

**AVALANCHAS DE ESCOMBROS EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO SILLAPACA:
UNA HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL TERRITORIO**

*Julio Lara Calderón*¹

Instituto Geofísico del Perú, Perú
jlara@igp.gob.pe; juan.gomez@igp.gob.pe

*Juan Gómez Avalos*²

Instituto Geofísico del Perú, Perú
juan.gomez@igp.gob.pe

*Juan Sánchez Nuñez*³

Instituto Politécnico-UNAM, México
jsancheznu@ipn.mx

*Ricardo Saucedo Girón*⁴

Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, México
rgiron@uaslp.mx

Fecha de recepción: 02/02/2017

Fecha de aceptación: 04/07/2017

RESUMEN

En el extremo sureste del Perú (Arequipa, Cusco y Puno), entre la Cordillera Occidental y el Altiplano, se extiende una cadena de montañas denominada Complejo Volcánico Sillapaca, formación geológica conformada principalmente por lavas de composición andesítica. Este complejo ha experimentado colapsos o derrumbes cuyos depósitos son denominados *avalanchas de escombros*, eventos altamente destructivos que modificaron la morfología del terreno. Estos depósitos de avalanchas de escombros (DAE) son observados en los distritos de Santa Lucía

¹ Ingeniero geólogo, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

² Magíster en Geotecnia, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

³ Doctor en Ciencias con especialidad en riesgo por fenómenos naturales, Universidad Nacional Autónoma de México.

⁴ Doctor en Sismología y física del interior de la Tierra con especialidad en Vulcanología, Universidad Nacional Autónoma de México.



y Cabanillas, provincia de Lampa y San Román, respectivamente, región Puno. Ahí se cartografiaron y delimitaron tres depósitos de avalanchas de escombros, en los sectores Puncune, Laripata y Quimsachata, así como las zonas de arranque o fuente de dichos depósitos, que abarcan un área de 30 km² del total de la zona de estudio (200 km²). Se estimaron volúmenes de 0,9, 0,55 y 0,74 km³ para los DAE de Puncune, Laripata y Quimsachata, respectivamente. Se infiere que las avalanchas de escombros pudieron haberse originado por la combinación de varios factores que incluyen: (i) inyección de magma de composición diorítica porfirítica emplazado en la parte sur de los depósitos; (ii) desestabilización del edificio por crecimiento y sobrepresurización de domos de composición monzodiorítica, y (iii) paleosismos en algunas de las fallas del sistema Cusco-Lagunillas.

Palabras clave: depósitos de avalanchas de escombros (DAE), *hummocks*, anfiteatro, *facie*.

Debris avalanches in the Volcanic Complex Sillapaca: A tool for sustainable land management

ABSTRACT

In the southeastern end of Peru (Arequipa, Cusco and Puno), between the Western Cordillera and the Plateau, extends a chain of mountain, denominated Sillapaca Volcanic Complex, geological formation, conformed mainly by andesitic lavas. This complex has experienced collapses or landslides whose deposits are called avalanches of debris, highly destructive events that modified the morphology of the terrain. These debris avalanche deposits (DAE) are observed in the Santa Lucía and Cabanillas districts, Lampa and San Roman provinces, respectively, in the Puno region, where three deposits of avalanches of debris were mapped and delimited in the sectors of Puncune, Laripata and Quimsachata, as well as the starting or source areas of these deposits, covering an area of 30 km² of the total area of study (200 km²). Volumes of 0,9, 0,55 and 0,74 km³ were estimated for the DAE of Puncune, Laripata and Quimsachata, respectively. It is inferred that debris avalanches may have originated from the combination of several factors including: (i) injection of magma of porphyritic dioritic composition located in the southern part of the deposits; (ii) destabilization of the building by growth and overpressurization of dome s of monzodioritic composition, and (iii) paleosismos in some of the faults of the Cusco-Lagunillas system.

Keywords: debris avalanche deposits (DAE), *hummocks*, amphitheater, *facie*.

INTRODUCCIÓN

Los procesos destructivos durante la evolución geológica de un volcán pueden originar avalanchas de escombros y lahares. Una avalancha de escombros se forma debido al colapso gravitacional lateral a gran escala de un sector de un edificio volcánico (Ui *et al.*, 2000). Evidencias de estos colapsos son los depósitos de avalanchas de escombros (DAE) y una morfología típica que incluye un anfiteatro y una serie de *hummocks* o montículos distribuidos en áreas proximales y distales a un volcán, aunque esto no ocurre en todos los casos (Ui *et al.*, 2000).

Se cartografiaron los principales depósitos de avalanchas de escombros en los sectores Puncune, Laripata y Quimsachata. La distribución espacial y las características granulométricas sugieren que el origen de estos eventos extremos es similar. Por tanto, conocer las condiciones que desencadenaron la ocurrencia de estos eventos permitirá entender la evolución geológica de la zona, así como también documentar paleoeventos geológicos extremos.

