animales, plantas, estructuras y maquinarias depende en gran medida del espesor del depósito. Estos efectos pueden verse incrementados en caso de lluvias, pues el peso de la ceniza aumenta al mezclarse o tomar contacto con el agua. Pero, en general, estos efectos pueden disminuirse con ciertas medidas preventivas simples. Con el fin de simplificar la evaluación de los peligros volcánicos asociados con las caídas de ceniza, se han establecido cinco niveles de afectación, en función del espesor de ceniza. En la siguiente tabla se detallan los efectos de las caídas de ceniza sobre los animales y personas, así como en las estructuras, maquinarias y la vegetación. En esta tabla, los espesores corresponden a ceniza no compactada.

**EFFECTOS SOBRE
LAS PERSONAS
Y LOS ANIMALES**

**EFFECTOS SOBRE
LA PROPIEDAD
Y LA VEGETACIÓN**

Espesor de la capa de ceniza inferior a 1 mm ($\leq 0,1$ cm)

Pequeño o ninguno.

Los aeropuertos pueden verse obligados a cerrar por la posible afectación a los aviones.

Irritación ligera de los ojos y las vías respiratorias.

Posible contaminación de las fuentes y/o reservorios de agua.

Problemas de visibilidad y presencia de lodo (en caso de lluvias) en las carreteras.

Podrían presentarse daños en los vehículos u otras maquinarias, debido al alto poder abrasivo de la ceniza.

Espesor de la capa de ceniza entre 1 y 5 mm (0,1-0,5 cm)

Además de los efectos causados por un espesor menor al mm, se puede tener:

Problemas en las vías respiratorias.

Cierre de los aeropuertos y del espacio aéreo sobre el volcán.

Inflamación de los ojos.

Posible afectación a las cosechas.

El ganado puede ser afectado por la falta de alimentación, contaminación de las fuentes de agua o la ingestión de forrajes contaminados con ceniza.

Daños menores en las casas ocasionados por la entrada de ceniza fina, daños en los acondicionadores de aire, bombas de agua, cisternas, computadoras, etc.

Suministro de agua puede ser limitado o nulo.

Posibles cortes de la electricidad y corto-circuitos, si la ceniza fina se acumula en los aisladores eléctricos y si ésta se encuentra saturada con agua.

Contaminación de las fuentes y reservorios de agua.	Las rutas necesitarán limpieza permanente para reducir el riesgo de la pérdida de visibilidad.
Las tareas de limpieza de la ceniza requerirán de grandes cantidades de agua, por lo que la continuidad en el suministro se ve afectada por la gran demanda.	El sistema de alcantarillado puede ser bloqueado por la ceniza o afectado por los cortes en el suministro de agua y electricidad.
Baja visibilidad.	Posibles daños en la maquinaria y otros equipos eléctricos.
Los insectos pueden comenzar a morir, así como algunos animales silvestres pequeños.	El transporte puede ser temporalmente afectado.
Espesor de la capa de ceniza entre 5 y 100 mm (0,5-10 cm) <i>Además de los efectos causados por un espesor menor a 5 mm, se puede tener:</i>	
Serios problemas respiratorios.	Aplastamiento de los pastos y otros arbustos.
El ganado necesitará de alimento traído de otras partes.	El follaje de los árboles puede ser muy afectado, sin embargo la mayoría de árboles pueden sobrevivir.
Los pájaros pueden ser seriamente afectados.	La mayoría de pastizales serán destruidos si el espesor de ceniza es superior a 50 mm.

Pérdida temporal de la visibilidad.

Las cosechas serán seriamente afectadas.

La mayoría de construcciones pueden soportar el peso de la ceniza, sin embargo las edificaciones con estructuras débiles pueden colapsar con espesores cercanos a 100 mm, sobre todo si la ceniza está húmeda.

El tráfico en las carreteras puede ser seriamente afectado por la acumulación de ceniza. Los vehículos pueden sufrir problemas por la acumulación de ceniza en los filtros de aire.

Cortes de la electricidad y peligro de incendios debidos a problemas eléctricos.

Espesor de la capa de ceniza entre 100 y 300 mm (10-30 cm)

Además de los efectos causados por un espesor menor a 100 mm, se puede tener:

Heridos debido al colapso de los techos de las casas.

Si no se realiza la limpieza permanente de la ceniza acumulada en los techos de las casas, estos pueden colapsar, especialmente aquellas estructuras con techos grandes y planos, y si la ceniza está húmeda.

	Daños severos a los árboles, caída del follaje, ruptura de ramas, etc.
Pérdida temporal de la visibilidad.	Destrucción completa de las cosechas.
	Daños en las líneas eléctricas por la caída de ramas de árboles.

Espesor de la capa de ceniza mayor a 300 mm (>30 cm)
Además de los efectos causados por un espesor menor a 300 mm, se puede tener:

Pérdidas humanas debida al colapso de los techos de las casas.	Colapso frecuente de los techos debido a la acumulación de ceniza.
El ganado puede morir o ser seriamente afectado.	Serios daños del suministro eléctrico y problemas en las telecomunicaciones.
Muerte de la vida acuática en lagos y ríos.	El suelo será completamente cubierto de ceniza. Pérdida del uso del suelo por largo tiempo (muchos años).
	Las carreteras son inutilizables hasta su limpieza.
	Destrucción total y extensa de la vegetación.

■ **PROTECCIÓN CONTRA LAS CAÍDAS DE CENIZA**

- La ceniza debe ser removida (con el mayor cuidado posible para evitar accidentes) de los techos de los edificios y de las casas, con el fin de evitar el colapso de los mismos.
- Antes de realizar la limpieza de los techos, se debe constatar que las cañerías del agua lluvia no estén selladas, con el fin de evitar su taponamiento.
- En lo posible se debe tratar de limpiar la ceniza sin utilizar agua, para evitar el aumento del peso de la misma.
- Las estructuras bajas como casetas de telecomunicaciones, hidrantes contra incendios y otras estructuras ubicadas en el suelo deben ser protegidas para evitar que sean cubiertas por la ceniza.
- La ceniza removida manualmente de los techos debe ser dispuesta, en lo posible, lejos de los sitios de acumulación de basura ordinaria.
- En condiciones de caídas severas de ceniza (> 5 mm), las ventanas y puertas de los edificios deben ser selladas para evitar la entrada de ceniza al interior de las edificaciones.
- Todos los tipos de motores deben ser protegidos ante las caídas de ceniza, para evitar su afectación.

Anexo 2

■ ÍNDICE DE EXPLOSIVIDAD VOLCÁNICA (V.E.I., VOLCANIC EXPLOSIVITY INDEX)

El Índice de Explosividad Volcánica (VEI) es una escala ampliamente utilizada para describir brevemente el tamaño de una erupción explosiva. La escala VEI varía entre 0 y 8, y está basada, entre otros factores, en el volumen total de materiales sólidos emitidos durante la erupción volcánica; si bien este parámetro no es el único. Así, por ejemplo, una erupción con VEI= 0 denota una erupción no explosiva, sin importar el volumen total de los materiales emitidos. Las erupciones con un VEI de 5 o más, son consideradas como “muy grandes” y ocurren muy raramente alrededor del planeta (en promedio, alrededor de una de estas erupciones ocurre en cada década).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción general	No explosiva	Pequeña	Moderada	Moderada grande	Grande	Muy grande			
Volumen de tetra (m³)	1×10^4	1×10^5	1×10^7	1×10^8	1×10^9	1×10^{10}	1×10^{11}	1×10^{12}	
Altura de la columna eruptiva (km)	< 0.1	0.1 - 1	1 - 5	3 - 15	10 - 25	> 25	→		
Descripción cualitativa	← "Apacible", "Efusiva" →		← "Explosiva" →		← "Cataclísmica", "Parroxismal", "Colosal" →				
Tipo de erupción	← Hawalena →		← Estromboliana →		← Vulcaniana →		← Piniana →		← Ultra-Piniana →

Modificado de Newhall & Self (1982) y Simkin & Siebert (1994).

■ TESTIMONIOS HISTÓRICOS

Se incluye a continuación tres textos que proveen información sobre diferentes erupciones históricas del Cotopaxi. El primero corresponde a una carta escrita el 16 de marzo de 1745 por Joseph de Jussieu, dirigida a su hermano que vivía en Francia. Como se recordará, en 1743, luego de dos siglos de tranquilidad, el Cotopaxi retomó una importante actividad (ver Capítulo 2), dando lugar a una gran erupción en noviembre de 1744. En su texto, Jussieu resume así lo ocurrido en esos años:

Un nevado de los alrededores, que se llama Cotopaxi, se había despertado después de 200 años, después de tantos años de silencio, para recomenzar a echar fuego y llamas y una gran cantidad de polvo sulfuroso [ceniza] que se iba disipando hasta perderse en las inmediaciones: la hierba y las praderas se ahogaron. La mayor parte del ganado, que no encontró nada que pastar en los campos, murió de hambre y necesidad, y este polvo se extendió más de 60 leguas [300 km] a la redonda. El año pasado, desde el mes de noviembre hasta ahora, hubo los daños más terribles; el fuego interno, que fundió la nieve de la cual estaba cubierta la cima de la montaña, formó un torrente tan terrible que se llevó consigo casas, terrenos, hombres, mujeres, manufacturas de textiles de las comarcas, echó abajo la mayoría de los puentes que desde las calles del poblado cruzan las diferentes corrientes de agua que descienden de esta montaña y nos causaron además, por infección del aire, una enfermedad también llamada Cotopaxi, que no era otra cosa que la parodititis conglomerada.

