

Jean-Philippe Eissen<sup>1,3</sup>  
Bernardo Beate<sup>2</sup>  
Minard L. Hall<sup>3</sup>  
Alain Laraque<sup>1,4</sup>  
Bernard Francou<sup>5</sup>  
Bolívar Cáceres<sup>4</sup>  
Michel Monzier<sup>6</sup>  
Joseph Cotten<sup>7</sup>  
Daniel Andrade<sup>3</sup>  
Catalina Cerón<sup>4,8</sup>  
Silvana Hidalgo<sup>3</sup>  
Teresa Muñoz<sup>3</sup>

- 1 Institut de Recherche pour le Développement (IRD), casilla 17-12-857, Quito, Ecuador.
- 2 Facultad de Geología, Minas y Petróleos, casilla 17-01-2759, Quito, Ecuador.
- 3 Instituto Geofísico/ Departamento de Geofísica. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- 4 Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Quito, Ecuador
- 5 IRD- LGGE, B.P. 96, 38402 Saint-Martin d'Hères, Francia.
- 6 IRD, OPGC, 5 rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand, Francia.
- 7 UMR 6538, Université de Bretagne Occidentale, B.P. 809, 29285 Brest, Francia.
- 8 Universidad Central del Ecuador, Quito.

# EL DESLAVE DEL 13 DE OCTUBRE DEL 2000 DEL VOLCÁN EL ALTAR

## Resumen

El desastre hidrogeológico del 13 octubre de 2000, fue provocado por el colapso parcial de la cara norte del pico Monja Grande del volcán El Altar, este deslave de roca cayó en la Laguna Amarilla y generó una gigantesca ola de agua que viajó valle abajo en forma de un flujo de lodo destructivo. Debido al retroceso de los glaciares, similares avalanchas de roca podrían ocurrir de nuevo en El Altar, pero serían poco frecuentes.

## Abstract

The hydrogeologic catastrophe of October 13 of 2000 resulted of the partial collapse of the northern face of the Monja Grande summit of El Altar volcano. This rock avalanche impacted the "Laguna Amarilla" lake and generated a giant wave which travelled downstream as a destructive debris flow. Because of the glacial withdrawal, similar rock avalanches might occur again at El Altar volcano, but very unfrequently.

mhall@igepn.edu.ec

Jean-Philippe.Eissen@ird.fr

## INTRODUCCIÓN

El día 13 octubre de 2000, un desastre hidrogeológico ocurrió al formarse una gigantesca ola de agua que viajó valle abajo siguiendo el cañón de los ríos Collanes, Blanco, Chambo y Pastaza que provocó numerosos daños hasta el Oriente. Este desastre tuvo su origen en la caldera del volcán El Altar.

El objetivo del presente trabajo es presentar el contexto geológico de este volcán y de describir los primeros resultados sobre el origen y el desarrollo de este desastre hidrogeológico.

## EL VOLCÁN EL ALTAR

### *Marco geomorfológico*

El Altar es un estratovolcán principalmente andesítico, localizado sobre la Cordillera Real del Ecuador, a unos 25 km al este de la ciudad de Riobamba (figura 1). Este volcán está apagado desde hace aproximadamente un millón de años. Su morfología actual es la de un cono volcánico bastante erosionado, truncado por una caldera de avalancha en forma de herradura abierta hacia el occidente.

Las cumbres de la caldera incluyen seis picos cubiertos de nieve y hielo que alcanzan alturas sobre los 5 000 m (figura 2). Estas son, de Sur a Este y continúan