Avalanchas de escombros en el mundo

La erupción del Monte Santa Helena (Estados Unidos) en 1980 fue la primera erupción documentada científicamente en la que se observó el emplazamiento de un depósito de avalancha de escombros (Voight *et al.*, 1981), que tuvo un volumen de 2,3 km³, convirtiéndola en la mayor de la época histórica registrada en el mundo. La erupción del volcán Bandai (Japón) en 1888 ocasionó el colapso de la parte norte del volcán. Esta erupción es muy conocida porque había registros del curso de la erupción y estudios detallados post erupción. Una erupción de tipo freática del volcán Bandai condujo a la formación de una avalancha de escombros. En la erupción del Monte Bezymianny (Rusia) el 30 de marzo de 1956, una gran avalancha de escombros depositó 0,5 km³ de material y también produjo una explosión lateral dirigida cuando el magma quedó expuesto al aire libre. Durante el evento se formó un cráter en forma de herradura (anfiteatro), aunque a partir de entonces ha sido en su mayor parte rellenado por materiales provenientes del interior de la montaña. La avalancha de escombros del volcán Unzen (Japón) en 1792 ocasionó 15 190 muertos (Ui *et al.* 2000). Un terremoto causó el colapso del domo de lava y generó una gran avalancha de escombros (0,48 km³). Esta avalancha recorrió 6,5 km hasta llegar al mar, generando un tsunami causante de 11 000 pérdidas humanas.

A partir del estudio detallado de estos depósitos, se han identificado numerosos ejemplos en todo el mundo (Siebert *et al.*, 1987; Ui *et al.*, 1986), tabla 1. De estos estudios se desprende que el origen del colapso parcial o total de un edificio volcánico y el emplazamiento de avalanchas de escombros puede deberse a varios factores: por intrusión magmática en el edificio, llamados tipo Bezymianny o tipo Monte Santa

Elena (Ui T. et al., 2000; Siebert et al., 1987), por actividad freática (Moriya, 1980) conocidos como tipo Bandai, y por actividad sísmica conocidos como tipo Unzen (Keefer, 1984).

Tabla 1. Depósitos de avalanchas de escombros en el mundo

Volcán	Depósito	Altura (km)	Longitud (km)	Volumen (km ³)	Tipo	Fuente
Unzen	1972	0,7	6	0,48	U	D
Yatsugatake	Nirasaki	2,4	32	9		S
Tateshina	Otsukigawa	1,4	12,5	0,35		S
Asama	Tsukahara	1,8	20	2		S
Bandai	1888	1,2	11	1,5	Ba	S
Chokai	Kisakata	2,2	25	3,5	Ba?	S
Tashiro-dake	Iwasegawa	0,7	8,8	0,55		S
Komagatake	1640	1,2	15	1,1	Bz	S
Usu	Zenkoji	0,5	6,5	0,3	Ba?	S
Taranaki	Pungarehu	2,6	31	7,5		S
Papandayan	1772	1,5	11	0,14		
Inga	1628?	1,1	11	1,5		S
Banahao	Lucena y Lucban	1,7	26	5		S
Bezymianny	1956	2,4	18	0,8	Bz	S
Shiveluch	1964	2	12	1,5		S
Santa Helena	1980	2,55	24	2,5	Bz	S
Shasta	300-360 kyr B.P.	3,55	50	26		S
Chaos Crags	ca. 1650	0,65	5	0,15		D
Citlaltépetl	Teteltzingo	4	85	1,8	L	S
Colima	Nevado de Colima	4,3	120	22-33	L	S
Socompa	Holoceno	3	35	15	Bz	S
Rainier	Osceola	4,7	120	3,8	L	S

Abreviaciones: Bz: tipo Bezymianny, Ba: tipo Bandai, U: tipo Unzen, L: longitud del recorrido de la avalancha de escombros, S: estratovolcán, D: domo de lava.

Fuente: Tomado y traducido de Ui et al. (2000).