El segundo texto corresponde a Alexander von Humboldt, y está incluido en la obra *Vues des Cordillères et Monuments*

des Peuples Indigènes de l'Amérique que fue publicada por el explorador alemán en 1810, luego de sus viajes por América del Sur. La mayor parte del texto representa un breve resumen de los testimonios sobre las erupciones del Cotopaxi que Humboldt recogió durante su estancia en el Ecuador.

En 1738, las llamas del Cotopaxi se elevaron a 900 metros por sobre el cráter y en 1744 se oyeron hasta Honda, ciudad del río Magdalena, a 1100 km de distancia, los rugidos del volcán. Fue tan grande la cantidad de ceniza que expulsó el volcán el 4 de abril de 1768, que hizo que la noche se prolongase hasta las tres de la tarde en Ambato y Latacunga, cuyos habitantes se vieron precisados a encender las linternas. La explosión que ocurrió en enero de 1803 fue precedida de un fenómeno horroroso: el súbito derretimiento de las nieves. Hacía más de veinte años que no salía del cráter humo ni vapor visible y, en solo una noche, se hizo tan activo el fuego subterráneo que, al amanecer, las paredes exteriores del cono habían alcanzado considerable temperatura, indudablemente con ese color negro propio de la escorias vitrificadas. A 280 km de allí, en el puerto de Guayaquil, estuvimos oyendo noche y día los espantosos ruidos del volcán, que aún distinguíamos en el Mar del Sur, al Sudeste de la isla de Puna.

Se ha escogido estos dos textos sencillos para ilustrar rápida y pintorescamente lo ocurrido durante algunas de las erupciones del Cotopaxi en el siglo XVIII y principios del XIX. Sin embargo, los estudios volcanológicos muestran con claridad que las erupciones de noviembre de 1744 y abril de 1768 fueron de tamaño considerablemente más grande que la ocurrida en junio de 1877. Los estragos que las dos primeras causaron, no obstante, fueron probablemente menores comparados con los de 1877 debido a que la población y la infraestructura del Ecuador en el siglo XVIII eran más pequeñas.

Finalmente, a continuación se incluye un texto que corresponde a Teodoro Wolf, quien realizó una minuciosa recopilación de observaciones propias y ajenas correspondientes a la erupción del Cotopaxi de junio de 1877, incluidas las obtenidas durante la ascensión que el propio autor realizara hasta el cráter del volcán, en septiembre de ese mismo año. El título de la obra completa es *Memoria sobre el Cotopaxi y su última erupción, acaecida el 26 de junio de 1877* y fue impresa y publicada por la Imprenta del Comercio, Guayaquil, en 1878. En su versión original consta de 48 páginas, una lámina y un mapa topográfico del volcán, por lo que aquí solamente se incluyen los pasajes más interesantes del extenso texto. Wolf dividió su *Memoria sobre el Cotopaxi* en los siguientes capítulos:

- Introducción.
- Topografía de los alrededores del Cotopaxi.
- Constitución geognóstica del Cotopaxi. Algunas corrientes de lava.
- La actividad histórica del Cotopaxi.
- La erupción del 26 de junio de 1877.
- Estado del Cotopaxi después de la erupción. Ascensión a su cráter el 9 de septiembre de 1877.

Las transcripciones que se ofrecen a continuación corresponden principalmente a los capítulos de la obra consagrados a los hechos del 26 de junio de 1877. Vale la pena mencionar que el trabajo de Wolf está basado en gran parte en la excelente descripción de la erupción y sus efectos hecha por el padre Luis Sodiro, en 1877, cuya lectura es muy recomendable.

A fin de que el texto original sea más fácilmente comprensible, se han incluido varias notas al pie de la página, así como breves explicaciones **en negritas**, dentro de corchetes, en

el mismo. Cuando ha sido necesario, se han realizado pequeños cambios del texto original a fin de que la ortografía y puntuación usadas por el autor se adapten a las de la actualidad.

Extractos de:

***Memoria sobre el Cotopaxi y su última erupción,
acaecida el 26 de junio de 1877***

por: Teodoro Wolf, 1878.

■ **LA ERUPCIÓN DEL 26 DE JUNIO DE 1877**

Para que en lo sucesivo la ciencia no haya de quejarse de la falta casi completa de suficientes noticias sobre la última erupción memorable, como sobre las precedentes de este siglo, depositaré en esta Memoria una historia lo más exacta posible de ella (ya que hoy no es costumbre depositarla en los archivos municipales como en los siglos pasados) y luego describiré el estado en que quedó el Cotopaxi después de la erupción y los fenómenos y alteraciones que en él se han notado, para que sirvan de punto de comparación en el desarrollo ulterior del volcán. En la primera parte me valgo de las averiguaciones con los testigos oculares más fidedignos, de los informes oficiales de las autoridades, y sobre todo de la relación minuciosa del Padre Sodiro; también del estudio de los efectos se puede deducir muchas veces la causa. La segunda parte se compondrá de los resultados de la autopsia del cerro y de mi ascensión a su cráter.

■ **Precursores de la erupción**

Desde principios del año de 1877 se observaba casi continuamente una nube o columna de vapor y humo sobre el cráter del Cotopaxi, más fuerte y espesa de lo que solía mostrarse en

tiempos de tranquilidad, y algunas veces iluminada de noche¹. Esta respiración más energética del volcán y repetidas detonaciones subterráneas y sordas que se oían en sus cercanías, hicieron temer que el gigante despertase de su largo sueño. Y en efecto, el 21 de abril, de las siete a las diez de la noche, se verificó la primera erupción considerable, la cual, sin embargo, no causó daño alguno a los poblados, limitándose sus efectos según parece al cono del cerro, y antes sirvió de bellísimo espectáculo a los que la miraban. La espesa columna de humo y ceniza se levantaba a una altura de 200 a 300 metros², “a ratos se iluminaba y a ratos se veía cruzada por grandes cuerpos ígneos, como si fueran peñascos”, y sin duda lo eran. Sobre el labio oriental del cráter parecía derramarse un río de fuego³, y es muy probable que por allí ya en este día se desbordaba lava ígnea, pues se ha observado después, que en el dicho borde se había formado una acumulación negra. La mayor parte de la ceniza caía hacia el lado de Machachi [...].

Desde aquel día el volcán continuaba haciendo pequeñas erupciones de ceniza [...]. Así sucedió por ejemplo el 11 de mayo y en los últimos días del mismo mes. El 25 de junio se repetía casi exactamente la erupción del 21 de abril, pero algo más fuerte [...]. A las 13h15 de la tarde se levantaba una negra columna de humo y ceniza verticalmente del cráter casi al doble de la altura del cerro [...]. El viento que soplabá del Este, llevaba la ceniza a la cordillera occidental, de suerte que la lluvia de ceniza, aunque en Quito y Latacunga se hizo percibir claramente, de nuevo caía más espesa en Machachi [...]. Entre las seis y las siete de la noche se observaba un juego muy vivo de descargas eléctricas alrededor de la cúspide del Cotopaxi [...]. También

1 Esta observación implica que existía magma joven llegando a la superficie, lo que provocaba que la “nube de vapor (gases) y humo (ceniza)” se “ilumine” en las noches.

2 Probablemente la cifra que Wolf quiso referir fue de 2 000 a 3 000 metros.

3 Seguramente se refiere a la ocurrencia de pequeños flujos piroclásticos. En general, las descripciones que se mencionan en esta parte del texto corresponderían al Escenario 2 descrito en el Capítulo 4.

afirman los moradores de Mulaló haber visto en esta misma noche, que se derramaba por el borde occidental del cráter una masa ígnea, que irradiaba una luz viva por la oscuridad.

■ El 26 de junio

Este día infausto, que a centenares de hombre y a millares de animales costó la vida, en que el Cotopaxi convirtió campos amenos en desiertos de arena y piedra y destruyó en una hora el trabajo de muchas generaciones, amaneció claro y despejado, como de costumbre en la estación del verano. [...] a las seis de la mañana, sobre el cielo azul, a lo menos se presentó despejado de su lado Sur y Oeste [...]. Entonces, a las seis y media, poco más o menos, se lanzó de repente una altísima columna de humo y ceniza de su cráter y se expandió tan rápidamente [...] que ya a las ocho en Quito, que dista más de 10 leguas⁴, reinaba un crepúsculo “como durante un eclipse solar”. El polvo volcánico [...] se parecía a una neblina finísima, que iba espesándose más y más, y también la oscuridad avanzaba pronto. [...]. En donde ambos fenómenos volcánicos hacía más impresión por ser más fuertes, era al lado Oeste y Noroeste del volcán.