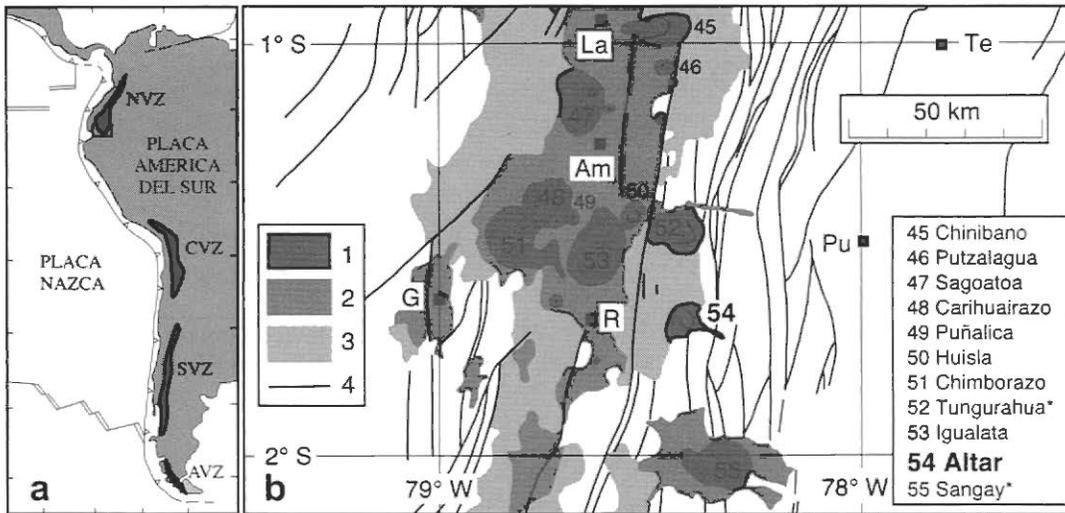


Figura 1. Ubicación del volcán El Altar en la Cordillera Real (u Oriental) del Ecuador. NVZ: Northern Volcanic Zone; CVZ: Central Volcanic Zone; SVZ: Southern Volcanic Zone; AVZ: Austral Volcanic Zone. 1 = Volcanes cuaternarios; 2 = Depósitos volcánicos distales; 3 = Depósitos volcánicos Pliocénicos; 4 = Fallas: Am = Ambato; G = Guaranda; La = Latacunga; Pu = Puvo; R = Riobamba; Te = Tena.

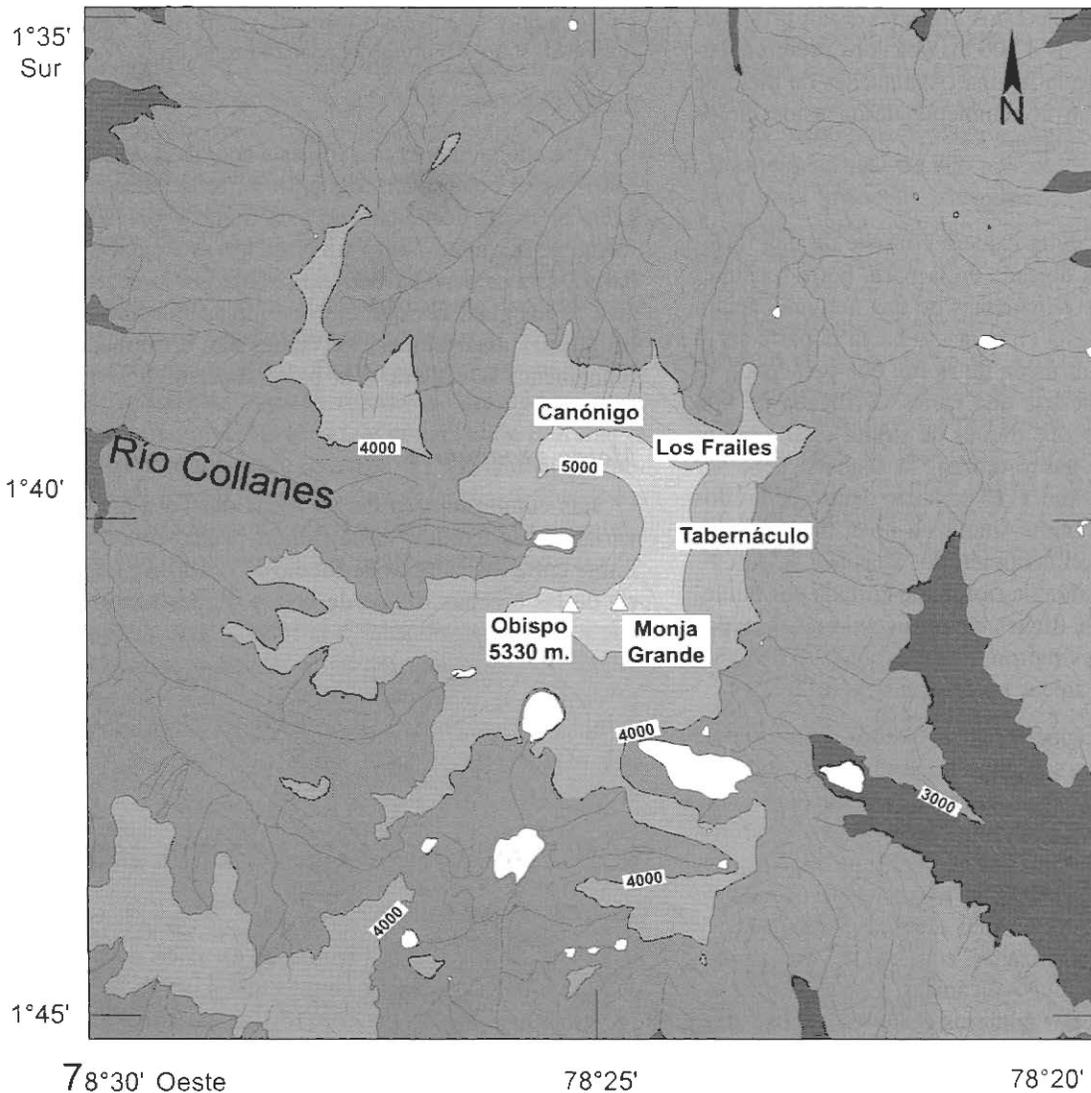


Figura 2. Mapa topográfico del volcán El Altar con su morfología en herradura, la ubicación de las lagunas y de las cumbres.