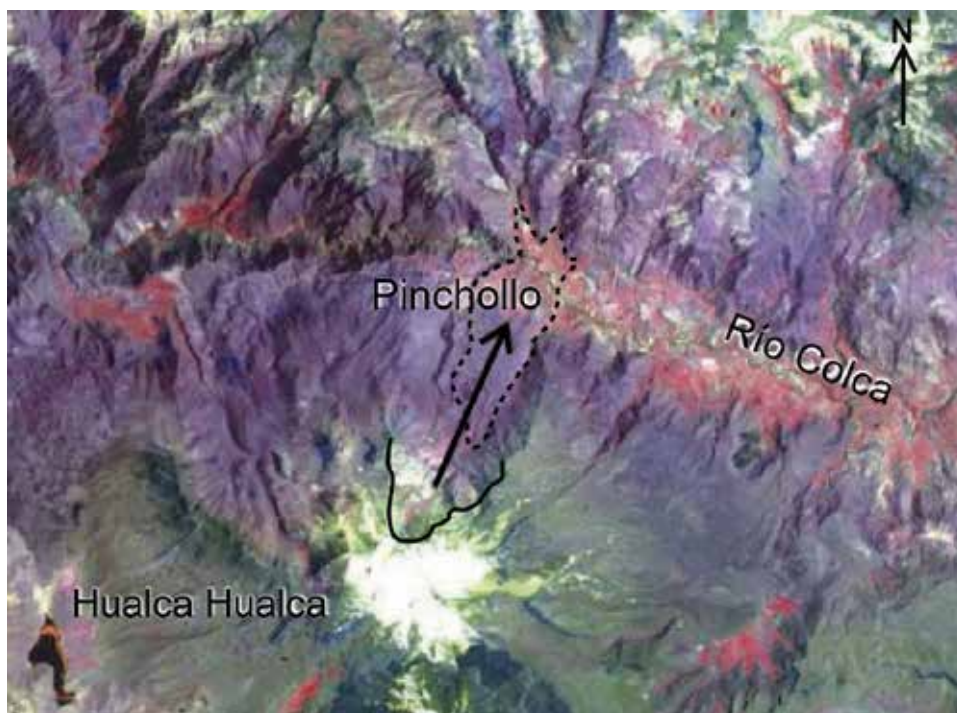
Avalanchas de escombros en el Perú

El Perú no es ajeno a este tipo de eventos geológicos extremos, ni se han realizado muchos trabajos al respecto. Entre los principales eventos de avalanchas de escombros reconocidos se tienen los ocurridos en los volcanes: Hualca Hualca (Gómez et al., 2004), Firura y Coropuna (Gómez et al., 2012), Ticsani (Mariño & Thouret, 2003) y Tutupaca (Manrique, 2013).

En la región de Arequipa, la avalancha de escombros del volcán Hualca Hualca fue producto del colapso parcial de la ladera norte del volcán, causado por procesos hidrotermales o sísmicos (Gómez et al., 2004) en la parte superior de la ladera adyacente a la caldera del volcán (figura 1). Este es el evento geológico de mayor magnitud ocurrido en el valle del río Colca y configuró su actual morfología. Se ha estimado el volumen del depósito en 1 km³, aproximadamente.

En la misma región, el colapso de un cráter antiguo del volcán Firura dejó una estructura semicircular de 12 por 4 km de diámetro orientada al SE. Este colapso generó una avalancha de escombros que se emplazó en el valle Cotahuasi (figura 2). Evidencias de campo sugieren que el depósito de avalancha de escombros en Cotahuasi bloqueó el drenaje principal del río Cotahuasi, originando un represamiento natural. Dicho depósito presenta las siguientes dimensiones: 90 km² de área y 1,6 km³ de volumen aproximadamente (Gómez et al., 2012).

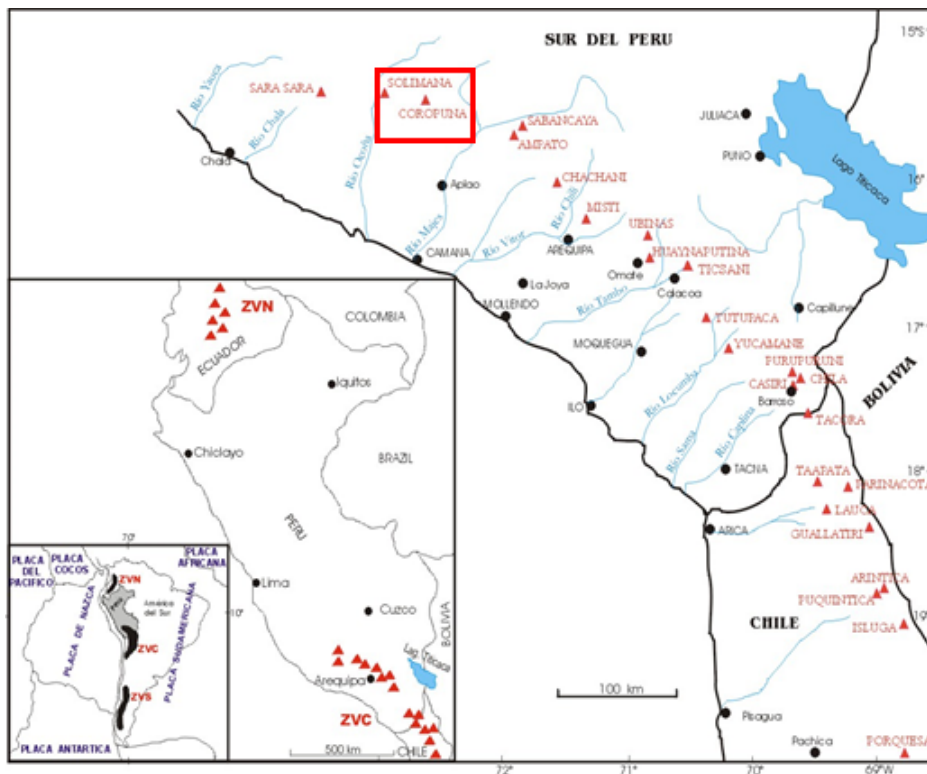
Figura 1. Zona de arranque (línea continua) del depósito de avalancha de escombros de Hualca Hualca (línea discontinua). La flecha indica la dirección de la avalancha



Fuente: Gómez et al. (2004)

La cicatriz dejada por la avalancha de escombros de Chuquibamba en el volcán Coropuna (Arequipa) (figura 2) tiene una forma alargada de 11 por 6 km de diámetro con una profundidad de 0,15 km. Esta generó una avalancha de escombros que recorrió 26 km desde las paredes del escarpe hasta las inmediaciones de Aplao. Desarrolló montículos o *hummocks* constituidos por megabloques de ignimbrita, en una abundante matriz, aún en facies proximales y bloques en rompecabezas. Se ha estimado un área de 70 km² y un volumen preliminar de 0,9 km³ (Gómez et al., 2012).

