



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

DINÁMICA DE LA AVALANCHA VOLCÁNICA DE DETRITOS DEL FLANCO  
SUROESTE DEL VOLCÁN LLULLAILLACO, ANDES CENTRALES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

PABLO DANIEL CORADA HERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA:  
ANGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JORGE CLAVERO RIBES  
MARISOL LARA CASTILLO  
CRISTIÁN RAMÍREZ SALVO

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE GEÓLOGO

POR: Pablo Daniel Corada Hernández

FECHA: 02/02/2018

PROFESOR GUÍA: Angelo Castruccio Álvarez

DINÁMICA DE LA AVALANCHA VOLCÁNICA DE DETRITOS DEL FLANCO  
SUROESTE DEL VOLCÁN LLULLAILLACO, ANDES CENTRALES

En el presente trabajo se estudian los depósitos de avalancha volcánica ubicados en el sector suroeste del volcán Llullaillaco ( $24^{\circ}43' S$ ,  $68^{\circ}32' W$ ), el cual se encuentra en la Zona Volcánica de los Andes Centrales, en la frontera entre Chile y Argentina.

Considerando la complejidad de la generación, transporte y depositación del material en las avalanchas volcánicas, el objetivo principal de esta memoria es comprender la dinámica del proceso que generó estos depósitos, así como proponer un origen del colapso de este edificio volcánico. Para alcanzar dicho objetivo, se definieron cuatro facies dentro del depósito, se determinaron los parámetros físicos que caracterizan a la avalancha, tales como velocidades e indicadores de movilidad, además de realizar comparaciones con los depósitos ubicados tanto en el este como en el oeste del volcán, para establecer los límites de la avalancha.

El método utilizado incluye un completo análisis del depósito, el cual consta de tres lóbulos principales, orientados entre E-W y SW, los cuales provienen de una zona a mayor altura, encontrada justo al sur del volcán Llullaillaco. Cubre un área total de  $31,5 \text{ km}^2$ , y alcanza un volumen aproximado de  $0,5 \text{ km}^3$ . Presenta un gran contenido de estructuras tipo *hummock* y *ridge*, tanto longitudinales como oblicuos a la dirección de transporte, y con formas basales, principalmente, ovaladas o circulares. Los bloques encontrados corresponden a clastos dacíticos porfíricos de biotita o anfíbol, variando en su grado de alteración, y en menor proporción, fragmentos volcánicos silicificados, y alcanzan diámetros de hasta 6 m, son subangulosos, y en sectores, presentan marcas de impacto. La matriz del depósito contiene los mismos componentes que los bloques, y muestra un aumento del tamaño de grano hacia sectores en que la avalancha poseía un régimen extensivo, y una disminución hacia sectores compresivos, por el mayor grado de fracturamiento mecánico.

Para esta avalancha se estimó una velocidad máxima de 350 km/h, un coeficiente de fricción promedio de 0,13, una distancia excesiva entre 9,6 km y 14,7 km, y un ratio  $A/V^{2/3}$  igual a 50. Todos estos parámetros se encuentran dentro de rangos típicos para depósitos del mismo tipo en la Zona Volcánica Central de Los Andes.

Debido a la diferencia en las estructuras y bloques, se propone que esta avalancha corresponde a un evento distinto al que generó los depósitos al oriente del volcán. Por otra parte, el rango de edad para esta avalancha estaría entre 0,7 Ma y  $0,417 \pm 0,078$  Ma.



*La felicidad está en el camino, no en el objetivo*  
*Dedicada a mi familia y a mi pareja por su apoyo incondicional*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Servicio Nacional de Geología y Minería por permitirme participar en el proyecto de mapeo regional de la carta geológica del área de Salar de Punta Negra y Cerro de Aguas Calientes, enmarcado en el Plan Nacional de Geología

A mi profesor guía, Angelo Castruccio, por su constante apoyo durante el desarrollo de esta memoria. También, a los miembros de la comisión, Jorge Clavero y Marisol Lara, por su buena disposición y correcciones que sirvieron para mejorar este trabajo, y especialmente a Cristián Ramírez, por acompañarme durante todo este proceso, desde darme la oportunidad de poder desarrollar mi tesis en el Sernageomin, ser parte del trabajo en terreno y su constante esfuerzo en integrarme en las diferentes áreas del Servicio, hasta ser mi cordada en numerosas expediciones a la montaña.

También, debo agradecer a todos los integrantes del Sernageomin que me dieron su apoyo de distintas formas. A los geólogos que me acompañaron y me guiaron, Víctor Villa, Rodolfo Ferrando, Carlos Venegas y Diego Montecino. A los conductores, Héctor Toro, Patricio Casas, Herman Rojo, Gonzalo Núñez, y al cocinero, Julio Díaz, por su invaluable aporte en terreno. A quienes me ayudaron durante los análisis de laboratorio, Laura Varas, Felipe Fuentes, José Ramírez, Eugenio Pizarro y Daniel Cabrera.

A todos mis amigos, quienes estuvieron conmigo durante este trayecto, desde Plan Común: Esteban Díaz, Álvaro Acuña, Alonso Guzmán, Felipe Contador, Luis Guarda, Ignacio Gutiérrez; así como a los que conocí y me acompañaron durante la carrera de Geología: Constanza Bravo, María Jesús Fuentes, Nicolás Cádiz, Cristóbal Machuca y Eitel Rosenkranz. Gracias a todos por estos siete años de risas, experiencias y hermandad.

A mis hermanos, primos, sobrinos, tíos y abuelas, todos quienes de alguna forma aportaron en mi formación como persona y profesional. También, a la familia de mi novia, que me ayudaron en todo cuanto pudieron en estos años.