do hacia el Norte: “El Obispo” (~5 330 m), “La Monja Grande” (~5 310 m), “La Monja Chica” (5 154 m), “El Tabernáculo” (cumbre Sur 5 209 m y cumbre Norte 5 182 m), “Los Frailes” (cumbre Sur-Este 5 196, central ~5 125 m y Nor-Oeste 5 245 m), y “El Canónigo” (5 259 m). El fondo de la caldera está ocupado por un lago glaciar, de 1.1 km de largo y 574 m de ancho, ubicado a una cota de 4 170 msnm.

Observaciones realizadas durante el siglo XVIII indican que los glaciares ocuparon todo el interior de la caldera y además llegaban hasta las pendientes superiores del valle de Collanes. Pero, desde finales del siglo pasado, se observó un importante retroceso de los glaciares del Altar, similar al ocurrido en otras partes del mundo. Restos de estos glaciares están presentes en cotas superiores a los 4 500 m, ubicados preferencialmente en circos sobre la laguna. Avalanchas de hielo de pequeña escala llegan comúnmente desde estos circos hasta el fondo de la caldera.

### Marco geológico

La parte interior de la caldera consiste de una intrusión de gabro-diorita ubicada en la parte norte (posiblemente se trata de los remanentes de una antigua cámara magmática), la cual está en contacto hacia la parte sur y este con una ancha intrusión de riolita que presenta a su contacto con los andesitas una facies vitrificada de tipo obsidiana. Como algunos diques de riolita están cortando a la intrusión de gabro-diorita, la segunda debe ser más antigua que la primera. El contacto dentro de las dos intrusiones sigue un límite sinuoso a nivel métrico pero es muy preciso a nivel centimétrico. Después de su emplazamiento, la intrusión de riolita fue cortada por numerosas generaciones de diques de andesitas, más o menos porfíricas, los cuales fueron los alimentadores de todas las formaciones volcánicas superiores del edificio.

Todas las partes superiores del volcán están conformadas por dos series sobrepuestas de brechas andesíticas, con episodios más o menos hidromagmáticos, que fueron emplazadas cuando el volcán era activo y probablemente bastante más alto que en la actualidad. Los brechas están constituidas de una mezcla heterogénea de bloques de lava andesíticas, más o menos vesiculadas, y más o menos hidrotermalizadas, cementadas por una matriz más fina de partículas volcánicas. Estas brechas están también cortadas por numerosos diques de andesitas, los cuales fueron también los alimentadores de todas las formaciones volcánicas superiores del edificio.

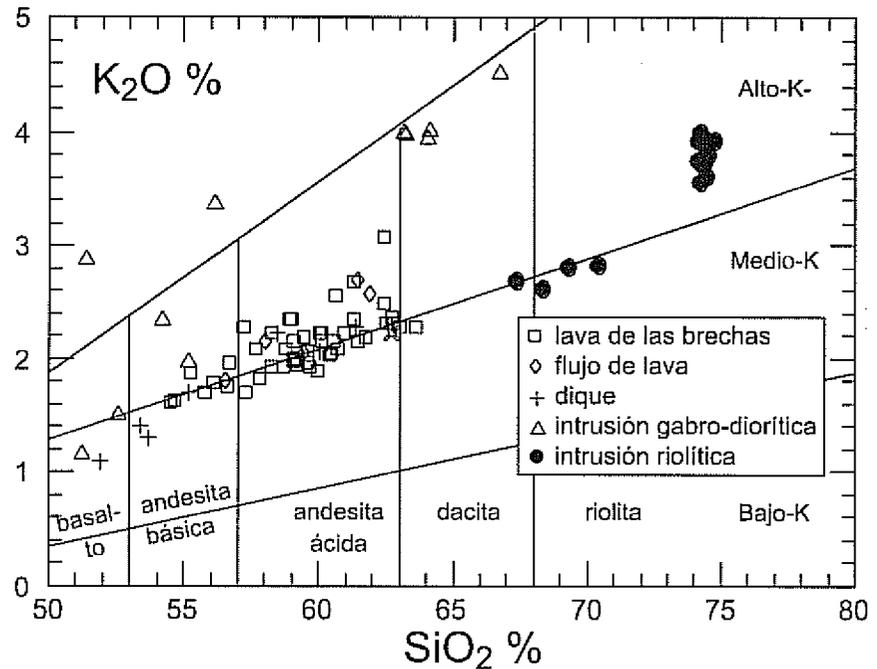


Figura 3. Diagrama  $K_2O$  % versus  $SiO_2$  % de los cinco principales grupos litológicos reconocidos en El Altar. Resultados obtenidos sobre 69 muestras analizadas en Brest, Francia.

