

**SGP**
FUNDADA 1924**Boletín de la Sociedad Geológica del Perú**Journal homepage: www.sgp.org.pe

ISSN 0079-1091

Fenomenología de las principales avalanchas de escombros en el Complejo Volcánico Sillapaca, Santa Lucía, Puno-Perú

Julio Lara ¹, Juan Gómez ¹, Juan Sánchez ², Ricardo Saucedo ³

¹ Instituto Geofísico del Perú, Perú (jlara@igp.gob.pe)

² Instituto Politécnico-UNAM, México (jsancheznu@ipn.mx)

³ Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, México (rgiron@uaslp.mx)

ABSTRACT

In the extreme southeast of the country between the Western Cordillera and the Altiplano, it stretches a chain of mountains called Volcanic Complex Sillapaca, geological formation, mainly consisting of andesitic lavas. This resort has undergone collapse of large masses of materials, called debris avalanches, highly destructive events that alter and shape the current morphology of the land. Evidence of these collapses are deposits of debris avalanches (DAE) observed in the district of Santa Lucia, province of Lampa, Puno region. In the study area, located in the extreme southeast of the town of Santa Lucia, they were mapped and delineated three deposits of debris avalanches in the Puncune, Laripata and Quimsachata sectors and areas boot or source of such deposits, covering an area of 30 km² of the total study area (200 km²). Volumes of 0.9, 0.55 and 0.74 km³ for DAE Puncune, Laripata and Quimsachata respectively were estimated. It is inferred that debris avalanches could have been caused by the combination of several factors including: 1) injection of magma that fed a dome dacitic porphyritic located in the southern part of the amphitheater Laripata, 2) destabilization of the building for growth and pressurization in the dome, 3) paleosismos in some of the system failures that caused Cuzco-Lagunillas landslides in Puncune and Quimsachata sectors.

RESUMEN

En el extremo sureste del país, 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, denominados avalanchas de escombros, eventos altamente destructivos que modifican y configuran la morfología actual del terreno. Evidencias de estos colapsos, son los depósitos de avalanchas de escombros (DAE) observados en el distrito de Santa Lucía, provincia de Lampa, región Puno. En la zona de estudio, localizada en el extremo sureste de la localidad de Santa Lucía, 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, abarcando 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: 1) inyección de magma que alimentó un domo de composición dacítica porfirítica emplazado en la parte sur del anfiteatro de Laripata, 2) desestabilización del edificio por crecimiento y sobrepresurización en el domo, 3) paleosismos en algunas de las fallas del sistema de Cuzco-Lagunillas que ocasionaron los deslizamientos en los sectores Puncune y Quimsachata.

Palabras claves: Avalancha de escombros, depósitos de avalanchas de escombros (DAE), hummocks, anfiteatro, facie.

1. Introducción

Los procesos destructivos durante la evolución geológica de un volcán pueden originar avalanchas de escombros y lahares. Una avalancha de escombros se forma durante el 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, aunque esto no ocurre en todos los casos (Ui *et al.*, 2000). Se cartografiaron los depósitos de avalanchas de escombros observados en los sectores Puncune, Laripata y Quimsachata, ubicados a 7 km al este, 11 km al sureste y 10km al sureste de la localidad de Santa Lucía (Puno), respectivamente. La distribución espacial y las características granulométricas sugieren que la fenomenología de estos eventos extremos es distinta. Por tanto, conocer las condiciones que desencadenaron la ocurrencia de las avalanchas de escombros mencionadas permitirá entender la evolución geológica de la zona y la configuración morfológica actual, así como también documentar paleoeventos geológicos extremos.

1.1. Avalanchas de escombros en el mundo

La erupción del Monte Santa Elena (Estados Unidos) en 1980 fue la primera erupción documentada científicamente en la que se observó la formación y depósito de una avalancha volcánica (Voight *et al.*, 1981). La avalancha de escombros de la erupción fue de hasta 2,3 km³ en volumen convirtiéndola en la mayor de la historia registrada. La erupción del volcán Bandai (Japón) en 1888 llevó a la gran caída de la parte norte del cuerpo volcánico. Esta erupción es muy conocida porque había registros del curso de la erupción y estudios detallados post-erupción, a menudo introducidas en algunos libros vulcanológicos fuera de Japón. La de Bandai fue una erupción que condujo a una avalancha de escombros causados por el vapor que puede ser llamado erupción tipo Bandai. La erupción del Monte Bezymianny (Rusia) el 30 de marzo de 1956 fue muy similar a la de los montes Pelée (1902) y Santa Helena (1980). En ella, una gran avalancha de escombros depositó 0.5 km³ de material y también produjo una explosión directa cuando el magma quedó expuesto al aire libre. Durante el evento se formó un cráter en forma de herradura, aunque a partir de entonces ha sido en su mayor parte rellenado por materiales provenientes del interior de la montaña. La avalancha de escombros de Unzen (Japón) en 1792 ocasionó 15,000 muertos aproximadamente. Un terremoto causó el colapso del domo de lava y generó una gran avalancha de escombros (0.3 km³). Esta avalancha recorrió 6.5 km hasta llegar al mar, generando un tsunami, el cual fue el causante de la gran mayoría de los muertos.