Figura 2. Ubicación de las avalanchas de escombros de Cotahuasi y Chuquibamba



Fuente: Gómez et al. (2012)

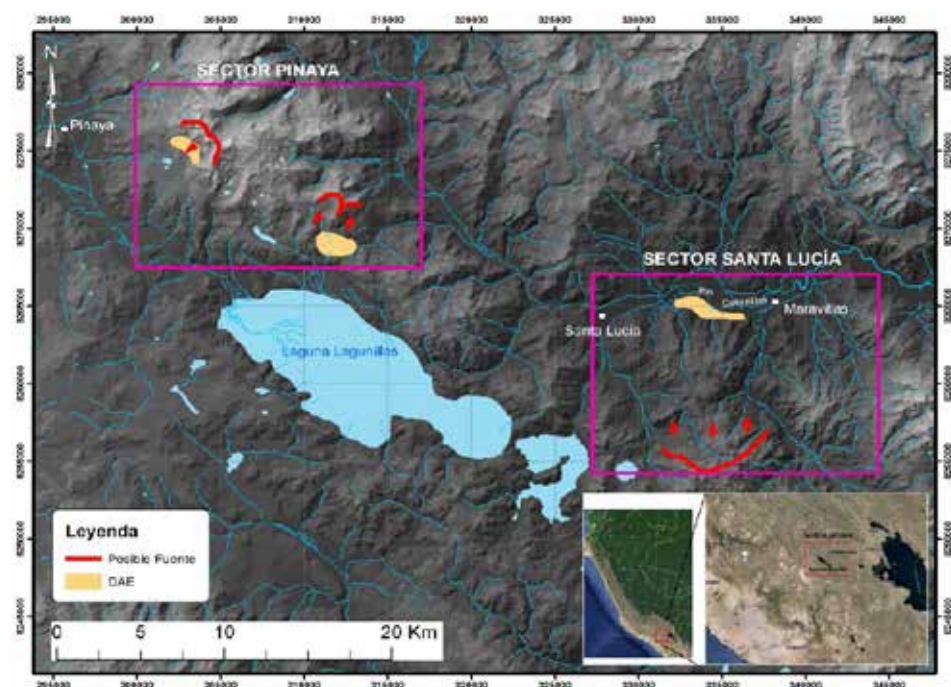
En Moquegua, el colapso del estratovolcán Ticsani generó depósitos de avalanchas de escombros que se emplazaron hacia el oeste a lo largo de paleovalles. Los afloramientos proximales y mediales se localizan entre 6 y 23 km de la «cicatriz del colapso», donde alcanzan espesores que van 300 a 400 m. En el sector distal, es decir, más allá de 25 km al oeste, su espesor disminuye progresivamente (150 a 200 m). A 45 km de la «cicatriz», estos depósitos tienen un espesor aproximado de 10 m y se hallan «colgados» en las laderas del valle. A partir de esta última zona, pasó a facies de lahar o flujo de lodo y se desplazaron a lo largo del río Tambo. Mariño y Thouret 2003 infieren que dicho depósito inicialmente tuvo entre 15 y 20 km³ de volumen.

En Tacna, el volcán Tutupaca ha experimentado avalanchas de escombros cuyos depósitos han sido estudiados por Manrique (2013). Los depósitos de avalanchas de escombros «Tacialaya» tienen espesores de 100 a 150 m y presentan facies de bloques y matriz. La avalancha de escombros «Paipatja» que aflora al N y NE del Tutupaca, generó un depósito que se desplazó hasta 7 km desde la cicatriz y que cubren alrededor de 6 km². Dicho depósito presenta tres facies: a) facie brechoza, cuya proporción bloques/matriz es

del orden de 25/75; b) facie mixta, constituida por material hidrotermalizado y rocas de domo en proporciones similares, y c) facie rica en bloques, localizada en la parte proximal.

Gamonal et al. (2014) muestran evidencias de depósitos de avalanchas de escombros (DAE) en la región de Puno, dividiendo la zona de estudio en dos sectores: Pinaya y Santa Lucía, que cubren un área de 370 km² aproximadamente (figura 3). El año 2014 inspeccionaron el primer sector, que abarca aproximadamente 170 km². El sector de Santa Lucía es el de mayor extensión y abarca aproximadamente 200 km². Los depósitos de avalanchas de escombros son observables a lo largo de la carretera Santa Lucía-Juliaca.

Figura 3. Depósitos de avalanchas de escombros (DAE) en los sectores Pinaya y Santa Lucía



Fuente: Gamonal et al. (2014).

Avalanchas de escombros en el complejo volcánico Sillapaca: Puno-Perú

En el extremo sureste del Perú, entre la Cordillera Occidental y el Altiplano, se extiende una cadena de montañas, denominada Complejo Volcánico Sillapaca, formación geológica conformada principalmente por lavas de composición andesítica. Este complejo ha experimentado colapsos de grandes masas de materiales (avalanchas de escombros) eventos altamente destructivos (Leyrit, 2000) que modificaron la morfología del terreno.