Aparentemente, el final de esta actividad estuvo marcado por el colapso de una gran parte de su estructura hacia el oeste, formando de esta manera la caldera en forma de herradura, pero sin erupción asociada. Sin embargo, esta caldera ha sido agrandada por la acción erosiva de los glaciares que fueron emplazados allí durante las últimas glaciaciones, los cuales han erosionado profundamente la caldera y la parte superior del valle de Collanes.

### Marco geoquímico

Las composiciones de las rocas del volcán El Altar varían desde basaltos hasta riolitas principalmente en el límite entre los campos de Medio-K y Alto-K. La mayoría de las brechas, flujos de lava y diques son andesíticos y parecen pertenecer a la misma serie geoquímica. Algunas de las muestras de la intrusión gabro-diorítica presentan un fuerte enriquecimiento en K. La intrusión riolítica se encuentra claramente fuera del grupo principal de muestras. (figura 3).

## EL DESLAVE DEL 13 DE OCTUBRE 2000

### Origen

El día viernes 13 de octubre 2000, poco después de las 6 de la mañana, una gigantesca ola de agua viajó valle abajo siguiendo el cañón de los ríos Collanes, Blanco, Chambo y Pastaza formando un flujo de lodo y provocando numerosos daños inclusive en el Oriente.



**Figura 4.** Río Pastaza al nivel de la quebrada Ulba, cerca de Baños. Comparación del nivel del agua con un caudal normal y durante la crecida del derrumbe del 13 oct. 2000 (fotos: J.-Ph. Eissen).

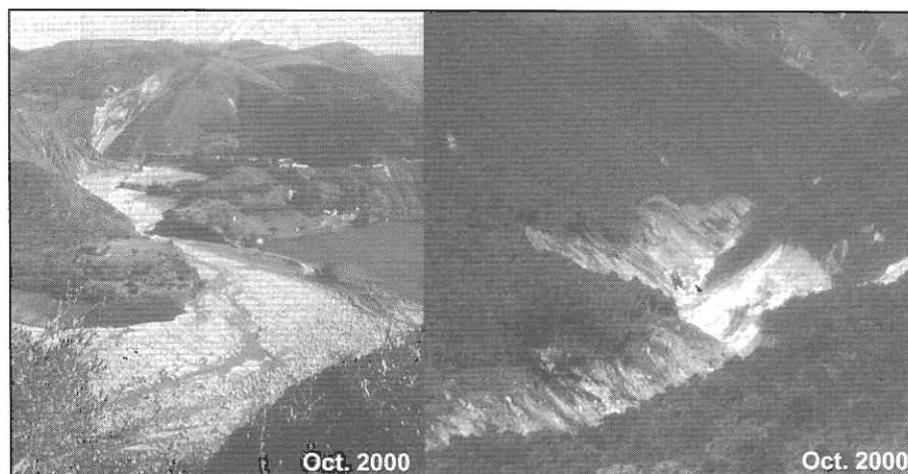
Esta ola estuvo acompañada por una crecida en los ríos Chambo y Pastaza hasta aproximadamente las 9 de la mañana (fig. 4). Rápidamente, se encuentra el origen de este desastre en la caldera del volcán El Altar. Observaciones realizadas después de ocurrido el deslave han mostrado una destrucción casi total del cañón de los ríos, relacionadas a la erosión de las pendientes fuertes (fig. 5, derecha) y zonas de depósitos cuando la velocidad del flujo fue baja (fig. 5, izquierda : fig. 9).

Este desastre ocurrió cuando un gran bloque de brechas andesíticas se derrumbó casi verticalmente desde la pared norte de la Monja Grande, justo debajo de la cumbre (fig. 6) (Hall *et al.*, 2000; Eissen *et al.*, 2001). Como se mencionó arriba, todas las paredes superiores de la caldera de El Altar están constituidas por brechas volcánicas hidromagmáticas. Estas rocas son por naturaleza bastante inestables y están sujetas a desprendimientos. Además, el continuo proceso de congelación (durante la noche) y descongelación (durante el día), aumenta la posibilidad de fracturación de la roca, lo cual favorece los deslaves. Un agravante adicional constituye la presencia de los numerosos diques, los cuales cortan verticalmen-

te las brechas, formando cuerpos tabulares inestables, a lo largo de las paredes de la caldera.