A mis padres, Roberto Corada y Margarita Hernández, quienes siempre me apoyaron y creyeron en mí, siendo un pilar fundamental en cada paso que di para llegar a este punto.

Por último, agradezco infinitamente a mi compañera de vida, Valeska Narváez, quien estuvo conmigo siempre que lo necesité, durante todo este proceso pude contar con su apoyo, alegría y amor, sin los cuales todo hubiese sido mucho más duro. Te amo.

# TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Formulación del estudio propuesto	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo general	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.3	Hipótesis de trabajo	4
1.4	Localización	5
CAPÍTULO 2	ANTECEDENTES	6
2.1	Marco Geológico	6
2.1.1	Marco Estratigráfico	6
2.1.2	Marco Geotectónico	10
2.2	Marco Teórico	12
2.2.1	Avalanchas Volcánicas de Detritos	12
CAPÍTULO 3	Metodología de trabajo	28
3.1.1	Trabajo en terreno	28
3.1.2	Trabajo de gabinete	29
CAPÍTULO 4	RESULTADOS	33
4.1	Caracterización morfológica, estructural y petrográfica del depósito	33
4.1.1	Caracterización geomorfológica de la zona de estudio	35
4.1.2	Descripción petrográfica de y estructural de las facies	38
4.1.3	Descripción petrográfica y estructural de la Zona Norte	55
4.2	Análisis granulométrico del depósito	61
4.2.1	Caracterización granulométrica de las facies	62
4.2.2	Caracterización granulométrica de la Zona Norte (ZN)	65
4.3	Parámetros físicos	68
4.3.2	Velocidad mínima	70
4.3.3	Velocidad máxima	70
4.3.4	Coefficiente de fricción	71
4.3.5	Distancia de viaje excesiva	72
4.3.6	Ratio $A/V^{2.3}$	72
CAPÍTULO 5	DISCUSIÓN	73
5.1	Depósito de la avalancha	73
5.1.1	Límites del depósito	73
5.1.2	Distribución y orientación de estructuras	74

5.1.3	Textura, distribución y litología de los bloques .....	74
5.1.4	Variaciones en la granulometría .....	75
5.2	Parámetros Físicos .....	76
5.3	Comparación con depósitos de avalancha de detritos volcánicos en sector argentino	76
5.4	Comparación de los parámetros físicos con otros depósitos.....	77
5.5	Origen y mecanismos de transporte de la avalancha.....	80
CAPÍTULO 6 CONCLUSIÓN.....		83
CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA.....		85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Imagen satelital del volcán Llullaillaco y las delimitaciones de los depósitos de avalancha al suroeste. Se distinguen con los colores rojo y verde los dos depósitos mayores identificados en las imágenes satelitales, que se diferencian en los colores y texturas que presentan.....	2
Figura 2 Imagen satelital mostrando la ruta de acceso al campamento base desde donde se realizan los trabajos en terreno, partiendo desde la ciudad de Antofagasta, II Región.....	5
Figura 3 En este mapa se muestra la geología del volcán Llullaillaco. La línea negra continua indica el límite entre Chile y Argentina. 1) Ignimbritas del Oligoceno-Mioceno Inferior, rocas sedimentarias y volcánicas plegadas, e intrusivos del Paleozoico; 2) lavas de volcanes del Mioceno Superior; 3) lavas del Llullaillaco I; 4) depósito de azufre y alteración hidrotermal; 5) lavas del Llullaillaco II; 6) Depósitos de detritos volcánicos del Plioceno-Cuaternario; 7) depósitos aluviales, localmente asociados a depósitos de pómez o flujos detríticos; 8) cráter erosionado. Modificada de Rodríguez 2010.....	9
Figura 4 Mapa esquemático de la zona norte de Chile y noroeste de Argentina, mostrando los lineamientos y sistemas de fallas a escala regional. También se señala la localización del magmatismo durante el Mioceno-Pleistoceno, los pórfidos cupríferos y los centros volcánicos mayores. Tomada de Richards y Villaneuve, 2004. ....	11
Figura 5 Fotografía tomada de Glicken, 1996. Aparece el depósito de la avalancha del volcán St. Helens de 1980, con las morfologías típicas que genera este tipo de remociones. ....	12
Figura 6 Esquema representativo de las diferentes profundidades a las que puede cortar un plano de deslizamiento, generando los diferentes tipos de avalancha. ....	14
Figura 7 Modelo general de una avalancha volcánica, modificado de (van Wyk de Vries y Davies, 2015). (A) Vista en perfil del origen de una avalancha volcánica, con su evolución en el avance y extensión del depósito. (B) Vista en planta de la evolución de las estructuras presentes en un depósito de avalancha. ....	16
Figura 8 Tomada de van Wyk de Vries y Davies, 2015. En (a) se observan bloques de lavas y piroclastos, preservando su estratificación original. También, en azul se señalan algunas estructuras, por las que se inyectan facies mixtas. En (b) se observan facies matriz de grano grueso, inyecciones de facies mixtas y contactos fluidos con depósitos piroclásticos.....	17
Figura 9 Tomado de van Wyk de Vries y Davies, 2015. Ejemplos de zonas basales de distintas avalanchas. (A) Guijarros deformados y movilizados bajo un plano de cizalles muy marcado entre la zona basal y un bloque superior de lava. (B) Se observa una zona de cizalle basal, mientras que en la parte superior aparece un depósito de lava muy fracturado y desmembrado. (C) Acercamiento a la zona de cizalle, con rotación de pequeños granos. ....	18
Figura 10 (a) y (b) muestran distintas marcas de impacto, que se generan al chocar los bloques durante el transporte de la avalancha. Tomada de Clavero et al., 2002. (c) Se presenta un bloque de más de 20 m de diámetro con textura de rompecabezas (jigsaw) en el depósito de avalancha de detritos del volcán Socompa. Tomada de Francis et al., 1985. ....	19
Figura 11 Tomada de Hayashi y Self, 1992. (a) Muestra la correcta medición de H y L, (b) muestra la típica medición para depósitos de avalanchas de detritos. ....	20