■ Detonaciones

Todo lo referido no era más que un prelude; pues el acto principal de la tragedia comenzó a las diez del día y se anunció como truenos subterráneos. Aquí tenemos que constatar la circunstancia curiosa, que el ruido subterráneo se oía claramente a muy grandes distancias del Cotopaxi, mientras que apenas se percibía en las cercanías. Parece que en Latacunga casi no era perceptible, pues el largo y continuo estruendo que sus habitantes oían [...] provenía de las avenidas acuosas [**lahares**] que entonces ya comenzaban a formarse y precipitarse de las faldas del cerro; de Quito nos aseguran, que muchas personas no oye-

4 Más de 50 kilómetros. Una legua equivale a 5 kilómetros aproximadamente.

ron los estampidos sordos, que a otros parecían como descargas muy lejanas de artillería. Al contrario, no hay persona en Guayaquil que entre las nueve y las once de aquel día no hubiese oído las fuertes detonaciones que parecían cañonazos disparados [...] detrás de los cerritos al norte de la ciudad. Semejantes detonaciones alarmaban todo el litoral desde Esmeraldas hasta Tumbes [...]. De la misma manera y aún más claramente se oía el ruido subterráneo en toda la provincia del Azuay, sobre todo en Cuenca, entre las nueve de la mañana y la una de la tarde, “como un nutrido combate de fusilería, alternado con terribles detonaciones de cañón”.

No es la primera vez que un fenómeno tan raro se ha notado en las erupciones del Cotopaxi. En la del año 1744 se oyeron los bramidos en Guayaquil y Piura, en Pasto y Popayán, *mientras* (y esto es lo curioso) *en Quito y Latacunga no se percibió ningún ruido*. Otro tanto sucedió durante la erupción de 1768. Confieso, que antes y al escribir mi “Crónica” abrigaba algunas dudas de la exactitud de esas noticias, que ahora debo confirmar como testigo de oídos. [...] ⁵.

■ Erupción de lava

A las diez de la mañana, mientras que en diversos y muy distantes lugares de la República se oían fuertes detonaciones subterráneas, de que acabo de hablar, de repente la lava ígnea en el cráter del volcán entró en efervescencia y ebullición y se lanzaba con una rapidez extraordinaria por las faldas del cono. Casualmente el lado suroeste y la cúspide del cerro estaban despejados en este momento y muchas personas en Mulaló y

5 Luego, Wolf emplea el texto para intentar dar una explicación para este curioso fenómeno. En general, la explicación de Wolf se basa en la idea de que las explosiones ocurrieron a gran profundidad bajo tierra y que no estaban directamente ligadas a la erupción misma en superficie. Actualmente, este fenómeno acústico se explica por la refracción y reflexión que sufren, en las diferentes capas de la atmósfera y troposfera, las poderosas ondas acústicas asociadas a las explosiones volcánicas, lo que da lugar a la formación de zonas de silencio (caso de Quito y Latacunga) y a zonas lejanas donde las ondas refractadas y reflejadas llegan casi intactas (caso de Guayaquil, Pasto, Cuenca, etc.).

Cusiguango eran testigos oculares del temible espectáculo. Con vivos colores pintaron el aspecto espantoso del Cotopaxi en el momento en que una masa negra (la lava) brotaba humeando y en grandes borbollones *sobre todas las márgenes del cráter a la vez* “como la espuma de una olla de arroz que al fuego repentinamente comienza a hervir y derramarse”. En pocos minutos se cubría el cerro de humo [**ceniza**] y vapor [**gases**] que despedía la lava misma, y quedaba invisible durante el resto del día, sobre todo cuando muy pronto la lluvia de ceniza comenzaba a oscurecer la atmósfera. En adelante se oía solamente el estruendo sordo ocasionado por las avenidas acuosas [**lahares**] que no tardaban en formarse. En todo nuestro viaje alrededor del Cotopaxi y sobre todo en la ascensión al cráter teníamos que confirmar a cada paso la observación de los habitantes de Mulaló como muy exacta; pues es en efecto una de las particularidades de esta erupción el que la lava no se derramaba en una o algunas corrientes, sino igualmente en todo el perímetro del cráter, sobre el borde más bajo, así como sobre la cúspide más alta; y es ésta la razón, porque las avenidas de agua [**lahares**], como consecuencias inmediatas del derrame de lava, han sido tan generales en esta ocasión⁶. [...].

Parece que el acto siguiente [**a la formación de los flujos piroclásticos**] fue una renovada y más fuerte erupción de ceniza que duró muchas horas, pues la lluvia de ella se extendía desde entonces muy pronto [**muy rápido**] y espesísima en todas direcciones. Pero antes de hablar de ella tengo que describir el fenómeno más terrible y más desastroso, que acompañó a la erupción de lava como su efecto inmediato, y que contribuyó más que ningún otro a que la catástrofe haya sido una desventura tan grande para el país.

6 Todo este párrafo correspondiente a la “Erupción de lava” representa claramente la descripción de flujos piroclásticos formándose en el cráter y descendiendo por todos los flancos del volcán; es decir que se había llegado al Escenario 3 descrito en el Capítulo 4. Luego, Wolf hace una descripción de los cambios topográficos ocurridos en el cráter como consecuencia de los “derrames de lava” y algunas acertadas observaciones sobre el origen y características de los mismos.

■ **Avenidas de agua y lodo** **[Flujos de lodo y escombros, o lahares]**

La efusión repentina de una enorme cantidad de lava candente [flujos piroclásticos] sobre el cono del volcán cubierto de espesas capas de hielo y nieve, no pudo verificarse sin que se derretiere una gran parte de esas capas. En un mismo momento se producían en todo el contorno del Cotopaxi grandes cantidades de agua que como torrentes o cataratas se precipitaban de sus empinadas faldas. Pocos puntos en las partes medias e inferiores del nevado quedaron exentos del contacto con la lava [flujos piroclásticos] y por consiguiente no tomaron parte en la formación de las avenidas [lahares]. Pero también en los demás lugares el derretimiento de la nieve fue muy desigual, según la cantidad de lava que la tocaba y según que ésta se escurría ligeramente [rápidamente] en los declives muy pendientes, o se demoraba en un terreno menos inclinado. [...]. Algunas de las quebradas superiores convergen hacia abajo, cerca de los límites de la nieve, en una hondura mayor que forma el principio de un “huaico” [quebrada ancha y profunda]. La lava ígnea, aunque en las regiones más altas del cono se lanzaba violentamente por quebradas y cuchillas, cruzando valles y lomas, debía, sin embargo, recogerse en mayores cantidades en aquellas honduras más anchurosas y en ellas empujarse hacia abajo. De esta manera excavaba allá muy anchas y profundas *calles*⁷ en la nieve y en el hielo, y así producía los grandes torrentes de agua. La observación me ha demostrado claramente, que las avenidas [lahares] (llamaremos así a las corrientes de agua y lodo, en oposición a las corrientes de lava) en cada quebrada están en razón directa con la magnitud de las *calles* surcadas en el hielo, que se hallan encima de ella como su continuación directa hacia arriba, y además que la *calle* a su vez

7 Wolf denomina “calles en el hielo” a los gigantescos surcos que se formaron en los glaciares del Cotopaxi una vez que los flujos piroclásticos hubo transitado sobre ellos. Wolf pudo observar y documentar con detalle estos surcos gigantes del glaciar cuando realizó su inspección del volcán en septiembre de 1877.

guarda proporción con la masa de lava ígnea que por ella se ha escurrido. Esta observación es de importancia para la explicación del origen de las avenidas. [...]. Las aguas formadas duplicaron su volumen y fuerza por las sustancias sólidas que recibieron, cuales son peñascos [**grandes bloques**] y trozos de hielo, pedazos de lava nueva, piedra pómez, escorias menores, arena, ceniza, etc.

La quebrada Manzanahuaico tiene en su parte inferior [...] la profundidad de unos cien y el ancho de unos sesenta metros, y a pesar de este espacioso cauce no cabía la avenida inmensa de lodo y piedras que se precipitó por ella; [...]. El Manzanahuaico es solamente una de las ocho o nueve quebradas grandes que del lado oeste bajan a las llanuras de Latacunga y que han contribuido en proporciones semejantes a la inundación general. En las regiones superiores, la mayor parte de las quebradas, aunque angostas, tenían profundidad suficiente para contener las avenidas, pero en donde entraban en las llanuras suavemente inclinadas y las riberas eran bajas, se difundían desenfrenadamente sobre campos, potreros, haciendas, carreteras, destruyendo y arrasando todo cuanto encontraban en su impetuoso curso. La vasta planicie entre Callo y Latacunga ofrecía el aspecto de un gran lago conmovido por una borrasca hasta en su ínfimo fondo. [...].