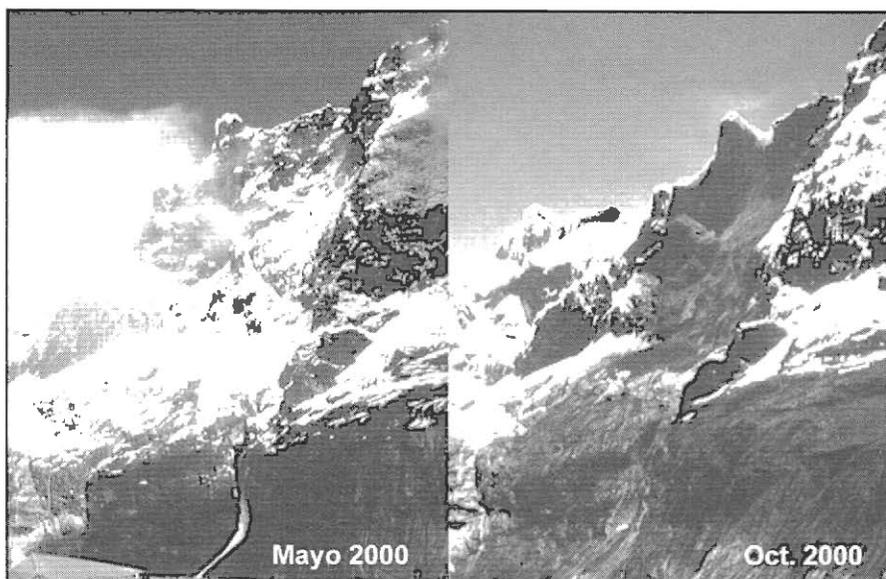
#### *Cronología del deslave*

A las 5h58 (hora local) del día viernes 13 de octubre 2000, el bloque de brechas se derrumbó desde la pared norte de la Monja Grande. Pocos segundos después, la masa de rocas impactó la parte oriental de la laguna caldérica, denominada Laguna Amarilla, recorriendo una distancia vertical de 900 metros. Es posible que el deslave haya impactado, levemente, al glaciar colgante de la misma pared, ubicado a una cota de 4 600 m, lo cual pudo haber causado un salto de la masa de roca (fig. 6 derecha). El impacto del gran bloque provocó la formación de una gigantesca ola que desalojó un gran cantidad de agua de la laguna ( $1,5$  a  $3,0 \times 10^6$  m<sup>3</sup>), representan 10 a 20 % del volumen total de la laguna (Fig. 7). La primera y la mayor ola alcanzó una altura de 125 m sobre el pared norte de la caldera, erosionando la morrena local, y unos 50 m sobre la presa natural, constituida por un sólido farallón de roca. Esta ola, y las olas sucesivas erosionaron profundamente las laderas ubicadas río aba-



**Figura 5.** Izquierda: Confluencia del río Blanco (bajando del Altar) y del río Chambo. Se nota el depósito de bloques debido al cambio de pendiente y la formación de una represa que forma una laguna temporal sobre el río Chambo.

Derecha: Valle del río Collanes (aguas abajo de la caldera) totalmente erosionado hasta 30 a 40 metros arriba del cañón del río debido a la ola que bajó el 13 de oct. 2000. (fotos: J. Ph. Eissen).



**Figura 6:** Comparación de la pared norte del pico de la Monja Grande antes (izquierda) y después (derecha) del derrumbe de esta pared el 13 Oct. 2000. Se nota el cambio de morfología de la cumbre del pico y las dimensiones aproximadas del bloque (250 m de ancho y 250 m de alto). (fotos: J.-Ph. Eisen).

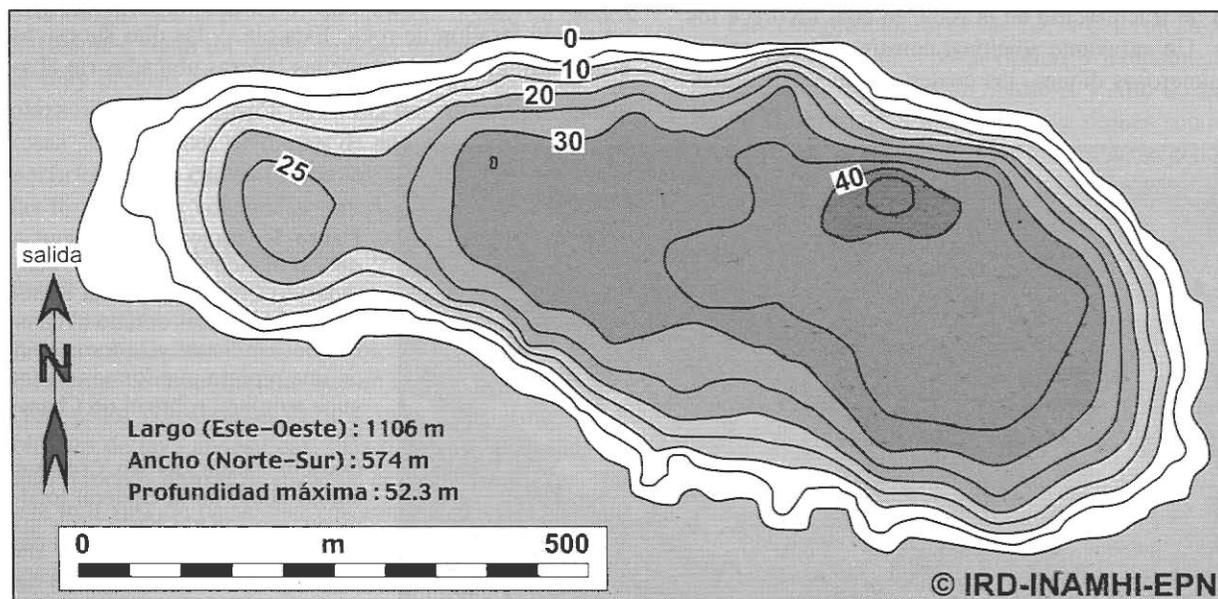
jo las cuales están constituidas de material morrénico suelto (morrena de la Pequeña Edad de Hielo, siglos XVI-XIX).