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), Figura 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 *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).

Volcano	Deposit	Height (km)	Length (km)	Volume (km ³)	Type	Source
Unzen	1792	0.7	6	0.40	U	D
Yasugasaki	Nirasaki	2.4	32	9		S
Faeshina	Otsuigawa	1.4	12.5	0.35		S
Asama	Tsukahara	1.8	20	2		S
Bandai	1888	1.2	11	1.5	Ba	S
Chokai	Kisikata	2.2	25	3.5	Ba?	S
Tashiro-dake	Iwasagawa	0.7	8.8	0.55		S
Komagatake	1640	1.2	15	1.1	Ba	S
Uzu	Zerikoji	0.5	6.5	0.3	Ba?	S
Taranaki	Pungarehu	2.6	31	7.5		S
Papandayan	1772	1.5	11	0.14		S
Iriya	1628	1.1	11	1.5		S
Banaho	Lucena and Lucban	1.7	26	5		S
Bezymianny	1956	2.4	18	0.8	Ba	S
Shiveluchi	1964	2	12	1.5		S
St. Helens	1980	2.55	24	2.5	Ba	S
Shasta	300-360 kyr B.P.	3.55	50	26		S
Chaos Crags	ca. 1650	0.65	5	0.15		D
Citlalapet	Tetzalzingo	4	85	1.8		L
Colima	Nevaldo de Colima	4.3	120	22-33		L
Socompa	Holocene	3	35	15		Ba
Rainier	Oscola	4.7	120	3.8		L

Figura 1. Depósitos de avalanchas de escombros en el mundo. Fuente: Ui *et al.* (2000).

1.2. Avalanchas de escombros en el Perú

El Perú no es ajeno a este tipo de fenómenos, por ejemplo en Arequipa, Moquegua y Tacna se han estudiado depósitos de avalanchas de escombros.

La avalancha de escombros del volcán Hualca Hualca fue producto del colapso parcial de la ladera norte del volcán, localizado en Arequipa, causado por procesos hidrotermales y/o sísmicos (origen no volcánico) en la parte superior de la ladera adyacente a la caldera del volcán. Este es el evento geológico de mayor magnitud ocurrido en el valle y configuró su actual morfología. Se ha estimado el volumen del depósito en 1 km³ aprox. El depósito de avalancha de escombros en Cotahuasi corresponde al colapso de una parte alta del altiplano de Arequipa, constituida de mantos extensos de ignimbrita de edad pliocena (5 Ma aproximadamente), dicho colapso dejó una estructura semicircular de 12 por 4 km de diámetro orientada al SE. Se generó una avalancha de escombros (origen volcánico) que se emplazó en el valle Cotahuasi, hacia el sur, recorriendo 45 km, con ancho promedio de 2 km. Evidencias de campo sugieren que esta avalancha bloqueó el drenaje principal del río Cotahuasi, originando un represamiento natural.