Según las averiguaciones del tiempo en que llegaba la avenida a diferentes lugares, se puede calcular que desde su entrada en las llanuras, por ejemplo desde Callo o Mulaló, por término medio recorría 10 metros por segundo. Tres horas después de su llegada a Mulaló ya destruía el puente del río Pastaza, al pie del Tungurahua [...]. Pero en las faldas superiores del volcán su rapidez era indudablemente mucho mayor, y hay personas que creen que recorría todo el espacio desde su origen en las nieves del Cotopaxi hasta Latacunga (cosa de siete u ocho leguas [**35 a 40 km**]) en media hora⁸.

8 Estas estimaciones implican velocidades promedio de 70 a 80 km/hora para el lahar.

Fue una gran fortuna para la ciudad [**de Latacunga**] que las avenidas [**lahares**] al norte de ella se dividieran en tres porciones. El río Aláques derramaba [...] una parte de su contenido al vallecito y llano del Ejido en donde el lodo podía extenderse volviendo después en parte al río Cutuchi y llenando en parte el hondo cauce del río Yanayacu que sin ocasionar daños notables lo llevaba por la ciudad. El Cutuchi mismo se desbordaba e inundaba, casi una legua al norte de la ciudad, la larga llanura de Rumipamba que se extiende entre su lecho y el río Pumacunchi. [...]. Si toda la masa de lodo del río Cutuchi reunida con la del Aláques no se hubiese repartido de dicha manera sino embestido a la vez contra la ciudad de Latacunga, en ella tal vez no habría quedado una casa en pie. Aún así los estragos fueron considerables. Más de cincuenta casas a las orillas del río fueron arrasadas y muchas cuadras y huertas quedaron sepultadas debajo de una espesa capa de arena y lodo. [...]. Solo en la parroquia de Mulaló fueron devastadas ocho haciendas grandes y hermosas tan completamente, que de algunas apenas se reconocen los sitios en donde estuvieron [...]. La hermosa carretera fue destruida en gran parte desde Callo hasta Latacunga y aún algunas leguas más debajo de la ciudad; todos los puentes han desaparecido.

La circunstancia de que la terrible catástrofe sucedió de día y antes que comenzara la obscuridad total [**provocada por la lluvia de ceniza**], fue de provecho a muchas personas pues pudieron salvarse y refugiarse en las alturas circunvecinas, sin embargo a muchas otras sucedió en desgracia, porque precisamente en aquella hora la carretera y el camino viejo de Latacunga a Callo estaban llenos de traficantes, sobre todo de arrieros con sus recuas. [...]. Al sur de Latacunga las devastaciones del río Cutuchi fueron todavía muy grandes hasta Baños, al pie del Tungurahua, desde donde entra con el nombre de Pastaza en los solitarios bosques de la provincia Oriental⁹.

9 Actualmente, en esta zona se encuentra construida la represa del proyecto hidroeléctrico Agoyán y, más abajo, la ciudad del Puyo, que podrían ser seriamente afectadas en caso de ocurrir un evento similar al de 1877.

Muy parecida, aunque no tan funesta, fue la avenida [el lahar] que del Cotopaxi se dirigió al norte. Verdad es que por las quebradas del lado norte y noreste bajaron cantidades de agua, lodo y piedras tan considerables y aún más grandes que por las del lado de Latacunga, pero la mayor parte de los materiales y los más gruesos se depositaron en la altura de los páramos, en las llanuras de Limpiopungo, de Saltopamba y de Mudadero. Las pérdidas materiales se limitan en aquella región superior a las numerosas manadas de ganado que en aquel contorno pacían. El río Pita corre, desde su reunión con el río Pedregal, encajonado en una quebrada profunda hacia el valle de los Chillos. Pero al entrar en las llanuras se dividió en algunas brazos y devastó horriblemente ese ameno valle, que bien podría llamársele el vergel de Quito. [...]. Los valles de Tumbaco y de Guayllabamba participaron de las devastaciones del de los Chillos. A las cuatro de la mañana siguiente, es decir, 18 horas después del principio de la catástrofe, llegó la avenida en forma de una creciente del río Esmeraldas al océano Pacífico. El nivel del anchuroso río se levantó algunos pies, y los cadáveres, pedazos de casas, muebles de toda clase, palos, árboles, etc., que flotaban en el agua turbia anunciaron a los habitantes del litoral la desgracia que había sucedido a sus hermanos del interior.

Las avenidas [lahares] del lado oriental [ríos Tambo y Tamboyacu] no pudieron causar estragos tan grandes por hallarse encajonadas desde su principio en valles angostos y hondos. Después de su reunión en el Vallevicioso [ríos Verdeyacu y Jatunyacu] se encaminaron por las solitarias selvas del Oriente, y muy abajo se encontraron con el pueblo de Napo. Allí perecieron unos veinte indios, y muchas casas y chacras de los indígenas fueron arrebatadas. [...].

■ Lluvia de ceniza

Más arriba he dicho que la catástrofe comenzó con una erupción de ceniza y que ésta, después de la eyección de lava [flu-

jos piroclásticos], se repitió con más fuerza y duró muchas horas. Se puede afirmar esto con toda seguridad, aunque la columna de ceniza encima del cráter más tarde quedara invisible, pues en todos los lugares la **[capa de]** ceniza cubre las acumulaciones de la lava nueva así como los depósitos de la avenida acuosa **[lahar]**. También después del mediodía siempre se dirigió hacia la región norte y noroeste, en donde cayó mayor cantidad de ceniza y en donde la oscuridad fue más densa. En Quito, anocheció a la una y media y hubo necesidad de alumbrado artificial; a las cuatro de la tarde las tinieblas fueron tan espesas, que ya no se pudo ver la propia mano aproximada a la vista. [...]. Solamente a las nueve y media de la noche comenzaba a despejarse algún rato el firmamento y a cesar la lluvia **[de ceniza]**. En el valle de Guayllabamba, unas seis leguas al norte de Quito, el oscurecimiento de la atmósfera apenas llegó al crepúsculo que en Quito reinaba a las diez del día, y más allá hacia Ibarra, la caída de ceniza era muy poco perceptible. Tanto más lejos se extendió hacia el occidente. En Guayaquil la lluvia **[de ceniza]** empezó el 26 de junio a las 9 de la mañana y duró con breves interrupciones hasta el 1 de julio. En las primeras treinta horas cayeron aquí 315 kg de ceniza sobre un área de un kilómetro cuadrado, y el 30 de junio calculé su cantidad en 209 kg en 12 horas sobre la misma área. Sobre el vapor “Islay” cayó mucha ceniza el 27 y el 28 de junio, entre Manta y Guayaquil, es decir a la distancia de 3 grados o de 60 leguas **[más de 300 km]** al occidente del Cotopaxi. En estos días el sol no pudo penetrar por las neblinas de polvo ni en las regiones litorales y la vegetación tomó un aspecto ceniciento. Hacia el sur del Cotopaxi la lluvia de ceniza no se extendió mucho más allá de Ambato, y aún en Latacunga fue mucho más débil que en Quito que se halla al doble de la distancia del volcán. No tenemos noticias seguras de la distancia a que se esparciera la ceniza sobre los bosques del Napo, pero bien podemos suponer que en esta dirección oriental la lluvia fue insignificante, pues en aquellos días soplaba casi constantemente un viento del este [...].

En donde la caída de ceniza era más densa, como en los alrededores del cerro, cerca de Quito y sobre la cordillera occidental, iba acompañada de frecuentes rayos y fuertes truenos (tempestad volcánica); pero solamente en la inmediata proximidad del Cotopaxi se condensaron los vapores acuosos de tal modo, que por algún tiempo caían pesadas gotas de lodo en lugar de ceniza.

Las primeras noticias exageraron mucho el daño que la lluvia de ceniza había ocasionado; creo que no fue considerable en ningún lugar que diste más de tres o cuatro leguas [15 a 20 kilómetros] del volcán, sobre todo cuando poco tiempo después de la erupción fuertes aguaceros lavaban los campos y potreros¹⁰. En Machachi, que tal vez ha sufrido más que ningún otro pueblo a causa de este accidente, la ceniza alcanzó apenas dos centímetros por término medio, en Quito cosa de 6 milímetros y en Latacunga aún menos. [...].

La ceniza muy fina que cayó en Guayaquil, consta de fragmentos casi microscópicos de feldespato (plagioclasa) y anfibol, de hierro magnético y partículas amorfas de piedra pómez. El hierro magnético, extraído con imán, constituyó el 26 de junio la tercera parte del peso total de la mezcla, y el 30 del mismo mes casi la mitad. [...]