Luego, esas olas avanzaron rápidamente a través del valle de Collanes cubriendo los lados del valle con lodo y el fondo del mismo con abundantes bloques de más de 10 m de largo hasta 1 m de diámetro, llegando a distancias de 300 y 1 500 m, respectivamente, desde la salida de la caldera. El peso de un bloque de más de 10 m de largo es aproximadamente de 600 toneladas. Un bloque de este tamaño desplazado por la avalancha da una idea de la fuerza de carga de este tipo de flujos. Este desplazamiento está confirmado por la observación de un rollo de sedimentos, resultado de la deformación de los mismos delante de los bloques. El lodo llegó hasta una altura de 20 m sobre el fondo del valle (cota 3 950 msnm),

especialmente en el lado norte donde fue principalmente orientado.

En menos de 2 minutos, la primera ola (cargada con material adicional de suelo y lodo provenientes de la erosión del piso del valle de Collanes) avanzó hacia la salida del valle alcanzando el cañón más angosto del mismo río. En su camino, arrasó tres de las cuatro casas del Refugio “Capac Urco” (fig. 8), además de 80 vacas y 23 caballos. En el fondo del valle de Collanes, se puede ver claramente que el flujo estuvo constituido de una zona central, muy cargada de bloques (con muy poco lodo) y de bordes laterales rico en lodos y casi sin bloques.

**Figura 7.** Batimetría de la laguna de la caldera del volcán El Altar, calculada con 205 valores puntuales ubicados con GPS.



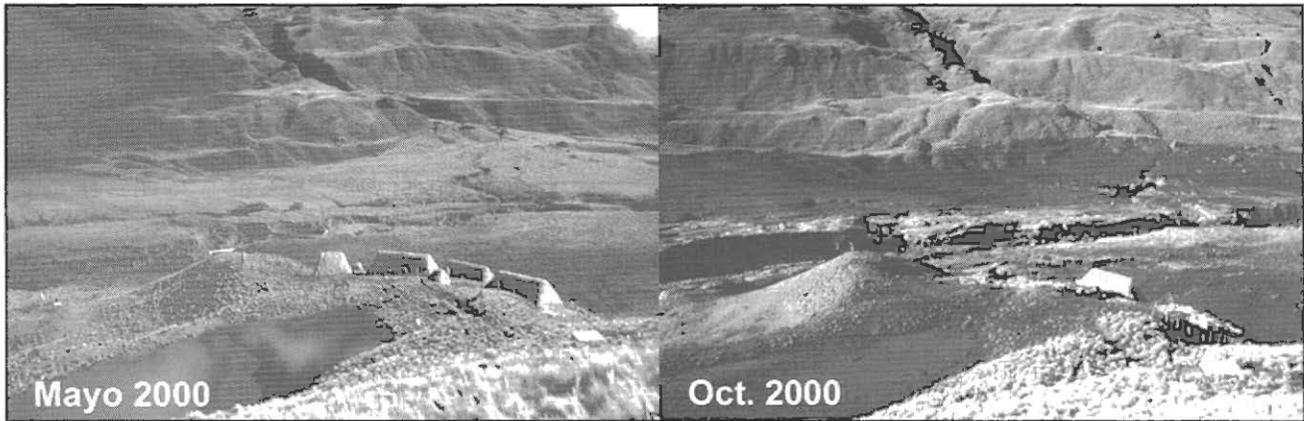


Figura 8. Comparación del fondo del Valle de Collanes en el sector del refugio "Capac Urco" antes (izquierda) y después (derecha) del flujo de lodo del 13 oct. 2000 (fotos: J. Ph. Eissen).