Figura 12 Tomada de Hayashi y Self, 1992. (a) Coeficiente de fricción de un bloque deslizante en un plano inclinado. (b) Geometría de la posición inicial y final de un bloque deslizante por un plano inclinado.....	22
Figura 13 Figura tomada de Francis et al., 1985, y que muestra la dirección inferida del flujo primario y secundario de la avalancha de detritos del volcán Socompa, así como sus levées y escarpes.....	23
Figura 14 Figura tomada de Clavero et al., 2004. a Volcán Parinacota visto desde el sureste, mostrando en R la cicatriz que dejó la avalancha y que luego fue rellenada con los nuevos depósitos. b Avalancha del volcán Parinacota vista desde el suroeste, mostrando las típicas formaciones de cerrillos. ....	24
Figura 15 Figura tomada de Naranjo y Francis, 1987. Fotografía aérea del flanco este del volcán Lastarria, mostrando la cicatriz y el depósito que dejó la avalancha volcánica. ....	25
Figura 16 Vista hacia el este del depósito de avalancha del volcán Ollagüe, con presencia de hummocks de grandes dimensiones. Al fondo el cono volcánico actual. Figura tomada de Clavero et al., 2004. ....	26
Figura 17 Imagen satelital Aster mostrando el depósito de la avalancha volcánica dirigida hacia el este del volcán Lullailaco. Se observa cómo ésta se divide en dos lóbulos separados por el cerro Rosado, y cómo alcanza los sedimentos de la Salina del Lullailaco. Figura tomada de Rodríguez, 2010.....	27
Figura 18 Imagen satelital del Basemap de ArcGIS. Los puntos de color verde indican los lugares en que se tomaron las muestras, y cómo se asocian espacialmente con el depósito de avalancha. ....	28
Figura 19 Tabla de Clasificación granulométrica, modificada de Wentworth, 1922. ....	30
Figura 20 Esquema del perfil del depósito de la avalancha en profundidad., utilizado para estimar los espesores de cada sector. H corresponde a la profundidad máxima del depósito, y h es el espesor promedio del área estudiada. La línea negra continua señala la superficie del depósito, mientras que la segmentada indica la proyección en profundidad de la pendientes adyacentes al depósito. ....	31
Figura 21 División en facies de la zona de estudio. ZA: Facies Zona en Altura; LN: Facies Lóbulo Norte; LC: Facies Lóbulo Central; LS: Facies Lóbulo Sur. ....	33
Figura 22 A la izquierda, se señala con la línea roja segmentada el corte de los depósitos antiguos del volcán Lullailaco, y cómo son cubiertos por lavas modernas hacia el SE. A la derecha, se observa un acercamiento del contacto, el cual se indica con la línea roja segmentada. ....	34
Figura 23 Mapeo de pendientes del depósito de la avalancha al suroeste del volcán Lullailaco, donde se muestran las diferencias de pendiente, variando de verde oscuro hasta naranja-rojo conforme aumenta la pendiente. Depósito dividido en las cuatro facies definidas para la avalancha volcánica.....	35
Figura 24 Mapeo de dirección de pendientes del depósito de la avalancha al suroeste del volcán Lullailaco, donde: en rojo se indica hacia el norte, amarillo al este, verde al oeste y azul al sur. Depósito dividido en las cuatro facies definidas para la avalancha volcánica.....	36
Figura 25 Estructuras de la ZA. En negro se encierra la zona de estudio, en azul se indican los hummocks y en verde los ridges. Imagen satelital Aster.....	38
Figura 26 Diagrama de roseta indicando el rumbo de las estructuras presentes en ZA. A) Hummocks. B) Ridges. ....	39