10 Esta opinión de Wolf no sería del todo válida en la actualidad, ya que basta con recordar los tremendos problemas generados en Quito durante las erupciones del Guagua Pichincha y el Reventador con menos de 4 milímetros de ceniza acumulada. O, por el contrario, ¿se puede imaginar el lector los estragos que causaría una lluvia de ceniza de tres días seguidos en la ciudad de Guayaquil de hoy en día?

Anexo 4

■ Resumen de la actividad histórica del Cotopaxi

Se presenta a continuación un resumen de los más importantes reportes conocidos sobre la actividad del Cotopaxi a lo largo de la historia (modificado de Egred, en prep.). Por su abundancia, se ha preferido no mencionar aquí las fuentes de la información excepto en algunos casos especiales.

1533, jun	Erupción con formación de flujos piroclásticos, abundante lluvia de ceniza, posibles coladas de lava y grandes lahares. Destrucción de seis o siete pueblos indígenas. Erróneamente, esta erupción es muchas veces ubicada en los años 1532 ó 1534.
1740-1741	Posible actividad moderada. Actividad previa a las grandes erupciones de 1742. No se reportan estragos.
1742, jun 15	Importantes erupciones con la formación de flujos piroclásticos y extensas lluvias de ceniza y lapilli. Se formaron lahares que provocaron destrucción en las cercanías del volcán. Una segunda fase de magnitud similar ocurrió el 16 de julio del mismo año.
1742, dic 09	Es la erupción de mayor magnitud de este año. Se produjeron extensas lluvias de ceniza, flujos piroclásticos y grandes lahares en el río Cutuchi. Graves estragos en Latacunga. En los campos murieron cientos de personas y animales; se destruyeron puentes, obrajes y molinos, así como casas y haciendas.

1743, sep 28	Nueva fase de actividad intensa. Caídas de ceniza y lapilli más intensas que en 1742, aunque los lahares formados fueron de menor tamaño. Menores estragos debido a que casi todo había sido ya destruido en 1742.
1744, nov 30	La actividad que se mantenía en nivel bajo remonta súbitamente en esta fecha y se produce una de las grandes erupciones históricas del Cotopaxi. Se produjeron grandes flujos piroclásticos que funden extensamente el glaciar del volcán. Grandes lahares fluyeron por los sistemas de los ríos Cutuchi, Pita y Tamboyacu. La acumulación de ceniza y lapilli a más de 20 km del volcán fue superior a los 12 cm. Lo poco que se salvó en las erupciones de 1742 y lo que se había reconstruido quedó definitivamente destruido en esta fecha. Gran cantidad de fatalidades.
1745	Actividad remanente. Emisiones de ceniza y explosiones esporádicas.
1747-1749	Posible actividad de bajo nivel. No existen evidencias en las crónicas antiguas en estos años.
1750, sep 01 al 06	Se reportan fuertes “detonaciones del volcán”.
1758	Posible explosión fuerte. No confirmada.
1760, feb	Erupción pequeña, no confirmada. Pudo tratarse del Antisana.
1766, feb 10	Erupción de magnitud mediana a grande. El volumen de los lahares, que nuevamente inundaron Latacunga, implica que se produjeron extensos flujos piroclásticos. Según Wolf, los lahares de esta erupción tuvieron mayor volumen que los de 1744 y causaron graves daños. También se produjeron extensas lluvias de ceniza y piroclastos al occidente del volcán que causaron nuevos estragos en la renaciente agricultura y ganadería.

1768, abr 02	<p>Gran erupción del Cotopaxi. Nuevamente grandes lahares bajaron y desbordaron los cauces de los ríos Cutuchi, Pita y Tamboyacu. Inundaciones y destrucción en el valle de los Chillos, Latacunga y Puerto Napo. Extensas zonas de ganadería y cultivo, puentes, caminos, fábricas y haciendas quedaron arrasadas.</p> <p>La lluvia de ceniza y lapilli fue más extensa que en otros años: en las cercanías del Cotopaxi la acumulación fue de casi 1 metro de espesor, en Quito de 3 cm; la ceniza llegó hasta Pasto; en Latacunga la oscuridad absoluta duró 9 horas. En algunos pueblos, los techos de las casas se hundieron bajo el peso de la ceniza.</p>
1803, ene 04	Erupción de magnitud moderada. Se produjeron lahares pequeños y de poco recorrido. No hubo consecuencias importantes.
1832, jul 14	Explosión de tamaño moderado.
1843-1 844	Explosiones y columnas de ceniza. Se produjeron lahares que causaron daños tales como la destrucción del nuevo puente sobre el río Cutuchi, en Latacunga.
1851, ago 21	Explosiones y emisiones de ceniza que se dirigieron hacia el oriente.
1852, mar 02	Pequeña explosión; nube de ceniza.
1853, sep 13	Erupción de magnitud moderada, con lluvias de ceniza y lahares medianos. Pequeños flujos piroclásticos sobre el flanco occidental del volcán.
1854, sep 09	Pequeñas erupciones. Actividad moderada durante este año, con fases eruptivas importantes entre el 9 y el 12 de septiembre. Se formaron flujos piroclásticos y lahares considerables que fluyeron por los ríos Cutuchi y Tamboyacu. Se destruyeron casas y sembríos, y murió mucho ganado.

1855, jun 05	Erupción de magnitud moderada, con emanación de importantes columnas de ceniza y flujos piroclásticos. Lahares bajaron otra vez por el río Cutuchi y destruyeron el puente de Latacunga. Los documentos históricos indican que, hasta el 1 de julio del mismo año, el Cotopaxi continuaba con actividad importante.
1856	Durante este año se produjeron al menos dos erupciones de pequeña magnitud. El 21 de mayo, los flujos piroclásticos bajaron sobre el flanco oriental del volcán. Una pequeña explosión ocurrió el 2 de octubre. Se reporta también actividad durante el mes de diciembre.
1857	Actividad de bajo nivel, interrumpida por períodos largos de calma.
1858, jun	Entre junio y diciembre se produjeron explosiones y emisiones de ceniza considerables.
1859	Actividad baja. Explosiones pequeñas esporádicas.
1860, sep 20	Nueva explosión importante.
1862, nov 01	Explosión fuerte. Caída de ceniza en Quito.
1863	Explosión pequeña. Posible colada de lava saliendo desde el cráter.
1864	Bramidos del volcán escuchados todo el año, especialmente en los meses de junio, julio, septiembre y noviembre.
1866, sep 16	Explosiones acompañadas de bramidos. Posibles flujos piroclásticos saliendo del cráter; no confirmado.
1867	Pequeñas explosiones
1868, ago 15	Pequeña explosión, con nube de ceniza.
1869	Pequeñas explosiones entre julio y agosto.
1872-1875	Período de baja actividad, con esporádicas emisiones de ceniza pequeñas. Actividad fumarólica.

1876, dic	A partir de este año la actividad incrementa. Explosiones pequeñas y emisiones de ceniza. Fueron señales premonitoras de la gran erupción del año siguiente.
1877, abr 21	En esta fecha el Cotopaxi incrementa su actividad paulatinamente hasta llegar al 25 y 26 de junio cuando se produce una fase eruptiva de gran magnitud. El 26 de junio se produjeron extensos flujos piroclásticos que dieron lugar a la formación de lahares que fluyeron por los ríos Cutuchi, Pita y Tamboyacu provocando extensos daños. Las caídas de ceniza y lapilli se registraron en Quito, Machachi, Latacunga, Ambato y en las provincias costeras de Guayas, Manabí y Esmeraldas. (Más detalles en el Anexo 3).
1878, ago 22	En esta fecha se inicia una pequeña erupción que se intensifica al día siguiente con la formación de grandes columnas y nubes de ceniza que se transportan al occidente. También se formaron lahares, pero fueron de tamaño pequeño.
1879, feb 29	Erupción de magnitud moderada. Importantes caídas de ceniza y lapilli hacia el oriente del volcán. La actividad duró, con altibajos, casi ocho días consecutivos.
1880, jul 02	Pequeña erupción con emisión de una nube de ceniza.
1882, feb	Entre febrero y marzo de este año, el Cotopaxi tuvo varias explosiones pequeñas que provocaron leves caídas de ceniza al occidente del volcán.
1883	Explosiones ocurridas entre agosto y diciembre (no confirmadas).
1885	Pequeña erupción con nubes de ceniza, pequeños flujos piroclásticos y lahares de poco volumen.
1886, ene	Pequeña erupción. Nube de ceniza al occidente.
1903, oct 01	Se observan pequeños flujos piroclásticos (no confirmado) sobre el flanco oriental del volcán. Importante lluvia de ceniza en la zona occidental.