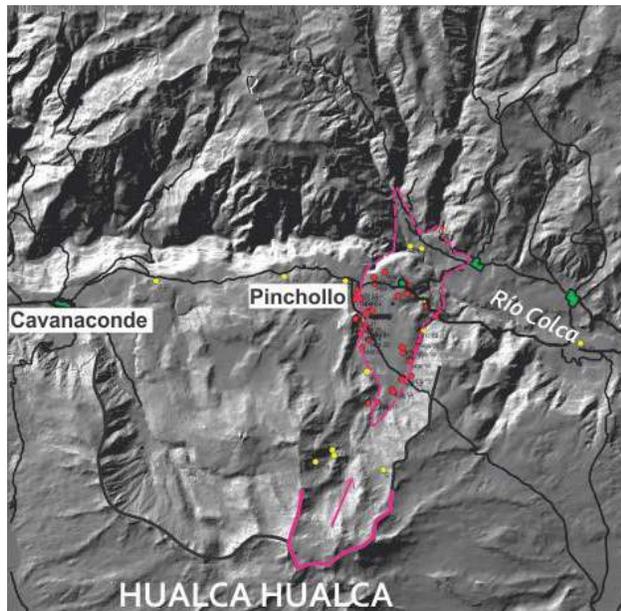


Figura 2. Zona de arranque (línea rosada) del depósito de avalancha de escombros

La cicatriz dejada por la avalancha de escombros de Chuquibamba tiene una forma alargada de 11 por 6 km de diámetro con espesor de 0.15 km. Esta generó una avalancha de escombros (origen no volcánico), en Arequipa, que recorrió 26 km desde las paredes del escarpe hasta las inmediaciones de Aplao. Desarrolló montículos ("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. En Moquegua, el volcán poligénico Ticsani es un estratovolcán formado por flujos de lavas, rocas volcanoclásticas e ignimbritas. Es cortado por un anfiteatro en forma de "herradura" abierto hacia el oeste y de 3 km de radio, el cual marca el inicio de extensos depósitos de avalanchas de escombros de aproximadamente 12 km³ de volumen. Se originaron por el colapso de gran parte del edificio volcánico y son los mayores depósitos de avalancha de edad Pleistocena del sur del Perú. Dicha avalancha de escombros fluyó en dirección oeste, llegando hasta la confluencia de los ríos Tambo y Omate, situado a 44 km de la cicatriz del colapso. A partir de allí, se transformó en lahar y se desplazó a lo largo del río Tambo hasta el océano Pacífico, recorriendo más de 150 km. En Tacna, los reportes históricos de actividad volcánica del volcán Tutupaca, dan cuenta de la ocurrencia de cuatro eventos en los años 1780, 1802, 1862 y 1902. La avalancha de escombros "Paipatja" que aflora al N y NE del Tutupaca, 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. Esta avalancha se presenta a manera de "colinas cónicas" y con estrías decimétricas que son interpretadas como indicadores de flujo. Gamonal et al. (2014) muestran evidencias de depósitos de avalanchas de escombros (DAE) en la región de Puno, provincia de Lampa, distrito de Santa Lucía, 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 se inspeccionaron el primer sector, que barca 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-Juliacá.

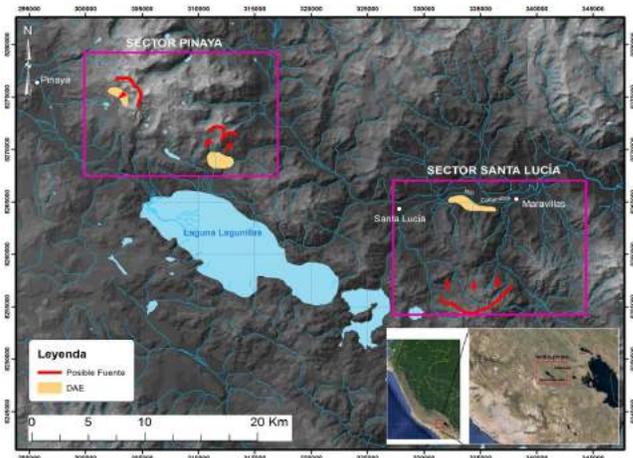


Figura 3: Depósitos de avalanchas de escombros en los sectores Pinaya y Santa Lucía. Fuente: Gamonal et al. (2014)

2. Avalanchas de escombros en el Complejo Volcánico Sillapaca

En el extremo SE del país, entre la Cordillera Occidental y el Altiplano, se extiende una cadena de montañas, denominado 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 modifican y configuran la morfología actual del terreno. El presente trabajo muestra las evidencias de estos colapsos, es decir, los depósitos de avalanchas de escombros (DAE) observados en dos sectores: Puncune, Laripata y Quimsachata.

3. Depósitos de avalanchas de escombros (DAE) en el Complejo Volcánico Sillapaca

En la zona de estudio localizada en el extremo sureste de la localidad de Santa Lucía (Lampa, Perú) se cartografiaron y delimitaron tres DAE, en los sectores Puncune, Laripata y Quimsachata, así como las zonas de arranque o fuente de dichos depósitos (Figura 4).