Figura 27 Depósito al sur del volcán Llullaillaco (ZA). En color pardo se observa el campo de hummocks, y hacia la izquierda (oeste) se ve el portezuelo que limita con los depósitos a menor altura.....	40
Figura 28 Distribución y texturas de los bloques en ZA. A) Distribución y variabilidad litológica de los bloques más comunes encontrados en la zona. B) Bloque aislado de mayor tamaño (aprox. 2.5 m).....	40
Figura 29 Fotografía vista desde el sur, se muestra en primer plano el depósito ZN, observándose un campo llano y más en el fondo suaves lomas. Al fondo el volcán Llullaillaco. ....	41
Figura 30 Diagrama de roseta indicando el rumbo de las estructuras presentes en LN. A) Hummocks. B) Ridges.....	42
Figura 31 Estructuras del LN. En negro se encierra la zona de estudio, en azul se indican los hummocks y en verde los ridges. Hacia la zona más distal (zona más amarillenta) pareciera que la avalancha remontó unos cerros más antiguos durante su transporte. Imagen satelital Aster. ....	43
Figura 32 Distribución y texturas de bloques en LN. A) Distribución de los bloques en zonas proximales del depósito. B) Variabilidad litológica en zonas proximales del lóbulo. C) Distribución de los bloques den zona distales, con presencia de bloques de hasta 2 m. D) Variabilidad litológica en los clastos encontrados en zonas distales. ....	44
Figura 33 Estructuras del LC. En negro se encierra la zona de estudio, en azul se indican los hummocks y en verde los ridges. Imagen satelital Aster con color real.....	45
Figura 34 Fotografía de la superficie abarcada por LC, mirando hacia el este. Se observa la alta concentración de bloques y los hummocks hacia el centro del lóbulo. ....	46
Figura 35 Diagrama de roseta indicando el rumbo de las estructuras presentes en LC. A) Hummocks. B) Ridges. ....	46
Figura 36 Distribución y texturas de bloques en LC. A) Distribución de bloques de mayor tamaño en zonas distales. B) Marcas de impacto en bloques de la zona distal. C) Distribución de los bloques en zonas distales. D) Variabilidad litológica, en particular, se observa un bloque prismático vítreo.....	47
Figura 37 Estructuras de LS. En negro se encierra la zona de estudio, en azul se indican los hummocks y en verde los ridges. Imagen satelital Aster .....	49
Figura 38 Diagrama de roseta indicando el rumbo de las estructuras presentes en LS. A) Hummocks. B) Ridges.....	50
Figura 39 Depósito LS visto desde el este. Se observa la presencia de muchos hummocks, los levées y cómo el depósito remonta hacia el final del valle .....	51
Figura 40 Distribución y texturas en bloques en LC, zonas proximales y medias. A) Distribución de bloques en zonas proximales. B) Bloque aislado de gran tamaño (unos 5 m) en zona proximal. C) Variabilidad litológica en zona proximal, con presencia de lavas grises y probables piroclastos. D) Distribución de bloques en zonas medias del lóbulo. E) Marcas de impacto en algunos bloques de gran tamaño, también en zonas medias.....	52
Figura 41 Distribución y texturas en bloques en LC, zonas distales del lóbulo. A) y C) muestran la distribución y variabilidad litológica para el sector lateral y para el centro, respectivamente. B) y D) muestran marcas de impacto en bloques de mayor tamaño también para los laterales y el centro, respectivamente.....	53
Figura 42 Fotografía vista desde el sur, se muestra en primer plano el depósito ZN, observándose un campo llano y más en el fondo suaves lomas. Al fondo el volcán Llullaillaco. ....	56
Figura 43 Imagen satelital Aster, donde se muestran las delimitaciones de la Zona Norte, depósito al norte de la zona de estudio.....	56

Figura 44 Distribución y textura de los bloques en ZN. En A) y B) se observa la variabilidad de clastos presentes en el lóbulo norte, con sus clastos subredondeados y subangulosos. C) Bloque aislado subredondeado, presente en la zona proximal del lóbulo sur. D) Distribución de los bloques en las zonas medias y proximales del lóbulo sur, siendo polimícticos y muchos de ellos alterados. E) Distribución de los bloques en la zona distal del lóbulo sur, con bloques de hasta 1 m. F) Variabilidad de clastos en la zona distal, con presencia de bloques de lavas y algunos de pómez. ....	57
Figura 45 Mapa indicando la variación porcentual del peso de cada tamaño de grano para cada muestra. Los gráficos van, de izquierda a derecha, desde phi -2 hasta phi 4 según la escala Udden-Wentworth. ....	61
Figura 46 Gráfico de porcentaje en peso versus tamaño de grano para las muestras obtenidas en la ZA.....	62
Figura 47 Gráfico de porcentaje en peso versus tamaño de grano para las muestras obtenidas en LN .....	63
Figura 48 Gráfico de porcentaje en peso versus tamaño de grano para las muestras obtenidas en LC.....	64
Figura 49 Gráfico de porcentaje en peso versus tamaño de grano para las muestras obtenidas en la LS .....	65
Figura 50 Gráfico de porcentaje en peso versus tamaño de grano para las muestras obtenidas en la ZN.....	66
Figura 51 Imagen satelital Aster. En color verde se indican las trazas de los perfiles AA', BB' y CC', para los cuales se calcularon los parámetros físicos. ....	68
Figura 52 Perfil de elevación AA', correspondiente al lóbulo norte del depósito ..	69
Figura 53 Perfil de elevación BB', correspondiente al lóbulo central del depósito	69
Figura 54 Perfil de elevación CC', correspondiente al lóbulo sur del depósito .....	70
Figura 55 Gráfico de Coeficiente de Fricción (H/L) versus Volumen (V) para avalanchas volcánicas, no volcánicas y depósitos de nubes ardientes (datos de Ui, 1983). Además se incluyen datos de los depósitos de avalancha de los volcanes Socompa (Wadge et al., 1995), Parinacota (Clavero et al., 2002), Lastarria (Naranjo y Francis, 1987) y del Llullaillaco, en sector argentino (Richards y Villeneuve, 2004), además de la avalancha volcánica estudiada en este trabajo. ....	78
Figura 56 Gráfico de Distancia de Viaje Excesiva (km) versus Volumen (V) para avalanchas volcánicas, no volcánicas y depósitos de nubes ardientes (datos de Ui, 1983). Además se incluyen datos de los depósitos de avalancha de los volcanes Socompa (Wadge et al., 1995), Parinacota (Clavero et al., 2002), Lastarria (Naranjo y Francis, 1987) y del Llullaillaco, en sector argentino (Richards y Villeneuve, 2004), además de la avalancha volcánica estudiada en este trabajo. ....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla de asociación entre los parámetros físicos calculados, y el método en que esto se hizo.....	31
Tabla 2 Resumen de las características principales de cada Facies definida para el depósito de avalancha al SW del volcán Llullaillaco, así como de la Zona Norte.....	60
Tabla 3 Porcentajes en peso para los distintos tamaños de grano de las muestras de matriz tamizadas. Ordenadas desde la muestra más cercana al volcán Llullaillaco para cada sector de la zona de estudio .....	67
Tabla 4 Resumen de las propiedades físicas calculadas por diferentes autores en avalanchas volcánicas de los Andes Centrales.....	80