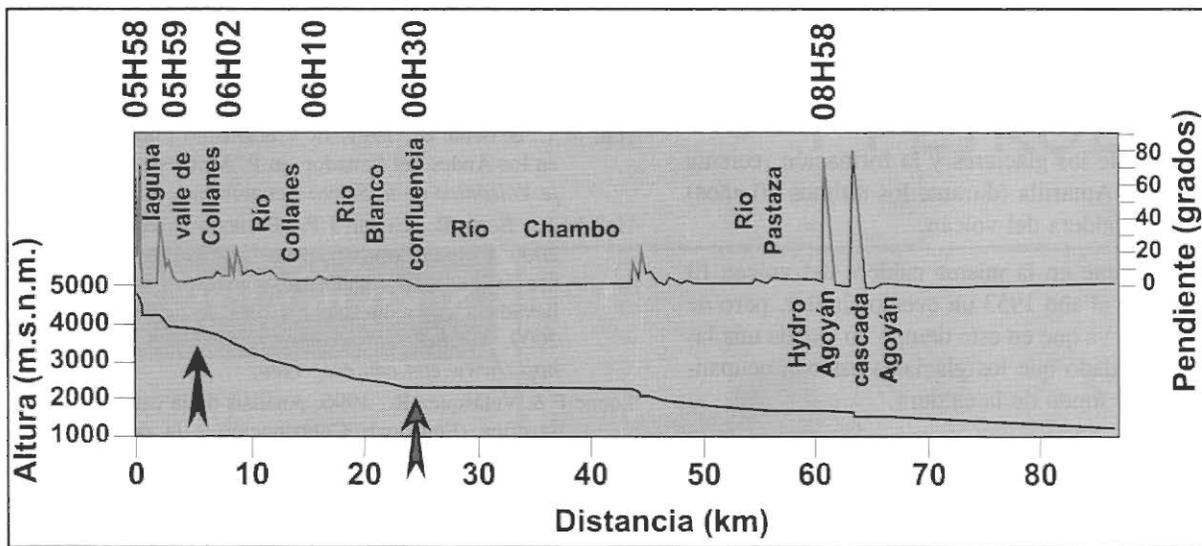


Figura 9. Perfil de los ríos aguas abajo del volcán El Altar con la pendiente (arriba), la altura (abajo), los horas aproximadas de la crecida, y las dos principales zonas de depósitos (valle de Collanes y la confluencia del río Blanco y del río Chambo) ubicadas con las flechas.

Esta mezcla de agua y de lodo bajó a gran velocidad por el angosto cañón del río Collanes erosionando su cauce y terrazas hasta 30 m altura (fig. 5 derecha) y continuando su rápido descenso hacia Releche, Candelaria, Pungal y finalmente hasta llegar al río Chambo. Es en la última parte de trayecto del río Blanco donde se produjeron la mayoría de las víctimas que llegó a un total de 13 personas. Luego, en la unión del río Blanco con el Chambo, debido al ensanchamiento del valle y al quiebre de pendiente, se depositó la mayor parte de la carga de bloques grandes formando una especie de abanico de escombros. Este abanico logró represar parcialmente las aguas del río Chambo, formando una laguna de 1,5 km de largo (fig. 5 izquierda). La mezcla de agua y lodo avanzó aguas abajo por los ríos Chambo y Pastaza, llegando a la presa de Agoyán, cerca a Baños, a las 08h58 (tiempo local), después de un recorrido de 62 km, para luego seguir su trayecto hacia Puyo y la cuenca amazónica.

## DISCUSIÓN

Esta clase de fenómeno natural no es muy común, pero se presenta con una relativa frecuencia en todas las regiones de montañas inestables en el mundo. Por ejemplo, en el vecino Perú, tales desastres abarcando glaciares y lagunas glaciares sumaron más de 50 000 muertos durante el siglo XX (Ames & Francou, 1995).

De similar manera, el 29 de marzo 1993, a las 9 de la noche, un gigantesco deslizamiento (con un volumen estimado de  $20 \times 10^6 \text{m}^3$ ) se produjo en el sur del Ecuador sobre el río Paute, en La Josefina, al este de Cuenca (Cadier *et al.*, 1996; Léone *et al.*, 1996; Rossel *et al.*, 1996; Zevallos *et al.*, 1996). Este deslizamiento represó el río Paute y provocó directamente 71 muertos. Se formó un lago de cerca de  $200 \times 10^6 \text{m}^3$  aguas arriba del deslizamiento que inundó unas 1 000 ha de una zona fértil y poblada, con la destrucción de partes de la perife-

ria Este de Cuenca y de carreteras, ferrocarriles y una central termoeléctrica. La siguiente rotura de la presa de La Josefina, el sábado 1 de mayo, y la propagación de la onda de crecida provocó un enorme flujo que destruyó los valles aguas abajo del río Paute hasta la presa de Amaluza que fue apenas salvada. En este caso, la presencia de fallas en la zona, asociadas con fuertes lluvias y un factor antrópico por la explotación de canteras en la base del deslizamiento, jugaron un papel importante para producir esta gran catástrofe.