La geología de la zona de estudio está conformada principalmente por rocas de origen volcánico. Dentro de estas, las lavas andesíticas del Complejo Sillapaca de 12 a 14 Ma de antigüedad son las que predominan en el área, las cuales junto a las rocas volcánicas de los Grupos Tacaza, Palca y Barroso se formaron durante el vulcanismo que tuvo lugar entre el Eoceno y Mioceno (Klinck et al., 1986).

La configuración estructural del área de estudio es compleja, debido a los constantes pulsos que han dado origen a diversos complejos volcánicos controlados por sistemas de fallas regionales, como: Urcos-Ayaviri, Sibayo-Caylloma, Condoroma y principalmente el sistema Cusco-Lagunillas (Carlotto, 1998) (figura 4).

Los anfiteatros o zonas de arranque identificados en la zona de estudio (figura 4) se encuentran abiertos en dirección al norte y pueden ser el reflejo del movimiento sinextral inverso del sistema de fallas Cusco-Lagunillas con dirección NW-SE (Carlotto, 2013), localizado al sur de los anfiteatros, así como los *hummocks*, que presentan una orientación con el mismo sentido hacia el norte, debido a que inestabilizan las rocas que conforman el Complejo Sillapaca. Así también, constituyen zonas de debilidad que pueden funcionar como zonas de arranque de grandes masas colapsadas.

El presente trabajo muestra las evidencias de estos colapsos, es decir, los depósitos de avalanchas de escombros (DAE) observados en los sectores Puncune, Laripata y Quimsachata (figura 4).

Depósito de avalanchas de escombros de Puncune

El DAE de Puncune incluye *hummocks* bien definidos. Se considera que dicho depósito provino de un anfiteatro con forma de herradura abierta hacia el norte, observado en los flancos oriental y occidental de los cerros Huayllatoco y Tolaocco, respectivamente (figura 4), recorriendo hasta 5 km desde la zona de arranque.

Este depósito presenta clastos de andesitas porfíricas y basaltos como componentes principales, así como bloques (Palmer *et al.*, 1991) de hasta 4 m de diámetro. Estos presentan fracturamiento conocido como *jigsaw* o *rompecabezas* (Siebert, 1984), cuya forma original puede aún reconstruirse por no haberse disgregado la mayoría de sus fragmentos, debido al transporte de un flujo denso.

Sobre la base del contenido de matriz y su distribución espacial, desde la zona fuente, se identificaron dos facies: facie mixta (45%) y facie de matriz (75%). La facie mixta observada corresponde a clastos de basalto inmersos en una matriz areno-limosa de grano medio, con presencia de algunos megaclastos que presentan estructura en *rompecabezas*. La facie de matriz presenta clastos de andesitas porfíricas en una matriz arenosa de grano fino (figura 5).

Para estimar el volumen del DAE de Puncune (tabla 2), se calculó el área de dicho depósito, complementándose el cartografiado geológico con fointerpretación de imágenes satelitales, para luego obtener un mínimo de 14 km².

Figura 4. Depósitos de avalanchas de escombros (DAE) en los sectores Puncune, Laripata y Quimsachata, así como los hummocks cartografiados. Elaboración del autor

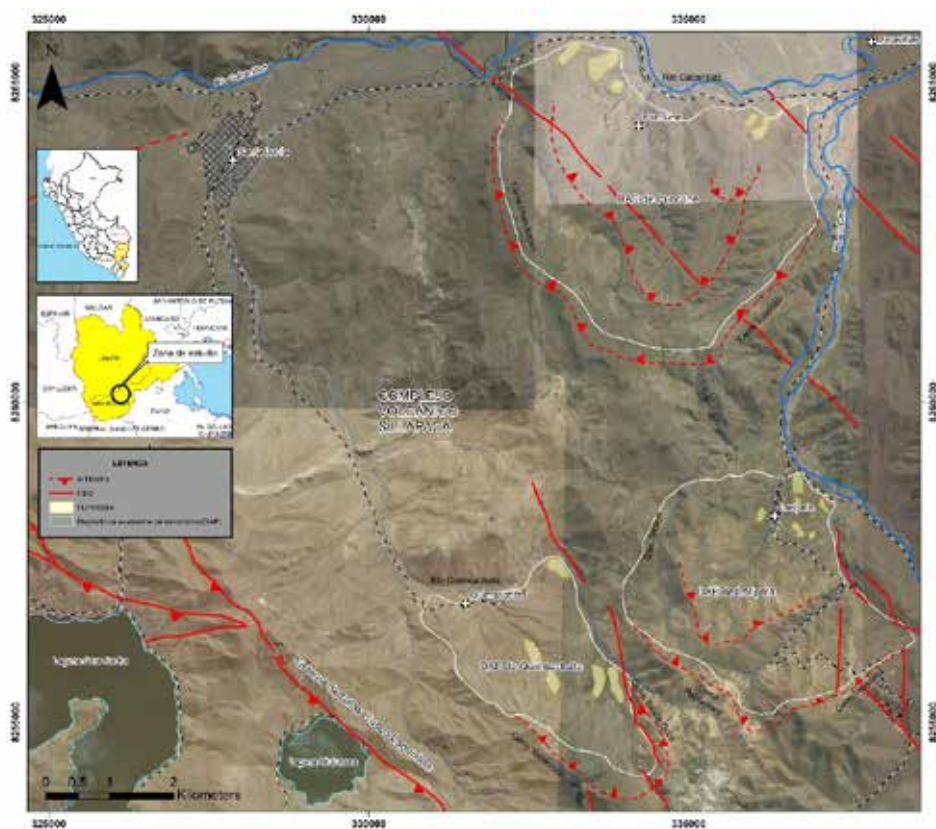


Figura 5. Facie de matriz y mixta en el DAE del sector Puncune; en esta última se observan bloques (líneas punteadas) que presentan estructura en rompecabezas