1904, sep 20	A partir de septiembre se produjeron varias explosiones, con formación de importantes nubes de ceniza.
1905, mar 15	Lluvia de ceniza al occidente del volcán. Se atribuye a la actividad del Cotopaxi.
1905, dic 31	Ocurren algunas explosiones de tamaño moderado que provocan caída de ceniza en la Hacienda de Callo.
1906, ene 01	Explosión con nube de ceniza y bombas que caen en los flancos altos (actividad estromboliana).
1907, oct	Explosiones con columnas de ceniza. Posible flujo piroclástico de tamaño pequeño.
1911, feb	Nubes de ceniza. En septiembre ocurrió una leve lluvia de ceniza en Quito, que fue atribuida al Cotopaxi.
1912, feb	Entre febrero y marzo se escucharon frecuentes bramidos y "ruidos subterráneos". Se observó leves emisiones de ceniza.
1914, mayo	Un reporte, el 15 de mayo, indica que el volcán "estaba como de costumbre con una columna de humo en el cráter". Hubo una leve caída de ceniza en Quito atribuida al Cotopaxi.
1926	Posible explosión (no confirmada).
1928-1930	Actividad fumarólica en el cráter.
1931	Posible explosión pequeña (no confirmada).
1939, feb 02	Posible explosión pequeña.
1940	Posible explosión (no confirmada).
1942, feb 17	Posible explosión (no confirmada). Actividad fumarólica en el cráter.
1975, jul	Incremento de la actividad fumarólica a nivel del cráter. Los andinistas reportan "fuerte olor a azufre".

■ LOS ANDINISTAS Y LOS VOLCANES ECUATORIANOS

Las cumbres nevadas de los volcanes Andinos han fascinado desde siempre a los habitantes y visitantes de estas zonas. Después de un largo período de respeto religioso hacia estos nevados, los exploradores europeos, entre los cuales conviene citar a Humboldt, La Condamine, Whymper, Reiss, Stubel y Meyer, entre otros, ofrecieron los primeros reportes detallados de las ascensiones a las cumbres ecuatorianas.

En la actualidad, el acceso relativamente fácil al pie de los glaciares, la existencia de refugios confortables, el dinamismo de las asociaciones de andinismo locales y la gran cantidad de turistas que visitan el país para intentar alcanzar los principales cumbres de más de 5 000 metros de altitud, hacen que, durante la mayor parte del año, numerosos ascensionistas, junto con guías profesionales que hacen del andinismo su fuente de sustento, puedan alcanzar las cumbres ecuatorianas a lo largo de casi todo el año.

Con la sola excepción de El Altar, un volcán apagado de la Cordillera Real de los Andes Ecuatorianos, la gran mayoría de los volcanes ecuatorianos que sobrepasan los 5 000 metros de altura constituyen volcanes potencialmente activos; citemos por ejemplo el Cayambe, Antisana, Cotopaxi, Chimborazo o Sangay. El Tungurahua, en actividad desde 1999, es también una cumbre preciada por los andinistas, sin embargo, su ascensión está por el momento estrictamente prohibida. Con raras excepciones, un volcán en reposo no entra en actividad sin dar

señales precursoras de su cambio de actividad. Así, los científicos disponen de diversos métodos de vigilancia que permiten determinar el estado de un volcán (Ver Capítulo 4). En este sentido, las personas que realizan ascensiones periódicas son una fuente potencial de información complementaria que puede resultar muy interesante. En particular, los guías de alta montaña o los andinistas experimentados que realizan las ascensiones de manera periódica pueden proporcionar datos relativos a cambios morfológicos en la cumbre o en la ruta de ascenso, cambios en la actividad fumarólica, etc. A continuación se presenta una “Ficha de observaciones” a ser llenada y reportada al Instituto Geofísico por quienes observen cambios en el volcán.

FICHA DE OBSERVACIÓN

A ser enviada al
Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional
Ap. 17-01-2759, Quito-Ecuador
Fax: (593)-2-256 7847
Email: geofisico@igepn.edu.ec

Nombre:

Dirección:

Teléfono(s):

Email:

Acompañantes:

Volcán:

Fecha de la observación:

Hora de la observación:

Lugar preciso de la observación (ruta de ascenso, altura, punto GPS):

.....
.....
.....

Tipo de observación (ruidos, olor a gases sulfurosos, temblor, avalancha de rocas o hielo, cambios importantes en el paisaje, presencia de fumarolas nuevas, cambios en fumarolas antiguas, aparición de fracturas, etc); descríbala con el mayor detalle, incluyendo comparaciones y, si es posible, medidas o estimaciones cuantitativas:

.....
.....
.....

Calidad de la información (visibilidad/nubosidad, velocidad del viento):

.....
.....

Repetición de la observación (¿a la subida o al descenso?):

.....
.....

Información complementaria disponible (fotos, filmaciones, muestras):

.....
.....

■ LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL COTOPAXI

En el Capítulo 4 se describieron los métodos que se utilizan en el Instituto Geofísico para vigilar el Cotopaxi y otros volcanes del Ecuador. Sin duda, uno de los criterios más importantes para describir el estado de actividad de un volcán viene dado por su actividad sísmica. Los datos de sismicidad obtenidos mediante la red de sismógrafos instalados en el Cotopaxi permiten realizar estudios geofísicos detallados sobre el origen y localización de dichas señales sísmicas, así como de la estructura del volcán. Pero, para tener una idea simple del estado de actividad de un volcán, basta con realizar el conteo del número de sismos ocurridos en un período de tiempo fijo; por ejemplo, el número de sismos que ocurren cada mes. Si con estos conteos se construye un histograma, se puede obtener una imagen simple pero muy concreta sobre la evolución de la actividad del volcán a lo largo del tiempo (ver Figura 34).

En este Anexo se incluye un histograma de la sismicidad mensual del Cotopaxi registrada a partir de enero de 2000 hasta mayo de 2005. Se ha dejado, además, espacio en blanco para los años siguientes a fin de que el lector pueda llevar su propio registro de la actividad del Cotopaxi (Fig. 38). Los datos de sismicidad mensual del Cotopaxi necesarios para llenar este histograma pueden ser obtenidos en el sitio web del Instituto Geofísico: www.igepn.edu.ec

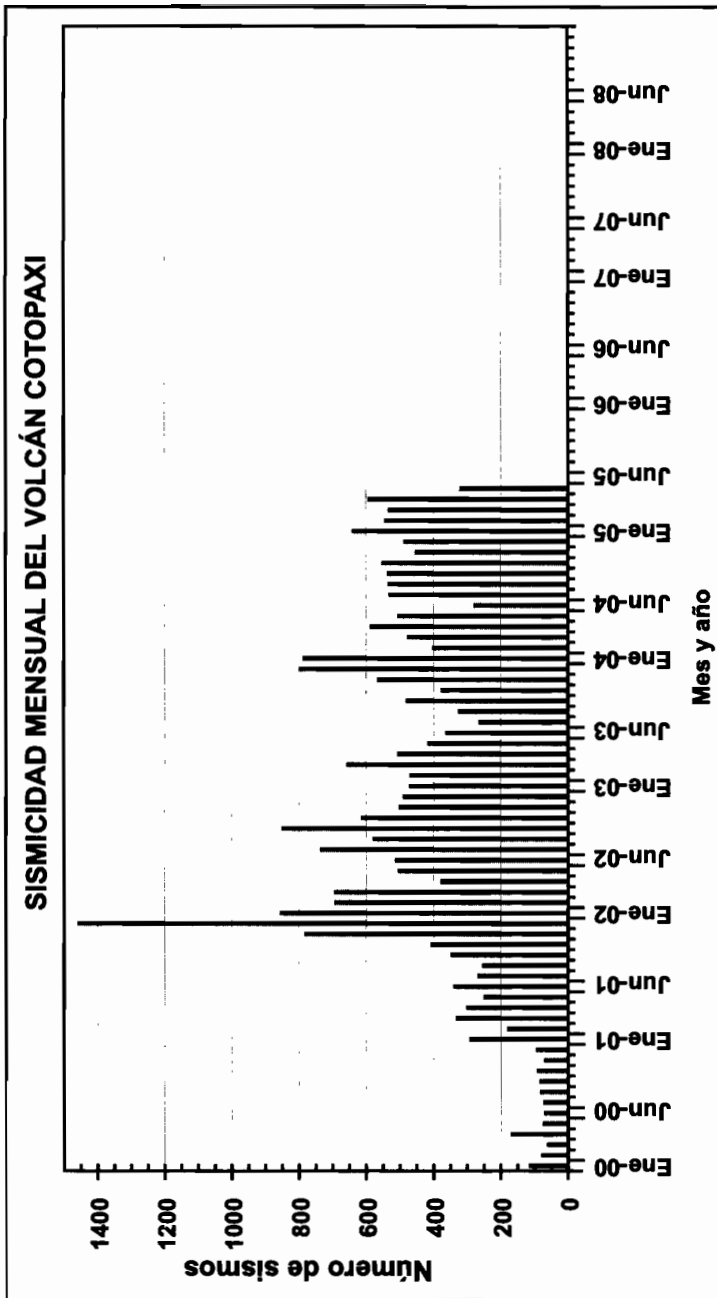


Figura 38. Histograma con la sismicidad mensual del Cotopaxi a partir de enero de 2000 que puede ser completado por el lector en el futuro con datos sísmicos obtenidos en la página web del Instituto Geofísico: www.igeqn.edu.ec

■ **Excursión de observación de depósitos recientes del volcán Cotopaxi**

Esta pequeña excursión consta de 3 **paradas** o sitios de observación que se encuentran ubicados principalmente a lo largo del camino de entrada al Parque Nacional del Cotopaxi que empieza en la carretera Panamericana. En cada parada se puede realizar diversos tipos de observaciones vulcanológicas simples. En este Anexo se describirá, para cada **parada**: 1) su ubicación y la forma de llegar, 2) las observaciones generales que se puede realizar, y 3) las observaciones geológicas que se puede realizar.