El deslave del volcán El Altar resulta de la conjunción de tres causas diferentes, de origen totalmente natural:

- La naturaleza de las rocas que conforman las partes superiores del edificio (*i.e.* brechas poco consolidadas);
- El continuo proceso de congelación y descongelación que aumenta la posibilidad de fracturación de la roca, lo cual favorece los deslaves;
- El retroceso de los glaciares y la formación reciente de la Laguna Amarilla (durante los últimos 50 años) dentro de la caldera del volcán.

Vale indicar que en la misma caldera del volcán El Altar, ocurrió en el año 1953 un evento similar, pero de menor magnitud, ya que en este tiempo no existía una laguna importante dado que los glaciares estaban ocupando gran parte del fondo de la caldera.

Por lo tanto, similares avalanchas de roca probablemente podrían ocurrir de nuevo en El Altar, pero no serían muy frecuentes (en el orden de varios años o decenas de años).

Es imposible predecir el dónde y el cuándo de la ocurrencia de esta clase de evento natural, que también puede ser generado por un sacudón sísmico sentido localmente con fuerza. Sin embargo, es importante considerar este fenómeno con el fin de planificar hacia el futuro.

## REFERENCIAS

- Ames A. & Francou B., 1995. Cordillera Blanca, Perú. Glaciares en la Historia. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andine*, 24(1): 37-64.
- Cadier E., Zevallos O. & Basabe P., 1996. El deslizamiento y las inundaciones catastróficas de la Josefina en Ecuador. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 5(3): 421-442.
- Cerón C., Laraque A., Eissen J.P., Bourdon E. & Muñoz T., 2001. Primer estudio hidrosedimentario del lago El Altar (4200 m) después del derrumbe del 13 octubre de 2000. *IV Congreso Ecuatoriano de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica (IV CEMSIG), 1er. Seminario Taller de desastres naturales y antrópicos*. Cuenca 28-30 nov. 2001, (resumen).
- Eissen J. Ph., Beate B., Hall M.L., Monzier M., Francou B., Cotten J., Laraque A., Andrade D., Cáceres B. & Hidalgo S., 2001. El volcán El Altar: elementos geológicos y origen del gran deslave del 13 octubre de 2000. *IV Jornadas de Ciencias de la Tierra*, Quito, Escuela Politécnica Nacional, 3-6 abril 2001, (resumen).
- Hall M.L. & Beate B., 1991. El Volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador, in P. Mothes ed., *El Paisaje Volcánico de la Sierra Ecuatoriana*, p. 5-18.
- Hall M.L., Beate B., Eissen J.P., Francou B. & Cáceres B., 2000. El gran deslave del volcán El Altar del 13 octubre de 2000. Resultados de la investigación de campo llevada a cabo durante los días 23 a 25 de octubre 2000. *Reporte visible sobre el sitio web del IG-EPN: <http://www.epn.edu.ec/~igeo>*.
- Léone F & Velásquez R., 1996. Análisis de la catástrofe de la Josefina (Ecuador): Contribución a la definición del concepto de vulnerabilidad aplicado a los movimientos de terreno. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 5(3): 461-478.
- Meyer H., 1993. *En los altos Andes del Ecuador*. Colección Tierra Incógnita No. 3, Abya-Yala, Quito, 750 p. (Reedición basada en la edición original alemana de 1907).
- Rosset F., Cadier E. & Basabe P., 1996. El deslizamiento y las inundaciones catastróficas de la Josefina en Ecuador. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 5(3): 399-420.
- Zevallos O., Fernández M.A., Plaza G. & Klinkicht S. (Ed.), 1996. *Sin plazo para la esperanza: Reporte sobre el desastre de la Josefina-Ecuador*, Escuela Politécnica Nacional, 1993, 348 páginas.

Eissen Jean-Philippe, Beate B., Hall M., Laraque Alain, Francou Bernard, Cáceres B., Monzier Michel, Cotten J., Andrade D., Cerón C., Hidalgo S., Muñoz T. (2004).

El deslave del 13 de octubre del 2000 del volcán El Altar. In : Alvarado A. (ed.), García-Aristizábal A. (ed.), Mothes P. (ed.), Segovia M. (ed.) Investigaciones en geociencias. Quito : IRD ; IG ; Corporación Editora Nacional ; Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, (1), 44-50.

(Investigaciones en Geociencias ; 1).