

Comportamiento de los flujos de avalancha de detritos de los Volcanes Llullaillaco y Tata Sabaya, Andes Centrales

I. Rodríguez¹, B. Godoy¹, G. Arancibia², E. Godoy³, J. Clavero⁴, C. Rojas⁵.

1. Programa de Doctorado, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Avda. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.

2. Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile.

3. Tehema consultores geológicos, V. Subercaseaux 4100, Pirque, Stgo, Chile.

4. Energía Andina, Darío Urzua 2165, Providencia, Stgo, Chile.

5. Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Católica del Norte. Avda. Angamos 0610, Antofagasta, Chile

E-mail: inesr.araneda@gmail.com

Resumen. Los Andes Centrales corresponden a un arco volcánico comprendido entre los 14° y 27°S. Este arco volcánico está constituido por decenas de edificios que han sido construidos en los últimos 2 Ma. Dentro de la evolución de estos edificios volcánicos algunos han sufrido un colapso total o parcial, lo que genera depósitos con características particulares. Estas características son útiles para determinar la cinemática y dinámica de las avalanchas que le han dado origen. Entre las características de estos depósitos, denominados depósitos de avalancha de detritos, se encuentran cerrillos, fallas, cordones y acantilados. En este trabajo se presenta la descripción de estructuras de los depósitos de avalancha asociados a los volcanes Llullaillaco y Tata Sabaya (Andes Centrales). Así, considerando la forma y orientación de estas estructuras, se ha podido establecer la dirección y el comportamiento de la avalancha que ha dado origen a estos depósitos.

Palabras Claves: Depositos de Avalanchas de Detritos, Llullaillaco, Tata Sabaya, Andes Centrales.

1 Introducción

Una avalancha de detritos es producto del colapso de un sector de un edificio volcánico bajo condiciones de subsaturación de agua (Ui, 1983). En el depósito resultante se pueden identificar diversas estructuras, entre ellas cerrillos (*hummocks*), albardones (*levées*), acantilados (*cliffs*) marginales y distales, remanentes de canales de ríos temporales, y el anfiteatro (*amphitheater*), las cuales han sido utilizadas para determinar la dinámica y cinemática de las avalanchas de detritos (e.g. Clavero et al., 2003; Shea et al., 2008).

Dentro de la actual cadena volcánica (26 – 0 Ma) asociada a los Andes Centrales, Francis y Wells (1988) han identificado al menos 14 edificios con colapsos asociados a su evolución. Edificios cuyos colapsos se han generado en las últimas decenas de miles de años, presentan depósitos propicios para el estudio de este tipo de eventos (e.g. Parinacota, Ollagüe, Socompa, San Pedro). Esto, debido a la baja erosión asociada a la aridez de esta zona, lo que facilita su conservación (Francis y Wells, 1988). Como

caso de estudio se presentan los volcanes Llullaillaco y Tata Sabaya. Estos volcanes han sufrido colapsos parciales, y en sus depósitos se pueden encontrar diversas estructuras que permiten determinar la movilidad de las avalanchas que los han generado.

2 Depósitos de avalanchas de detritos

El volcán Llullaillaco se encuentra ubicado en el límite Chile-Argentina. Su cima alcanza los 6723 m s.n.m. y corresponde a un estratovolcán de composición predominantemente dacítica (Gardeweg et al., 1984). El depósito de avalancha de detritos de este volcán se distribuye en el flanco oriental de éste y alcanza extensiones de hasta 22 km desde su posible origen. Este depósito cubre un área superior a los 137 km² y su origen está relacionado con el colapso parcial del edificio ancestral del volcán. Se caracteriza por presentar bloques subangulosos de composición dacítica, encontrándose hacia sus zonas distales material de origen salino, pertenecientes a las Salinas del Llullaillaco. La edad del colapso del edificio volcánico como único evento se estima entre 170 ± 40 ka y 1.0 ± 0.2 Ma (Rodríguez I, 2010), siendo la edad máxima del colapso..