Parada 1. Río Cutuchi-Canteras de piedra

En el río Cutuchi han ocurrido cerca de 11 lahares grandes a lo largo de la historia (a partir del año 1532) y muchos otros en la pre-historia. En la Figura 3 (Capítulo 1) se puede observar que todas las quebradas del flanco occidental del Cotopaxi y algunas del flanco sur son tributarias del río Cutuchi, por lo que los lahares que pueden correr por el mismo han sido siempre de tamaño muy importante y han dejado depósitos impresionantes.

Para llegar al sitio de observación, se debe tomar el camino hacia la entrada al Parque del Cotopaxi, desde la carretera Panamericana, y conducir por ~1,1 km hasta encontrar la entrada a las canteras donde se explota el material pétreo de los depósitos de lahares, que se encuentran a la derecha del camino. En

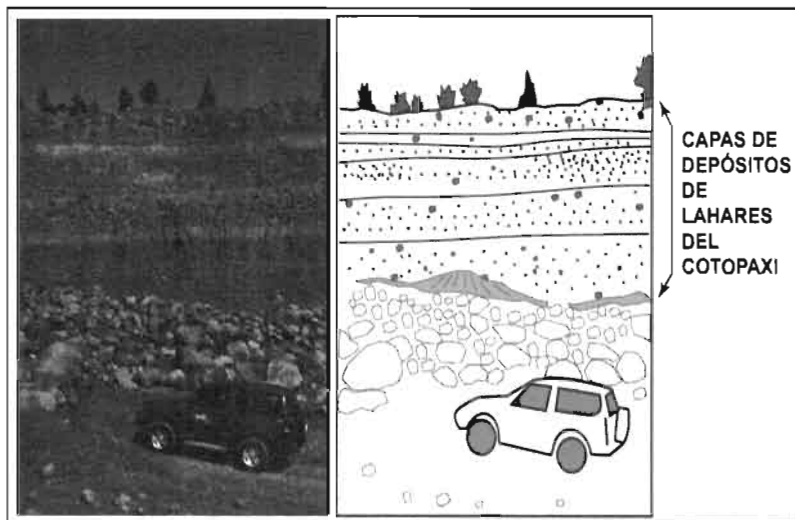


Figura 39. Corte con los depósitos de lahares recientes (históricos) que se observan en las canteras del río Cutuchi, cerca de la entrada al Parque Nacional del Cotopaxi (Foto: D. Andrade).

esta cantera se puede observar el espesor que tuvieron estos flujos en el pasado, que en total supera fácilmente los 20-25 metros (Fig. 39). También se puede observar el tipo y tamaño de los bloques que fueron transportadas por estos flujos, muchos de los cuales pueden tener más de 2 metros de diámetro.

En este sitio, se estima que los lahares pueden haber tenido velocidades de entre 60 y 80 km/h. ¿Se imagina el lector los daños que puede provocar tan solo uno de los bloques de 1 metro de diámetro viajando a 70 km/h? ¿Cuántos de estos bloques se pueden contar en cada depósito de lahar de la cantera?

Parada 2. Campamento Mariscal Sucre-Caídas de ceniza y lapilli

Luego de las canteras del río Cutuchi, se conduce por ~16 km, hasta llegar al Campamento-Museo “Mariscal Sucre”. En esta zona, a los lados del camino, se pueden observar cortes que presentan sucesiones de varias capas de ceniza y lapilli producidas por erupciones históricas y pre-históricas del Cotopaxi (Fig. 40).

Cada una de estas capas representa una erupción relativamente importante del Cotopaxi, que produjo una lluvia de ceniza y lapilli suficientemente importante para que no sea borrada por la erosión. Varias de las capas de ceniza que se observan en esta zona corresponden a erupciones históricas del Cotopaxi. La capa que está más cerca de la superficie (espesor menor a 10 cm), compuesta de ceniza gruesa y cascajo fino de color oscuro (casi negro), corresponde a la erupción del 26 de junio de 1877.

¿Recuerda el lector el paisaje de la ciudad de Quito luego de la caída de ceniza del volcán Reventador en noviembre de 2002? Esa caída de ceniza no superó los 5 milímetros de espesor. Ahora, imaginemos el impacto que tendría en la actualidad una caída de ceniza de 30 milímetros (3 cm) de espesor, como ocurrió en abril de 1768 en Quito. Finalmente, determine el lector ¿cuál es el espesor de la capa de ceniza y lapilli más gruesa que se observa en los cortes del camino al Campamento “Mariscal Sucre”?



Figura 40. Capas de ceniza y lapilli observadas en los cortes del camino cerca al Campamento-Museo “Mariscal Sucre”, en el Parque Nacional del Cotopaxi. (Foto: E. Calahorrano).

Parada 3. Zona de la planicie de Limpiopungu

Desde la zona del Campamento-Museo “Mariscal Sucre” se conduce en dirección de la planicie de Limpiopungu. En los primeros kilómetros de esta zona plana el paisaje es bastante llano y relativamente cubierto de vegetación. Sin embargo, luego de pasar por la laguna de Limpiopungu en dirección del Refugio del Cotopaxi, el camino empieza a transitar por una zona que se encuentra cubierta por grandes bloques de roca (Fig. 41). Estos bloques corresponden a los depósitos del lahar del 26 de junio de 1877 que fluyó hacia el norte del Cotopaxi, por los ríos Pita, Salto y Santa Clara (Figs. 3 y 11).

Como puede verse, una gran parte del volumen total del lahar formado en esa fecha se quedó bloqueado en la planicie de Limpiopungu, y lo mismo se esperaría que suceda en futuras erupciones. ¿Puede el lector hacer una estimación del área total que fue cubierta por el lahar del 26 de junio de 1877 en la zona de Limpiopungu?



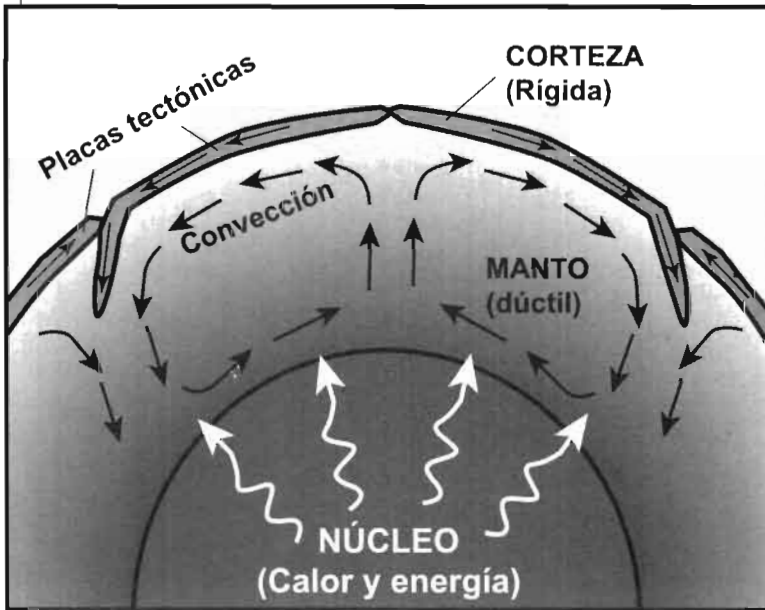
Figura 41. Vista parcial de la planicie de Limpiopungu, al pie norte del cono del Cotopaxi. Se puede determinar con claridad los límites de las zonas que han sido inundadas por lahares, ya que están cubiertas por bloques de rocas volcánicas. (Foto: P. Mothes).

Anexo 8

■ ORIGEN DEL VOLCANISMO EN EL ECUADOR

En los últimos 50 años, los estudios de geofísica y geoquímica en todo el mundo han mostrado que el planeta Tierra está constituido por tres grandes capas concéntricas: la Corteza, el Manto y el Núcleo (Fig. 42). La Corteza terrestre es la capa más externa, conforma los continentes y el piso de los océanos, tiene un espesor variable de entre 10 y 100 km, y se caracteriza por presentarse en estado sólido y tener un comportamiento *frágil*, es decir que al ser sometida a esfuerzos se rompe a través de fracturas (fallas geológicas).