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

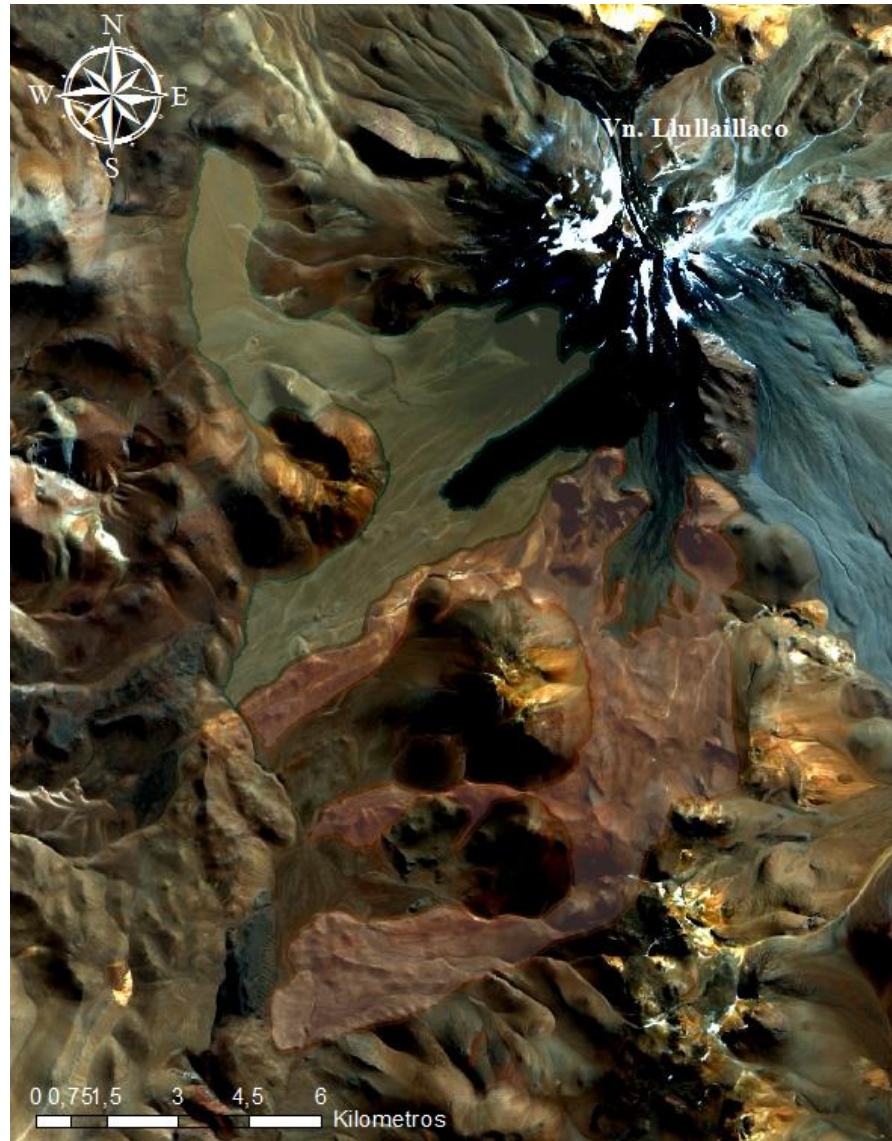
## 1.1 Formulación del estudio propuesto

Este trabajo se encuentra enmarcado en el mapeo geológico a escala 1:100.000 de la zona del Salar de Punta Negra y Cerro de Aguas Calientes, asociado al Plan Nacional de Geología del Sernageomin.

La comprensión de los procesos que generaron la geomorfología actual del área que rodea al volcán Lullailaco, es fundamental para la reconstrucción de la evolución geológica y volcánica tanto del volcán mismo, como de todo el sector cordillerano de la zona norte de Chile. Un proceso que transformó en gran medida la presente morfología del área, corresponde a los colapsos que han afectado a los estratovolcanes de la zona. Por lo tanto, toma gran importancia el estudio de los depósitos de las avalanchas volcánicas del Lullailaco, lo que ayudaría tanto, en un mayor entendimiento de estos procesos geológicos, como en la reconstrucción de la historia geológica y de la actividad volcánica en la zona durante el Pleistoceno-Holoceno. Por otra parte, conocer la evolución geológica de este volcán puede aportar en la comprensión de los procesos generativos de otros complejos volcánicos de la Zona Volcánica Central del Cinturón Volcánico de Los Andes.

Los volcanes de la ZVC han sido afectados en diferentes oportunidades, durante el Holoceno y Pleistoceno, por eventos catastróficos que han provocado colapsos de sus edificios volcánicos. Algunos ejemplos de los depósitos encontrados de dichos eventos, son las avalanchas volcánicas del volcán Parinacota (Clavero et al., 2002) y la del volcán Socompa (Francis et al., 1985; Wadge et al., 1995). El Lullailaco en particular, a lo largo de su historia, ha sufrido al menos un colapso de su edificio volcánico, aunque probablemente haya pasado por más de uno de estos eventos catastróficos (objeto de este estudio). De éstos, el más estudiado corresponde al depósito de avalancha de detritos ubicado en el flanco SE, hacia el lado argentino (Francis y Wells, 1988; Rodríguez, 2010; Richards y Villeneuve, 2004; Arancibia et al., 2009; González et al., 2009). Debido a su excelente preservación, mantiene las características típicas de un depósito de este tipo, tales como *levées* y *ridges* longitudinales. Para esta avalancha, se ha propuesto que el factor gatillante podría haber sido una erupción de lava o el emplazamiento de un domo magmático.