El volcán Tata Sabaya (5.430 m s.n.m) está localizado en el altiplano boliviano, en la zona volcánica central activa. Corresponde a un estratovolcán con lavas andesítico-dacíticas, y lava-domos, domos, y depósitos de flujo piroclásticos dacíticos (de Silva et al., 1993). El depósito asociado al colapso parcial de este volcán tiene forma de T invertida y se distribuye sobre el flanco sur del volcán y el borde norte del Salar de Coipasa. Alcanza una longitud máxima de 23 km y presenta un área de ~250 km² y 6 km³ de volumen. Este depósito se encuentra constituido por bloques de composición dacítica, depósitos lacustres y fragmentos de bombas volcánicas de composición andesítica-basáltica. El colapso que dió origen a este depósito habría ocurrido entre los 6 y 16 ka (Godoy et al., *in prep*).

3 Características de los depósitos

La avalancha de detritos del Llullaillaco se caracteriza por presentar diversas estructuras, tales como, albardones, cordones, lóbulos, cerrillos, discontinuidades y escarpes (Fig. 1). Las estructuras más abundantes en este depósito son los cerrillos, los cuales se presentan de forma longitudinal, algunos formando cordones a lo largo del depósito, en tanto que otros son transversales, agrupándose en algunos sectores (Fig.1). Los cerrillos varían en su longitud y volumen, disminuyendo de tamaño a medida que el depósito se aleja del volcán. Además, es posible diferenciar entre estas estructuras cerrillos primarios, (generados durante el transporte de la avalancha), cercanos al edificio volcánico, y cerrillos secundarios (originados por la propagación de la avalancha), ubicados en las proximidades de las Salinas del Llullaillaco. En los cerrillos se observan bloques lávicos, de composición dacítica, los cuales presentan estructuras tipo *jigsaw* y bordes subangulosos.

Estructuras similares han sido reconocidas dentro del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya (Fig. 1). De igual manera, cerrillos primarios y bloques Toreva (*sensu* Reiche, 1936) se distribuyen hacia zonas proximales del depósito y cerrillos secundarios, y de menor tamaño, se localizan sobre el borde norte del Salar de Coipasa. Fallas normales e inversas han sido identificadas en este depósito, así como también dentro de cerrillos, y estructuras de deformación (e.g. *slumps*, pliegues) se encuentran en la base de los cerrillos y en la superficie del Salar de Coipasa. Bloques localizados hacia la parte superior de los cerrillos muestran marcas de impacto (Clavero et al., 2006). Además, secuencias estratigráficas se encuentran preservadas en el interior de algunos cerrillos. Estas secuencias, en algunos casos se encuentran plegadas, basculadas y/o desplazadas por fallas.

4 Dinámica de las avalanchas de detritos.

La morfología de los cerrillos y las estructuras presentes en el depósito de avalancha son importantes para comprender la dinámica del transporte y la interacción con el sustrato, siendo los obstáculos topográficos influyentes en la morfología de los depósitos. Por otra parte, estructuras presentes en los depósitos permiten inferir la dirección y sentido del flujo de las avalanchas que le han dado origen (e.g. Shea et al., 2008).

En el caso del volcán Llullaillaco, el flujo que dió origen al depósito tuvo su movimiento hacia el oriente del edificio volcánico, y fue desviado al pasar por el Cerro Rosado dividiendo la avalancha en dos lóbulos principales. Además, la presencia de estructuras en bloques, tales como *jigsaw*, y los bordes subangulosos que éstos presentan, sugieren que algunos bloques lávicos flotaron durante el

transporte, existiendo poca rotación y abrasión debida al choque entre ellos. Otros bloques fueron fracturados durante el avance de la avalancha. Esto ha sido observado para otras avalanchas (e.g. Monte Santa Helena; Glicken, 1996), proponiéndose un flujo de tipo *grain flow* para éstas. En este tipo de flujo las partículas (bloques en el caso de las avalanchas de detritos) chocan y crean dispersión de stress normal al movimiento del flujo de material (Iverson, 1997).