3.1. Depósito de avalanchas de escombros de Puncune

El DAE de Puncune incluye 15 *hummocks* bien definidos de hasta 40 m de altura. Se considera que dicho depósito se derivó del anfiteatro observado en los flancos oriental y occidental de los cerros Huayllatoco y Tolaocco, respectivamente, ya que se observa una cicatriz con forma de herradura abierta hacia el norte (Foto 1).

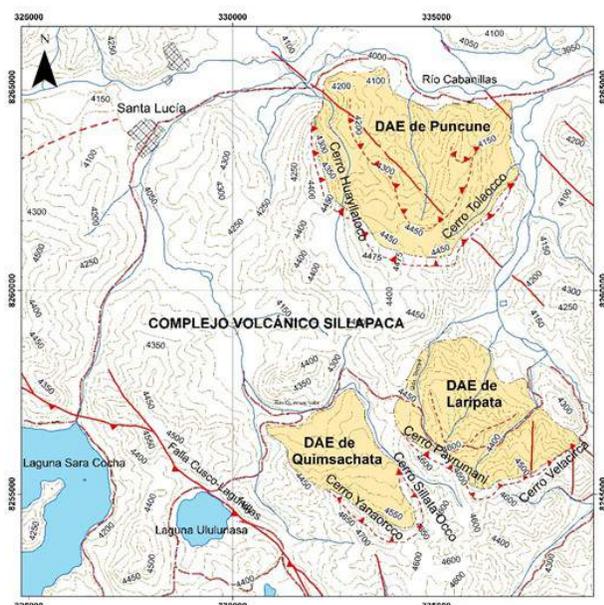


Figura 4. Depósitos de avalanchas de escombros en los sectores Puncune, Laripata y Quimsachata que cubren un área de 14 km², 10 km² y 6 km², respectivamente.



Foto 1: Vista panorámica de un segmento del anfiteatro, en el flanco oriental del Cerro Huayllatoco. Se aprecia el DAE de Puncune

Este depósito presenta clastos de andesitas porfíricas y basaltos como componentes principales, así como, megaclastos (Palmer *et al.*, 1991) de hasta 4 m de diámetro, estos presentan fracturamiento conocido como *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.

En base al contenido de matriz y a 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 "rompe-cabezas". La facie de matriz presenta clastos de andesitas porfíricas en una matriz arenosa de grano fino (Foto 2).



Foto 2. Facie de matriz y mixta, en esta última se observan megaclastos (líneas punteadas amarillas) que presentan estructura en rompecabezas.

Los paleosismos en algunas de las fallas del Sistema Cusco-Lagunillas ubicadas en la cabecera de la avalancha de escombros, pudieron haber generado dicho evento. Para estimar el volumen del DAE de Puncune (Cuadro 1), se calculó el área de dicho depósito, complementándose el cartografiado geológico con fotointerpretación de imágenes satelitales, para luego obtener un mínimo de 14 km².

Se determinó un espesor promedio de 50 m observado en el sector Puncune. 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 de 0.2 km³. De esta manera se obtuvo un volumen estimado de 0.9 km³ para todo el depósito de avalancha de escombros (Cuadro 1).

Cuadro 1. Cálculo del volumen del DAE de Puncune

Volumen total hummocks						
Hummock(a)	$4/3\pi$	R1	R2	R3	V (m ³)	V (km ³)
A	4.1	413	348	303	1.78E+08	0.18
B	4.1	130	132	115	0.08E+08	0.008
C	4.1	89	50	101	0.02E+08	0.002
D	4.1	74	93	105	0.03E+08	0.003
E	4.1	154	141	78	0.07E+08	0.007
					1.98E+08	0.2
Volumen con espesor promedio de DAE						
		Área(b)	Espesor(c)	V (m ³)	V (km ³)	
		14 km ²	50 m	7E+08	0.7	
Volumen total del DAE						0.9

(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 que cubre el depósito de avalancha incluyendo hummocks, (c) Espesor promedio del depósito de avalancha. Fuente: Roldán *et al.* (2011).

3.2. Depósito de avalanchas de escombros de Laripata

El DAE de Laripata aflora a 11 km al sureste de la localidad de Santa Lucía. Incluye 12 *hummocks* bien definidos de hasta 50 m de altura. Este depósito se derivó 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 (Foto 3).



Foto 3. Vista panorámica de un segmento del anfiteatro en el flanco oriental del Cerro Payurumani, y en el frente, una porción de un hummock proximal al anfiteatro que conforma el DAE de Laripata.