■ **Figura 42.** Corte esquemático a través de la Tierra. Se presentan las principales capas que conforman el interior del planeta. El espesor de la Corteza es de apenas entre 10 y 100 km, mientras que el Manto tiene un espesor de 2 900 km y el Núcleo uno de 3 500 km.



El Manto es la capa más voluminosa de la Tierra. Tiene un espesor de 2 900 km y se encuentra inmediatamente bajo la Corteza terrestre. El Manto se caracteriza por encontrarse en estado casi sólido, pero tiene una temperatura mucho mayor que la Corteza. Además, el Manto tiene un comportamiento *dúctil*, es decir que al ser sometido a esfuerzos no produce fracturas, sino que se deforma de manera similar a la plastilina.

Por último, el Núcleo de la Tierra es la capa más interna, con un espesor de 3 500 km. La parte externa del núcleo se encuentra en estado casi líquido, mientras que la parte interna es sólida. El Núcleo está muy caliente y emite enormes cantidades de calor y energía, los cuales son capaces de provocar movimientos de *convección* en el Manto a lo largo de millones de años (Fig. 42). Durante estos movimientos de *convección*, el Manto arrastra en diferentes direcciones a la delgada Corteza que se encuentra encima, lo que provoca que la superficie de la Tierra esté dividida en grandes segmentos conocidos como “Placas tectónicas”.

Al moverse, las Placas tectónicas pueden generar tres tipos de límites entre sí: 1) límites de divergencia (cuando dos placas se separan una de otra); 2) límites de transcurrencia (cuando dos placas se deslizan una junto a la otra); y, 3) límites de convergencia (cuando dos placas chocan una contra otra) (Fig. 43). La velocidad promedio de movimiento de las placas tectónicas es solamente de pocos centímetros por año, pero al moverse por millones de años pueden recorrer distancias importantes. Por ejemplo, una placa que se mueve a 5 cm/año durante 2 millones de años recorrerá una distancia de 100 km. Calcule el lector las distancias que pueden haber recorrido las placas y los cambios que han sucedido desde la extinción de los dinosaurios, hace 64 millones de años. La Tierra tiene una edad de cerca de 5 mil millones de años.

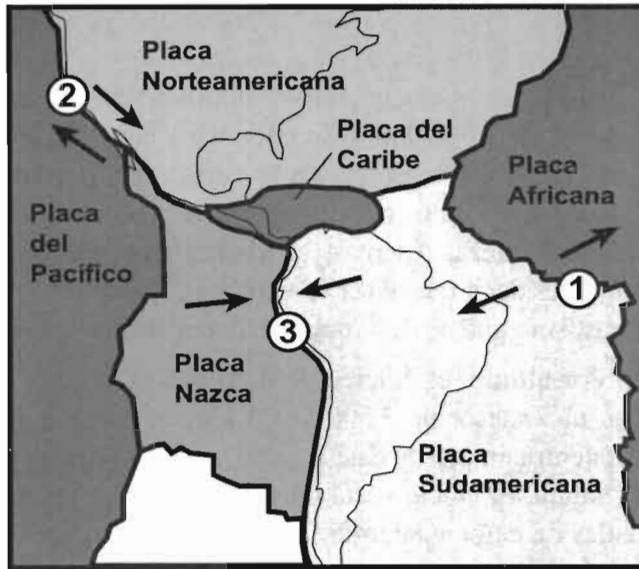


Figura 43. Representación de las diferentes “placas tectónicas” presentes en la zona de América. Las líneas gruesas representan los límites de las placas. 1) Límite de divergencia (las placas Sudamericana y Africana se separan una de la otra); 2) Límite de transcurrancia (la placa del Pacífico se desliza junto a la placa de Norteamérica); y, 3) Límite de convergencia (la placa Nazca choca con la Sudamericana).

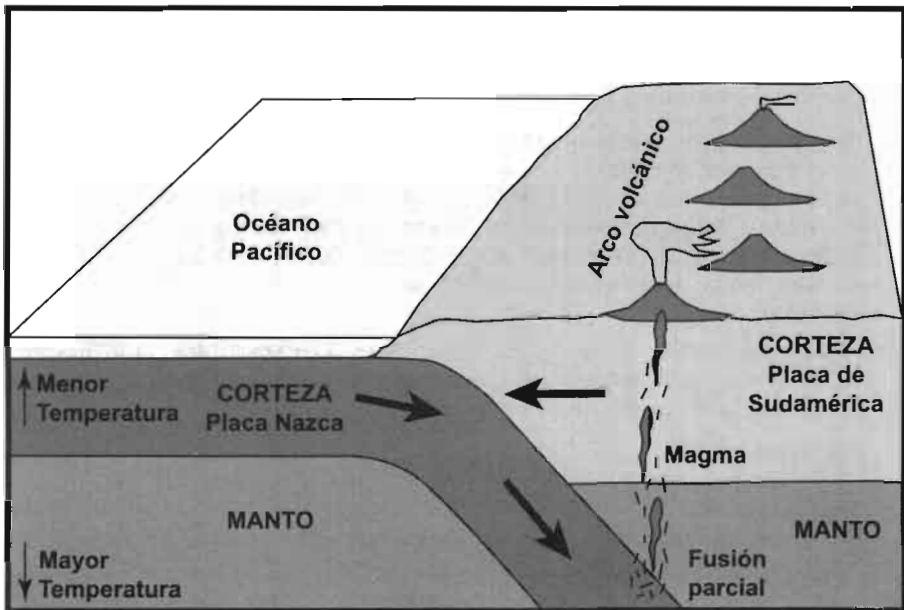
El Ecuador se encuentra en una zona donde dos placas tienen un límite de convergencia: son las placas de Nazca y de Sudamérica (Fig. 43). En realidad, la placa de Nazca choca y luego se sumerge bajo la placa Sudamericana, entrando poco a poco al Manto terrestre, lo cual ocurre principalmente porque la placa Nazca es más densa que la placa Sudamericana (Fig. 44). Este proceso se conoce como “subducción de la placa Nazca bajo la Sudamericana”.

Al entrar en el Manto, la placa Nazca alcanza regiones cada vez más profundas y calientes, hasta el punto en que la temperatura es tal que llega a fundirse parcialmente, dando lugar a la formación de *magmas* (roca fundida). Estos magmas recién formados encuentran su camino hacia la superficie a través de las fracturas de la Corteza y forman volcanes al llegar a superficie (Fig. 44).

Otras zonas de subducción importantes se encuentran a casi todo lo largo de los Andes, en Centroamérica, en Alaska, en las islas Aleutianas, en Kamchatka, Japón e Indonesia. Todas estas zonas forman parte del Cinturón de Fuego del Pacífico.

Por supuesto, el origen del vulcanismo que se ha descrito aquí es muy esquemático y generalizado. La manera exacta como los magmas se forman en el Manto y los procesos que intervienen en su transporte hacia la superficie son muy complejos en la realidad, y en el caso del Ecuador aún no han sido comprendidos en su totalidad. Finalmente, vale mencionar que existen otras maneras de formar magmas en el Manto de la Tierra, diferentes a los magmas de las zonas de subducción (por ejemplo el caso de Galápagos, o el caso de las Cordilleras Oceánicas), pero esto no será discutido aquí.

Figura 44. Diagrama esquemático que muestra la subducción de la placa Nazca bajo la Sudamericana. Al llegar a zonas del Manto que tienen alta temperatura, la placa Nazca se funde parcialmente y da lugar a la formación de magmas. Estos magmas forman volcanes al llegar a la superficie.



Referencia de este libro:

Daniel Andrade, Minard Hall, Patricia Mothes,
Liliana Troncoso, Jean-Philippe Eissen, Pablo Samaniego,
José Egred, Patricio Ramón, David Rivero, Hugo Yepes
2005

Serie Los peligros volcánicos en el Ecuador, No. 3

Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi
Corporación Editora Nacional, IG-EPN, IRD.

Este libro es la continuación de la serie *Los peligros volcánicos en el Ecuador*, preparada por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito y la Unidad de Investigación *Procesos y riesgos volcánicos* del IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*: Instituto Frances de Investigación para el Desarrollo) dentro de un convenio de cooperación existente entre estas entidades.

Títulos publicados:

No 1: Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua

No 2: Los peligros volcánicos asociados con el Cayambe

En preparación:

No 1: Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua.

Segunda edición.

No. 4: Los peligros volcánicos asociados con el Pichincha

¿Cómo es el volcán Cotopaxi? ¿Cuál ha sido su comportamiento histórico? ¿Qué tipo de fenómenos volcánicos se producen en él? ¿Cómo es vigilado por los técnicos? ¿Qué sucedería en caso de erupción? ¿Cuáles son los peligros ante los que la ciudadanía debe estar preparada?

Este libro responde a estas inquietudes que actualmente son parte de la vida cotidiana de grandes sectores de población.