En el sector ubicado al suroeste del volcán Lullailaco, existe un depósito mapeado como una avalancha de detritos de hasta 22 km de longitud, asociada al colapso del sector suroriental del edificio volcánico, con morfologías bien conservadas y presencia de bloques con diaclasamiento prismático (Gardeweg et al., 1993). Esta descripción es la única existente para estos depósitos, por lo que se hace pertinente un estudio detallado de sus características para determinar cuál fue el proceso que los originó, y, si se asocia a una avalancha de detritos, cuál fue el comportamiento y la dinámica en el momento de su emplazamiento. Por lo tanto, este trabajo se enfocará en la descripción de dichos depósitos (Figura 1), y así reconocer las diferentes estructuras, variaciones granulométricas y geometría de cada uno de los lóbulos pertenecientes al depósito, para así poder relacionarlos entre sí, y finalmente comprender la dinámica general del flujo durante su desarrollo.



*Figura 1 Imagen satelital del volcán Llullaillaco y las delimitaciones de los depósitos de avalancha al suroeste. Se distinguen con los colores rojo y verde los dos depósitos mayores identificados en las imágenes satelitales, que se diferencian en los colores y texturas que presentan.*

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal el determinar la dinámica de la avalancha volcánica depositada en el flanco suroeste del volcán Lullailaco en el pleistoceno, a través de un análisis morfológico, litológico y granulométrico de sus depósitos, y proponer un factor gatillante para este evento.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Dentro de las tareas específicas que se realizarán, y para poder dar cumplimiento del objetivo principal, destacan principalmente:

1. Definir y acotar las facies volcánicas asociadas a los depósitos de la avalancha ubicada al suroeste del volcán Lullailaco.
2. Establecer los parámetros físicos, tales como área, volumen, velocidades, coeficiente de fricción y distancia excesiva, los que ayuden a comprender la dinámica de la avalancha volcánica, y compararlos con los de avalanchas estudiadas anteriormente.
3. Determinar la relación genética y estratigráfica existente entre dicha avalancha y la que se encuentra al este, en terreno argentino.
4. Comparar los depósitos con los de la zona oeste del volcán, y así verificar si indican la ocurrencia de uno o más eventos.

### **1.3 Hipótesis de trabajo**

Los depósitos en la zona aledaña al edificio del volcán Llullaillaco están relacionados, principalmente, a flujos de tobas e ignimbritas, así como a eventos de avalancha de detritos (Gardeweg et al., 1993). Durante su historia, el volcán ha sido sometido al menos a un proceso que ha provocado el colapso del edificio, generando una gran remoción en masa (Richards y Villeneuve, 2004). La estratigrafía, granulometría y morfología de los depósitos de avalanchas volcánicas dependen de la dinámica de dicho proceso (van Wyk de Vries y Delcamp, 2015), por lo tanto, el estudio de estas propiedades en los depósitos ubicados al SW del volcán Llullaillaco, indicaría una dinámica similar a la estudiada para otros casos de este tipo de remoción en masa. Por otra parte, los lóbulos encontrados al suroeste del volcán podrían relacionarse a un suceso único, generado en el mismo volcán Llullaillaco, y diferente a los que dieron origen a los depósitos ubicados tanto al oeste como al este del volcán, lo cual podría verificarse a través de una comparación de las estratigrafías, morfologías y distribución de sus depósitos.

## 1.4 Localización

El volcán Llullaillaco se encuentra en la cordillera entre la región de Antofagasta y la Provincia de Salta, en la frontera entre Chile y Argentina, en las coordenadas  $24^{\circ}43'$  de latitud sur y  $68^{\circ}32'$  de longitud oeste. El acceso a la zona se realiza hacia el este, desde la ciudad de Antofagasta, por la ruta B-55 hasta el cruce con el camino que va al salar de Punta Negra (Figura 2). Aproximadamente a 25 km se debe tomar la bifurcación que conecta con un camino ubicado entre las quebradas Zorras y Zorritas, mediante el cual es posible acceder al Parque Nacional Llullaillaco, y finalmente lleva hasta los flancos W y S del volcán.



Figura 2 Imagen satelital mostrando la ruta de acceso al campamento base desde donde se realizan los trabajos en terreno, partiendo desde la ciudad de Antofagasta, II Región.



## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Marco Geológico

#### 2.1.1 Marco Estratigráfico

En el sector chileno de la zona de estudio, a unos 15 km al NNW de la cima del Volcán Llullaillaco, se observan afloramientos de rocas paleozoicas, mientras que a unos 50 km al SW afloran rocas del Jurásico (Gardeweg et al., 1993). En el sector más aledaño al volcán, se presentan depósitos volcánicos con edades del Cenozoico Tardío, incluyendo al edificio del mismo Volcán Llullaillaco con actividad en el Pleistoceno-Holoceno (Gardeweg et al., 1984).

##### 2.1.1.1 Paleozoico

Las afloramientos de roca más antiguas encontradas en la zona corresponden a granitoides, rocas volcánicas, silíceas y secuencias silicoclásticas marinas, todas del Paleozoico (Gardeweg et al., 1984).