Para el volcán Tata Sabaya la dirección inicial de la avalancha fue hacia el sureste. Esta dirección varió cuando la avalancha entró en el Salar de Coipasa, dividiéndose en dos lóbulos principales: uno que continuó el movimiento hacia el sureste, y otro en dirección sur. Además, la presencia de marcas de impactos, la conservación de secuencias estratigráficas originales y la presencia de estructuras de deformación (e.g. *slumps*, pliegues), así como la incorporación de material de sustrato en cerrillos distales sugieren que el movimiento de la avalancha del volcán Tata Sabaya es similar a un flujo tipo *plug flow*. En este tipo de movimiento, el cizalle es acomodado en la parte basal de la avalancha, la cual se encuentra dúctil, generándose estructuras de deformación (e.g. Takarada et al., 1999). Este tipo de flujo también explicaría la erosión del sustrato e incorporación de este material en la avalancha.

Las diferencias entre los tipos de flujos de las avalanchas del volcán Tata Sabaya (*plug flow*) y Llullaillaco (*grain flow*), se deben principalmente a variaciones topográficas, y al material incorporado en los flujos durante sus respectivos avances. En el caso del volcán Tata Sabaya, existe una combinación de fragmentos de lavas y de depósito piroclástico provenientes del paleoedificio, con material salino incorporado durante el avance de la avalancha. Este material salino se habría encontrado en estado plástico, dando mayor viscosidad al movimiento. Además, la avalancha ingresa a una superficie libre de obstáculos topográficos, lo que permite mayor libertad en su movilidad. En el caso del volcán Llullaillaco, aunque existe la presencia de material salino y depósitos piroclásticos, el material presente en el depósito es principalmente de carácter frágil (bloques lávicos). Esta característica permite un flujo de carácter rígido. Por otra parte, el flujo se enfrenta a diversos obstáculos topográficos, lo que modifica su comportamiento.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos Fondecyt N° 1040137 y 1070162. I.R. y B.G. son candidatos a Doctor becados por CONY-CIT. Los autores agradecen a los Sres. G. Pocoaca, H. Uribe M. Paredes y Pancho (SERGEOTECMIN, Bolivia), E. Polanco (UNAM, México), I. Petrinovic y P. Grosse (Universidad de Salta,

Argentina), y J. Lemp (SERNAGEOMIN, Chile) por la colaboración prestada durante las campañas de terreno.

Referencias

Clavero, J., Pocoaca, G., Godoy, B., Godoy, E., Rojas, C., 2006. Influencia del sustrato en el transporte y emplazamiento de la avalancha del volcán Tata Sabaya, Andes Centrales. *In XI Congreso Geológico Chileno*, actas v. 2, p. 439-442, Antofagasta.

Clavero, J., Sparks, R., Huppert, H., Dade, W. (2002) Geological constraints on the emplacement mechanism of the Parinacota debris avalanche, northern Chile. *Bulletin of Volcanology*, v. 64, p. 40-54.

de Silva, S. L., Davidson, J. P., Croudace, I. W., Escobar, A., 1993. Volcanological and petrological evolution of Volcan Tata Sabaya, SW Bolivia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 55, p. 305-335.

Francis, P.W., & Wells, 1988. Landsat Thematic Mapper observations of debris avalanche deposits in the Central Andes. *Bulletin of Volcanology*, v. 50, p. 258-278.

Gardeweg, M., Cornejo, P., Davidson, J. (1984) Geología del Volcán Llullaillaco, altiplano de Antofagasta, Chile (Andes Centrales). *Revista Geológica de Chile* N° 23, p. 21-37.

Glicken, H., 1996. Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington. USGS Open-File Report 96-677, 98 pp., 7 láminas, 65 figuras, 6 tablas.