Se determinó un espesor promedio aproximado de 10 m observado en el sector Puncune (excluyendo los *hummocks*, cuyo volumen se calculó aparte), el que se considera también como mínimo pues no se observa la base. En este cálculo se supone que la avalancha se depositó sobre una base plana, obteniéndose un valor estimado de $1,40 \times 10^{-1} \text{ km}^3$.

Para determinar el volumen de los *hummocks*, se utilizó la fórmula del volumen para elipsoide: $V=4/3\pi R1 * R2 * R3$ (Roldán et al., 2011) en cada uno, obteniendo un valor estimado de $3,31 \times 10^{-3} \text{ km}^3$. Las áreas y alturas de los *hummocks* no están incluidas en el cálculo del volumen de la parte basal del depósito, para evitar duplicidad.

De esta manera se obtuvo un volumen estimado de $0,141 \text{ km}^3$ para todo el depósito de avalancha de escombros observable en el nivel superficial (tabla 2).

Tabla 2. Cálculo del volumen del DAE de Puncune

Volumen total hummocks						
Hummock(a)	4/3π	R1	R2	R3	V (m³)	V (km³)
1	4,1	203	72	6	8,77E+04	8,77E-05
2	4,1	311	131	12	4,89E+05	4,89E-04
3	4,1	127	74	8	7,52E+04	7,52E-05
4	4,1	112	60	10	6,72E+04	6,72E-05
5	4,1	208	60	7	8,74E+04	8,74E-05
					8,06E+05	8,06E-04
Volumen con espesor promedio de DAE						
			Área(b)	Espesor(c)	V (m³)	V (km³)
			14000000	10	1,40E+08	1,40E-01
Volumen total del DAE						1,41E-01

(a) Fórmula del volumen para elipsoide utilizada en *hummocks*: $V=4/3\pi R1 * R2 * R3$, siendo R = radio medido en metros; (b) área total en metros que cubre el depósito de avalancha incluyendo *hummocks*; (c) espesor promedio en metros del depósito de avalancha. Fuente: Roldán et al. (2011).

Finalmente, por su entorno tectónico, es decir, la presencia de algunas fallas del sistema de fallas Cusco-Lagunillas, es de considerarse que el inicio de la avalancha de Puncune se debió a paleosismos generados por el movimiento de alguna de estas fallas.

Depósito de avalanchas de escombros de Laripata

El DAE de Laripata aflora a 11 km al sureste de la localidad de Santa Lucía. Este depósito provino del anfiteatro observado en los flancos oriental y occidental de los cerros Payrumani y Velacirca, respectivamente, ya que se observa un anfiteatro con forma de herradura abierta hacia el norte (figura 4), y recorrió una distancia de hasta 4 km desde la zona de arranque.

El DAE de Laripata, en la parte proximal al anfiteatro, presenta bloques de dioritas porfíricas de bloques de hasta 6 m de diámetro y clastos de la misma composición. Dichos bloques generalmente muestran estructura en rompecabezas. En general, la matriz es escasa (10%) y en las zonas cercanas al anfiteatro (1 km) está soportado por bloques, por lo que el depósito de avalancha de escombros presenta facie de bloques (figura 6).

Para estimar el volumen del DAE (tabla 3), se realizó el mismo procedimiento para determinar el volumen del depósito anterior. De esta manera se obtuvo un volumen estimado de $0,131 \text{ km}^3$ para todo el depósito de avalancha observable en los afloramientos.

Figura 6. Facie de bloques en el DAE del sector Laripata compuesto por clastos de diorita porfírica en una matriz arenosa. En la parte superior (líneas punteadas) se pueden observar bloques que presentan estructura en rompecabezas



Tabla 3. Cálculo del volumen del DAE de Laripata

Volumen total hummocks						
Hummock(a)	4/3π	R1	R2	R3	V (m³)	V (km³)
1	4,1	113	58	10	2,69E+05	2,69E-04
2	4,1	172	66	15	6,98E+05	6,98E-04
3	4,1	41	45	8	6,05E+04	6,05E-05
4	4,1	150	35	6	1,29E+05	1,29E-04
5	4,1	52	37	7	5,52E+04	5,52E-05
6	4,1	96	35	7	9,64E+04	9,64E-05
					1,31E+06	1,31E-03
Volumen con espesor promedio de DAE						
		Área(b)	Espesor(c)	V (m³)	V (km³)	
		10000000	13	1,30E+08	1,30E-01	
Volumen total del DAE						1,31E-01

- (a) Fórmula del volumen para elipsoide utilizada en *hummocks*: $V = 4/3\pi R1 * R2 * R3$, siendo R = radio medido en metros, (b) área total en metros que cubre el depósito de avalancha incluyendo hummocks, (c) espesor promedio en metros del depósito de avalancha. Fuente: Roldán et al. (2011)

Sobre la base de las características texturales macroscópicas de los depósitos de avalanchas de Laripata, es de considerarse que el inicio del desprendimiento de roca de dicha avalancha haya estado relacionado a la inyección de magma de composición diorítica porfirítica emplazado en la parte sur del anfiteatro actual de Laripata.