#### ***Formación Zorritas***

Respecto a las secuencias estratificadas, afloran sucesiones del Devónico Medio al Carbonífero Inferior, correspondientes a la Formación Zorritas, la cual ha sido dividida en tres miembros (Niemeyer et al., 1997): Un miembro inferior del Devónico Medio, indicado por los *Tropilodeptus* sp. y *Australocoelia* encontrados, que está compuesto principalmente por cuarzoarenitas, las que presentan estratificación cruzada plana, estratificación cruzada en esqueleto de arenque, además de otras asociadas a ambientes de alta energía como mareas de mar somero; un miembro medio del Carbonífero Inferior, con intercalaciones de pelitas y areniscas muy finas, muy fosilífero y con ondulitas y estratificación cruzada “*hummocky*”, asociado a un ambiente de tormentas en un “nearshore”; y un miembro superior del Carbonífero Inferior con areniscas finas con estratificación cruzada planar y en artesa y pequeños canales de erosión, asociándose a un ambiente fluvial. Toda la columna se habría depositado durante un ciclo completo de transgresión-regresión, durante la primera etapa del Ciclo Gondwánico, asociado al aumento global del nivel de mar (Bahlburg y Breitzkreuz, 1991).

#### ***Formación La Tabla***

A la formación Zorritas la sobreyace, en discordancia angular, una secuencia continental volcánoclastica ácida, con lavas y tobas soldadas riolíticas y riolodácicas

intercaladas con brechas de misma composición (Gardeweg et al., 1993). Estos depósitos corresponden a la Formación La Tabla, del Carbonífero Superior al Pérmico, producto de un aumento de la actividad magmática durante la segunda etapa del Ciclo Gondwánico (Charrier et al., 2007).

### ***Intrusivos***

Asociados al mismo volcanismo que generó los depósitos de La Tabla, aparecen granitoides, también del Carbonífero Superior al Pérmico, correspondientes a granitos, granodioritas, dioritas, monzonitas cuarcíferas, con variedades melanocráticas y leucocráticas, que se encuentran cortados por filones aplíticos, andesíticos y dacíticos (Gardeweg et al., 1993). Incluyen los intrusivos de Sierra de Guanaqueros, Morros de Cachiyuyo, Quebrada de las Zorras y Barrancas Blancas.

#### **2.1.1.2 Mesozoico**

En el área abarcada por la carta geológica del área del Salar de Punta Negra y el volcán Llullaillaco (Gardeweg et al., 1993) existe un hiato entre los afloramientos del Pérmico hasta el Cenozoico, exceptuándose únicamente por un pequeño sector a aproximadamente 50 km al suroeste del edificio volcánico del volcán Llullaillaco, donde se encontraron depósitos asociados a la Formación Profeta.

### ***Formación Profeta***

En sus depósitos se encuentran calizas macizas, areniscas gruesas y microconglomerados, coquinas, arcosas, areniscas y brechas calcáreas, calcilutitas y calizas concrecionales que incluyen fósiles tales como ammonites, bivalvos, grypneas, gastrópodos y belemnites, lo que se asocia a la Formación Profeta (Gardeweg et al., 1993) del Bajociano-Caloviano (Jurásico Medio). Esta formación se habría depositado durante el Ciclo Andino, durante un evento de transgresión en la cuenca de trasarco (Charrier et al., 2007), indicando ambientes profundos.

#### **2.1.1.3 Cenozoico**

Las primeras unidades del Cenozoico encontrados en este sector, corresponden a depósitos continentales, los cuales subyacen a volcanes e ignimbritas, que representan la actividad magmática que ha afectado a los Andes desde el Mioceno Inferior hasta la actualidad (Lahsen, Upper Cenozoic Volcanism and Tectonism in the Andes of Northern Chile, 1982), entre los que se cuenta el volcán Llullaillaco.

## ***Formación Pampa de Mulas***

Está compuesta por gravas, paraconglomerados y areniscas poco consolidados, intercaladas con depósitos de ceniza volcánica e ignimbritas; localmente cementados por carbonatos y niveles de travertino (Gardeweg et al., 1993). Las dataciones y relaciones estratigráficas indican una edad oligocena-miocena para esta formación, siendo depositada en un ambiente continental, aluvial y de piedemonte, con algunas corrientes fluviales de alta energía, producto de procesos de alzamiento y erosión ocurridos durante el Eoceno-Oligoceno (Marinovic et al, 1995).

### ***Ignimbritas del Mioceno***

Las ignimbritas presentes en el área de estudio abarcan grandes superficies y, generalmente, no se identifica su centro de emisión. Son de composición principalmente dacítica y riolítica, con rocas de carácter calcoalcalino, altos contenidos de potasio y sobresaturadas en sílice (Gardeweg et al., 1984). Las ignimbritas ubicadas cercanas al volcán Lulluillaco corresponden a las Ignimbritas de Quebrada de las Zorras y Tocomar (Oligoceno superior a Mioceno inferior), Ignimbrita Río Frío (Mioceno a inferior), Ignimbritas Pajonales (Mioceno Medio) e Ignimbritas de Quebrada Guanaqueros (Mioceno superior) (Gardeweg et al., 1993).

### ***Volcanes del Mioceno Inferior al Plioceno***

La actividad volcánica en la zona de estudio comenzó en el Mioceno Inferior, y se ha mantenido hasta el día de hoy. Su composición es andesítica y dacítica, asociados a lavas-domos y domos, y depósitos piroclásticos (Gardeweg et al., 1984).