Godoy, B., Clavero, J., Rojas, C., Godoy, E., in Prep. Facies volcánicas del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya, Andes Centrales.

Iverson, R., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, v. 35(3), p. 245-296.

Rodríguez, I., 2010. Estudio de facies y análisis de parámetros del depósito de avalancha de detritos del volcán Llullaillaco, Andes Centrales. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad Católica del Norte, Chile. Inedito.

Shea, T., van Wyk de Vries, B., Pilato, M., 2008. Emplacement mechanisms of contrasting debris avalanches at Volcán Mombacho (Nicaragua), provided by structural and facies analysis. *Bulletin of Volcanology*, v. 70, p. 899-921.

Takarada, S., Ui, T., Yamamoto, Y., 1999. Depositional features and transportation mechanism of valley-filling Iwasegawa and Kaida debris avalanche, Japan. *Bulletin of Volcanology*, v. 60, p. 508-522

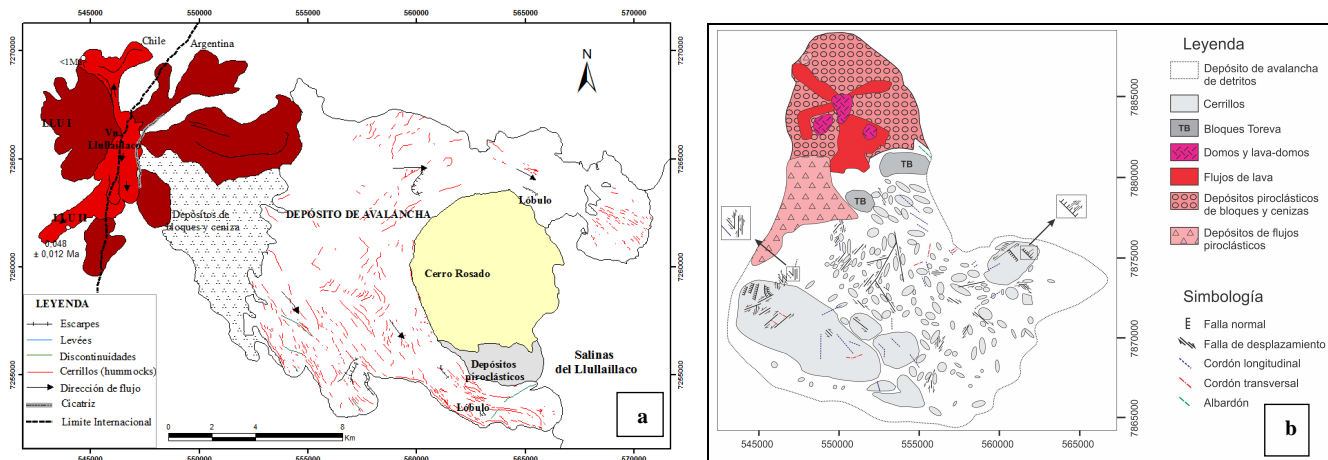


Figura 1: Mapa estructural de los depósitos de avalancha de detritos del volcán Llullaillaco y Tata Sabaya. En a) la imagen muestra las coladas de lava de la unidad, LLU I (color pardo oscuro) correspondientes a flujos lávicos de composición dacítica pertenecientes al Pleistoceno, y la unidad LLU II (color pardo claro) correspondiente al segundo evento lávico de composición andesítica-dacítica de edad Holoceno. Se observa la avalancha del volcán Llullaillaco, ubicada al sureste del edificio volcánico, ésta rodea al Cerro Rosado separando el flujo en dos lóbulos, además alcanza las proximidades de las Salinas del Llullaillaco. En b) se muestra un mapa geológico simplificado del volcán Tata Sabaya. En éste se indican las principales litologías distribuidas en el volcán Tata Sabaya. En fallas de desplazamiento, flechas indican sentido de movimiento relativo.