Depósito de avalanchas de escombros de Quimsachata

El DAE de Quimsachata aflora a 10 km al sureste de la localidad de Santa Lucía. Se considera que este DAE provino del anfiteatro observado en el flanco oriental y occidental de los cerros Yanorcco y Sillata Occo, respectivamente, ya que se observa un anfiteatro con forma de herradura abierta hacia el noroeste en esas partes de los cerros (figura 4). Esta interpretación se confirma por la distribución del depósito de avalancha mencionado, el cual inicia justamente desde este anfiteatro y se distribuye en dirección hacia el noroeste, llegando hasta una distancia de 4 km desde su origen.

El DAE de Quimsachata presenta clastos de calizas, areniscas, lavas e ignimbritas como componentes de hasta 20 cm de diámetro, así como bloques de hasta 2 m de diámetro, que muestran fracturas en rompecabezas (figura 7). El DAE presenta 45% de matriz, por lo que el DAE presenta facie mixta.

Para estimar el volumen del DAE de Quimsachata (tabla 4), se realizó el mismo procedimiento para determinar el volumen de los depósitos anteriores. De esta manera se obtuvo un volumen estimado de 0,0637 km³ para todo el depósito de avalancha observable a simple vista.

Figura 7. Facie mixta en el DAE del sector Quimsachata, dónde se observa un bloque de caliza con estructura en rompecabezas, localizado a 2 km de la zona del anfiteatro



Tabla 4. Cálculo del volumen del DAE de Quimsachata

Volumen total hummocks						
Hummock(a)	$4/3\pi$	R1	R2	R3	V (m ³)	V (km ³)
1	4,1	173	94	9	6,00E+05	6,00E-04
2	4,1	250	77	10	7,89E+05	7,89E-04
3	4,1	274	88	12	1,19E+06	1,19E-03
4	4,1	219	73	8	5,24E+05	5,24E-04
5	4,1	282	75	7	6,07E+05	6,07E-04
					3,71E+06	3,71E-03
Volumen con espesor promedio de DAE						
		Área(b)	Espesor(c)	V (m ³)	V (km ³)	
		6000000	10	6,00E+07	6,00E-02	
Volumen total del DAE						6,37E-02

(a) Fórmula del volumen para elipsoide utilizada en *hummocks*: $V = 4/3\pi R1 * R2 * R3$, siendo R = radio medido en metros, (b) área total en metros que cubre el depósito de avalancha incluyendo *hummocks*, (c) espesor promedio en metros del depósito de avalancha. Fuente: Roldán et al. (2011)

Al igual que la avalancha de escombros de Puncune, es de considerarse que el inicio del desprendimiento de la avalancha de Quimsachata se debió al movimiento de alguna

de las fallas del sistema Cusco-Lagunillas, así como la desestabilización del edificio por crecimiento y sobrepresurización de domos de composición monzodiorítica, localizados al sur del anfiteatro.

DISCUSIÓN: ORIGEN DE LAS AVALANCHAS DE ESCOMBROS

El origen de las avalanchas de escombros en el Complejo Volcánico Sillapaca se asocia a la inestabilidad de los edificios volcánicos y al consecuente deslizamiento de un sector de estos debido posiblemente a diferentes factores, como la deformación y debilitamiento por inyección de magma, la presencia de fallas del Sistema de Fallas Cusco-Lagunillas (Carlotto, 1998) y el debilitamiento del edificio por algún proceso de alteración hidrotermal.

Según la bibliografía, se han propuesto tres tipos de colapso según el mecanismo detonante: Bezymianny, Unzen y Bandai (Ui et al., 2000). Ui et al. (2000) citan que el tipo Bezymianny se asocia a una erupción volcánica; los del tipo Unzen son causados por un sismo u otra causa no volcánica, y el tipo Bandai es generado por explosiones freáticas.

Por el entorno tectónico en el que se encuentran los depósitos de avalanchas de escombros (DAE), las características granulométricas (facie) y la distribución espacial de estos depósitos en los sectores Puncune, Laripata y Quimsachata, se sugiere que el origen de las avalanchas de escombros está ligado a paleosismos en algunas de las fallas del sistema Cusco-Lagunillas.

Los anfiteatros o zonas de arranque se encuentran abiertos en dirección al norte y pueden ser el reflejo del movimiento sinetral inverso del sistema de fallas NW-SE (Carlotto, 2013), así como los *hummocks* que presentan una orientación en el mismo sentido.