El DAE de Laripata presenta clastos de dacitas porfíricas como único componente, además de megaclastos de hasta 6 m de diámetro. Dichos megaclastos generalmente muestran estructura en rompecabezas (Foto 4). En general, la matriz es escasa (10%) y en las zonas cercanas al anfiteatro (1 km) está soportado por megaclastos, por lo que el depósito de avalancha de escombros presenta facie de bloques. En la parte sur de la avalancha de escombros, la inyección de magma alimentó un domo de composición dacítica porfírica que generó la desestabilización del edificio volcánico, por crecimiento y sobrepresurización en el domo, generando probablemente dicho evento. Para estimar el volumen del DAE (Cuadro 2), se realizó el mismo procedimiento para determinar el volumen del depósito anterior.



Foto 4. DAE de Laripata monolitológico compuesto por clastos de dacita porfírica en una matriz arenosa y con facie de bloques. En la parte superior (líneas punteadas) se pueden observar bloques que presentan estructura en rompecabezas.

3.3. Depósito de avalanchas de escombros de Quimsachata

El DAE de Quimsachata aflora a 10 km al sureste de la localidad de Santa Lucía. Incluye 10 hummocks bien definidos de hasta 125 m de altura. Se considera que este DAE se derivó del anfiteatro observado en el flanco oriental y occidental de los cerros Yanaorcco y Sillata Occo, respectivamente (Foto 5).

Volumen total hummocks						
Hummock (a)	$4/3\pi$	R1	R2	R3	V (m ³)	V (km ³)
A	4.1	413	348	303	1.78E+08	0.18
B	4.1	130	132	115	0.08+08	0.008
C	4.1	89	50	101	0.02E+08	0.002
D	4.1	74	93	105	0.03E+08	0.003
E	4.1	154	141	78	0.07E+08	0.007
F	4.1	100	98	67	0.03E+08	0.003
G	4.1	196	156	79	0.03E+08	0.009
					1E+08	0.1
Volumen con espesor promedio de DAE						
		Área(b)	Espesor(c)	V (m ³)		V (km ³)
		10 km ²	45 m	4.5E+08		0.45
Volumen total del DAE						0.55

Cuadro 2. Cálculo del volumen del DAE de Laripata.



Foto 5. Vista panorámica del anfiteatro en el flanco oriental del Cerro Yanaorcco, así como los hummocks pertenecientes al DAE de Quimsachata.

El DAE de Quimsachata presenta clastos de calizas, areniscas, lavas e ignimbritas como componentes, así como megaclastos de hasta 2 m de diámetro, que muestran fracturas en rompecabezas (Foto 6). El DAE presenta 45% de matriz, por lo que el DAE presenta facie mixta. La reactivación en algunas de las fallas del Sistema Cusco-Lagunillas ubicadas en la parte sur de la avalancha de escombros, pudo haber generado dicho evento. Para estimar el volumen del DAE de Quimsachata (Cuadro 3), se realizó el mismo procedimiento para determinar el volumen de los depósitos anteriores.



Foto 6. Megaclasto de caliza con estructura de rompecabezas, localizado a 2 km de la zona del anfiteatro.

Cuadro 3. Cálculo del volumen del depósito de avalancha de Quimsachata.

Volumen total hummocks						
Hummock (a)	$4/3\pi$	R1	R2	R3	V (m ³)	V (km ³)
A	4.1	216	117	142	0.1E+08	0.01
B	4.1	234	100	89	0.08E+08	0.008
C	4.1	78	123	95	0.04E+09	0.004
D	4.1	256	177	187	0.3E+08	0.03
					0.5E+09	0.05
Volumen con espesor promedio de DAE						
	Área(b)	Espesor(c)	V (m ³)		V (km ³)	
	6 km ²	115 m	4.2E+08		0.69	
Volumen total del DAE						0.74

4. Conclusiones

- Se cartografiaron y delimitaron 3 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 megaclastos de hasta 6 m de diámetro (Laripata); facie mixta, con *hummocks* compuestos por megaclastos envueltos en matriz arenosa (Quimsachata); y facie de matriz, con megaclastos menores a 4 m de diámetro (Puncune).

- Las características granulométricas y la distribución espacial de los DAE sugieren que las avalanchas son singenéticas, es decir, se originaron al mismo tiempo. Las causas de dichos eventos fueron la combinación de tres factores: 1) inyección de magma que alimentó un domo de composición dacítica porfirítica (sector Laripata), 2) desestabilización del edificio por crecimiento y sobrepresurización en el domo, 3) paleosismos en algunas de las fallas del Sistema Cusco-Lagunillas (sectores Puncune y Quimsachata).