Finalmente, en la parte sur de la avalancha de escombros de Laripata, la inyección de magma desestabilizó dicho edificio volcánico y alimentó domos de composición monzodiorítica que desestabilizaron el edificio volcánico de Quimsachata, por crecimiento y sobrepresurización en el domo, generando probablemente dichos colapsos. Por ello, se sugiere que dichos eventos geológicos extremos se originaron por la combinación de estos factores detonantes.

CONCLUSIONES

Se cartografiaron y delimitaron tres depósitos de avalanchas de escombros (DAE) en los sectores Puncune, Laripata y Quimsachata que se emplazaron hasta una distancia de 5 km, 4 km y 4 km desde la zona fuente, respectivamente.

Se definen tres facies en los DAE: facie de bloques, con clastos de hasta 6 m de diámetro (Laripata); facie mixta, con *hummocks* compuestos por bloques envueltos en matriz arenosa (Quimsachata), y facie de matriz, con megaclastos menores a 4 m de diámetro (Puncune).

Por el entorno tectónico, las características granulométricas y la distribución espacial de los DAE, se infiere que las avalanchas de escombros pudieron haberse originado por la combinación de varios factores que incluyen: (i) inyección de magma de composición diorítica porfirítica emplazado en la parte sur de los depósitos; (ii) desestabilización del edificio por crecimiento y sobrepresurización de domos de composición monzodiorítica, y (iii) paleosismos en algunas de las fallas del Sistema de Fallas Cusco-Lagunillas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Juan Carlos Gómez por sus valiosos comentarios y apoyo en el transcurso de la elaboración de dicho proyecto de investigación. El presente trabajo fue subvencionado por fondos del Instituto Geofísico del Perú como parte de la investigación científica que realiza dicha institución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carlotto, V. (1998). *Évolution andine et raccourcissement au niveau de Cusco (13-16°S) Pérou: enregistrement sédimentaire, chronologie, contrôles paléogéographiques, évolution cinématique*. Thèse Doct., Univ. Grenoble I.
- Carlotto, V. (2013). Paleogeographic and tectonic controls on the evolution of Cenozoic basins in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru. *Tectonophysics*, 589, 195-219. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.002>
- Gamonal, A., J. C. Gómez, J. M. Sánchez, y J. L. Macías (2014). *Evidencias de depósitos de avalanchas de escombros en el Complejo Volcánico Sillapaca, Región Puno, Perú*. Congreso de Geología 2014, Lima-Perú.
- Gómez, J. C., J. L. Macías, J. L. Arce, J. M. Sánchez y C. Siebe (2012). Caracterización geológica de los depósitos de evaluación de avalancha de escombros en Chuquibamba y Cotahuasi, región Arequipa. En *Congreso Peruano de Geología*, 16, pp. 1024-1026. Lima. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú.
- Gómez, J. C., J. L. Macías, C. Siebe, y L. Ocola (2004). Delimitación y análisis sedimentológico de la avalancha de escombros del volcán Hualca Hualca, valle del Colca, Arequipa-Perú. En *Congreso Peruano de Geología*, 12, pp. 575-577. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú.
- Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 406-421. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<406:LCBE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<406:LCBE>2.0.CO;2)

- Klinck, B. A., R. A. Ellison y M. P. Hawkins (1986). *The Geology of the Cordillera Occidental and Altiplano West of Lake Titicaca, Southern Peru: Lima, Peru*. Instituto de Geología, Minería y Metalurgia, preliminary report.
- Leyrit, H. (2000). Flank collapse and debris avalanche deposits.
- Manrique, N. (2013). *Evolución vulcanológica y magmática del edificio reciente del Complejo Volcánico Tutupaca (Tacna)*. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Mariño, J. y J. C. Thouret (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (95), 7-31.
- Moriya, I. (1980). Bandaian eruption and landforms associated with it. In *Collection of Articles in Memory of Retirement of Prof. K. Nishimura, Tohoku University* (pp. 214-219) (in Japanese with English abstract).
- Palmer, B. A., B. V. Alloway y V. E. Neall (1991). Volcanic-debris-avalanche deposits in New Zealand-lithofacies organization in unconfined wet avalanche flows. In *Sedimentation in Volcanic Setting* (pp. 89-98) (Ed. By R. V. Fisher and G. A. Smith), <https://doi.org/10.2110/pec.91.45.0089>
- Roldán, J., G. Aguirre y J. Rodríguez (2011). Depósito de avalancha de escombros del volcán Temascalcingo en el graben de Acambay, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(1), 118-131.
- Siebert, L. (1984). Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 22, 163-197. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90002-7)
- Siebert, L., Glicken, H. y Ui, T. (1987). Volcanic hazards from Bezymianny and Bandai type eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 49, 435-459. <https://doi.org/10.1007/BF01046635>
- Ui, T., Yamamoto, H. y Suzuki-Kamata, K. (1986). Characterization of debris avalanche deposits in Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29, 231-243. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(86\)90046-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(86)90046-6)
- Ui, T., S. Takarada y M. Yoshimoto (2000). Debris Avalanches. En H. Sigurdsson (ed.), *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 617-626). San Diego, CA: Academic Press.
- Voight, B., Glicken, H., Janda R.J. y Douglass P.M. (1981). Catastrophic rockslide avalanche of May 18. *United States Geological Survey, Professional Paper*, 1250.