Referencias

Bernard, B. and van Wyk de Vries, B. (2009). Distinguishing volcanic debris avalanche deposits from their reworked products: the Perrier sequence (French Massif Central): Bulletin of Volcanology, 71, 1041-1076.

Brantley, S.R. and Glicken, H. (1986). Volcanic debris avalanches, earthquakes and volcanoes: Earthquakes and Volcanoes, 18, 195-206.

Capra and Macías, J.L. (2002). The Naranjo debris flow deposits (10 km³): A dam breakout derived at the Pleistocene debris avalanche deposit al Nevado de Colima Volcano (Mexico), Journal of Volcanol. Geotherm. Res., 117: 213-235.

Capra, L., Macías, J.L., Scott, M.K., Abrams, M., Garduño-Monroy, V.H. (2002). Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico-behavior and implications for hazard assessment: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 113, 81-110.

Costa, J.E. & Schuster, R.L. (1988). The formation and failure of natural dams, Geol. Soc. Amer. Bull., 100 n.7, 1054-1068.

Crandell, D.R., Miller, C.D., Glicken, H.X., Christiansen, R.L., & Newhall, C.G., (1984). Catastrophic debris avalanche from ancestral Mount Shasta volcano, California: Geology, v. 12, p. 143-146.

Gamonal, A.; Gómez, J.C.; Sánchez, J.M. & Macías, J.L. (2014). Evidencias de Depósitos de Avalanchas de Escombros en el Complejo Volcánico Sillapaca, Región Puno, Perú. Congreso de Geología 2014, Lima-Perú.

Glicken, H. (1991). Sedimentary architecture of large volcanic-debris avalanches, en Fisher, R.V., Smith, G.A. (eds.), Sedimentation in Volcanic Settings: Tulsa, OK, SEPM, SEPM Special Publication 45, 99-106.

Janda, R. J., Scott, K. M., Nolan, K. M. & Martison, H.A. (1981). Lahar movement, effects, and deposits, in the 19080 eruptions of Mount St. Helens, Washington, edited by Lipman, P.W. and Mullineaux, D.R., U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 1250, pp. 461-478.

Leyrit, H. (2000). Flank collapse and debris avalanche deposits.

Lipman, P.W. (1976). Caldera collapse breccias in the western San Juan Mountains, Colorado: Geological Society of America Bulletin, 87, 1397-1410.

Mullineaux, R.D. & Crandell, D.R. (1981). The eruptive history of Mount St. Helens, en Lipman, P.W., Mullineaux, R.D. (eds.), The 1980 eruption of Mount St. Helens: Whashington, D.C., United States Geological Survey, Professional Paper 1250, 844 pp.

Palmer, B.A., Alloway, B.V. & Neall, V.E. (1991). Volcanic-debris-avalanche deposits in New Zealand-lithofacies organization in unconfined wet avalanche flows. In: Sedimentation in Volcanic Setting (Ed. By R.V. Fisher and G.A. Smith), pp.89-98.

Roldán, J., Aguirre, G. & Rodríguez, J. (2011). Depósito de avalancha de escombros del volcán Temascalcingo en el graben de Acambay, Estado de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 28, núm. 1, 2011, p. 118-131.

Scott, K. M. (1988). Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz river system, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 1447-A, pp. A1-A74.

Siebe, C., Komorowsky, J.C. & Sheridan, M.F. (1990). Reconstrucción de las diferentes fases evolutivas de crecimiento y subsecuente colapso gravitacional de los domos riolíticos localizados en la cuenca de Serdán-Oriental, estados de Puebla y Veracruz (resumen), en II Reunión Nacional "Volcán Colima": Colima, México, Universidad de Colima.

Siebert, L. (1984). Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits and associated eruptions: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 22, 163-197.

Ui, Tadahide (1983). Volcanic debris avalanche deposits identification and comparison with non-volcanic debris stream deposits: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 18, p. 135-150.

Ui, T., Takarada, S. & Yoshimoto, M. (2000). Debris Avalanches, en Sigurdsson, H. (ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*: Academic Press, 617- 626.

Yokoyama, I., Tilling, R. I. & Scarpa, R. (1984). International Mobile Early-Warning Systems (s) for Volcanic Eruptions and Related Seismic Activities, UNESCO (Paris), FP/2106-82-01(2286), 102 pp.

-