### ***Volcán Lulluillaco***

El volcán Lulluillaco corresponde a un estratovolcán compuesto con actividad desde el Pleistoceno hasta el Holoceno, que posee una forma elíptica, elongada en la dirección este-oeste, con diámetros de 23 y 17 km. Con 6.723 msnm, es la segunda cumbre volcánica más alta del mundo, después del volcán Ojos del Salado. El cono volcánico está formado principalmente por lavas, las que afloran en la zona más cercana a la cumbre, mientras que se encuentran cubiertas a menores alturas (Gardeweg et al., 1984). Basándose en diferencias morfológicas y relaciones estratigráficas, Gardeweg *et al.*, 1984 diferenciaron las lavas del Lulluillaco en dos unidades: Lulluillaco I y Lulluillaco II (Figura 3). La unidad **Lulluillaco I** es la más antigua, con dataciones, tanto por método radiométrico, K-Ar en biotita, de  $1.5 \pm 0.4$  Ma (Gardeweg et al., 1984), como por método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $0.401 \pm 0.006$  Ma (Richards y Villeneuve, 2004), en la ladera SE y de  $0,930 \pm 0,03$  Ma,  $0,976 \pm 0,015$  Ma,  $0,851 \pm 0,088$  Ma y  $0,853 \pm 0,031$  Ma, todas en la ladera SW (Villa et al., (en preparación)), asociándose al Pleistoceno. Esta unidad está compuesta por dos conos alineados en dirección norte sur, el cerro Azufrera Esperanto, que consiste en depósitos de azufre y alteración hidrotermal, y el cuerpo del volcán Lulluillaco hasta, aproximadamente, los 6100 msnm, medianamente erosionados. Sus coladas de lava aparecen, principalmente, al oeste del cono, y son rojizas, con frentes de

bloques redondeados o lajosos, con desarrollo de suelo y cubiertos por escasa vegetación. También, se han reconocido algunas lavas domo en la parte alta del volcán. Por su parte, la unidad **Llullaillaco II** corresponde a los depósitos más jóvenes del volcán (incluyendo la cima actual del cono), con una datación K-Ar realizada por Gardeweg et al. en 1984 y otra  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  hecha por Richards y Villeneuve en 2004, que entregó resultados de <1 millón de años y de  $0.048 \pm 0.012$  Ma, respectivamente, indicando una edad pleistocena tardía. Las lavas que componen a esta unidad están muy bien preservadas, destacándose las coladas hacia el norte, este y sureste, alcanzando longitudes de hasta 8 km, mientras que en la cumbre se han reconocido cuatro lavas domos de menor extensión. Éstas poseen características de colada aa, con estructuras acanaladas, abruptas paredes y frentes de más de 15 m, presentando bloques negros y rojizos de lava localmente bandeados (Gardeweg et al., 1984).

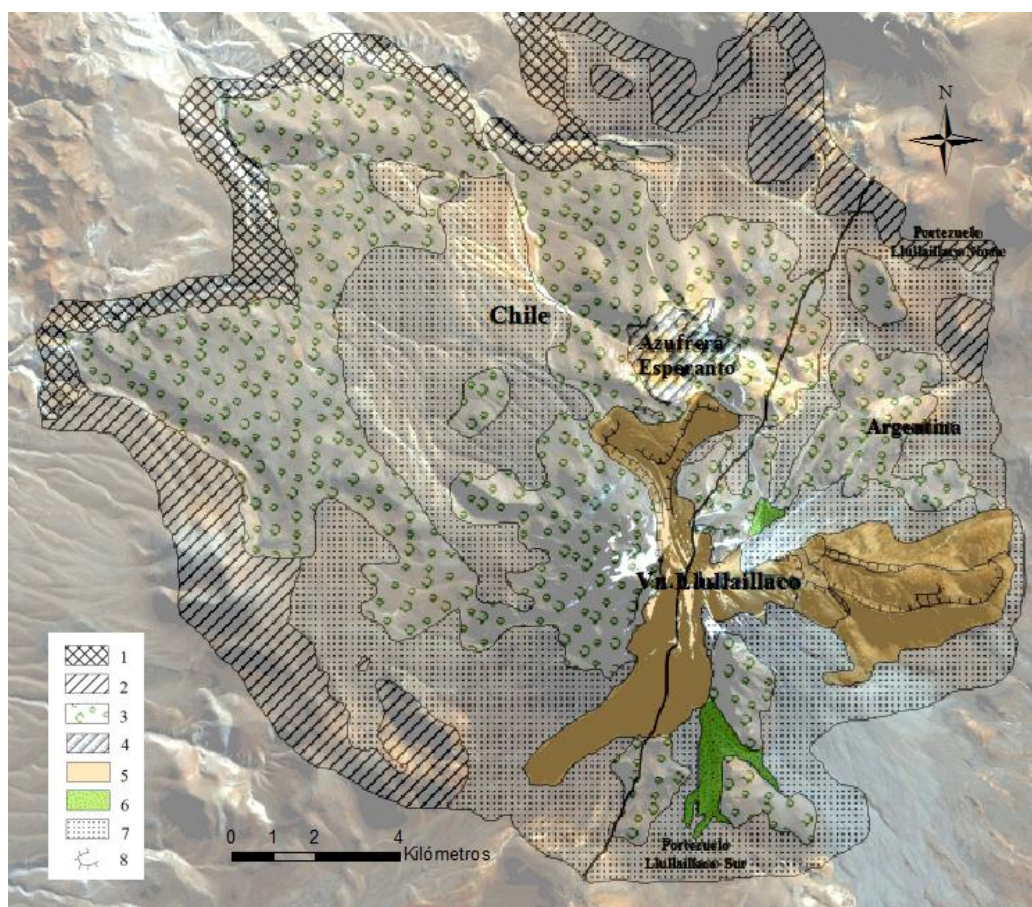


Figura 3 En este mapa se muestra la geología del volcán Llullaillaco. La línea negra continua indica el límite entre Chile y Argentina. 1) Ignimbritas del Oligoceno-Mioceno Inferior, rocas sedimentarias y volcánicas plegadas, e intrusivos del Paleozoico; 2) lavas de volcanes del Mioceno Superior; 3) lavas del Llullaillaco I; 4) depósito de azufre y alteración hidrotermal; 5) lavas del Llullaillaco II; 6) Depósitos de detritos volcánicos del Plioceno-Cuaternario; 7) depósitos aluviales, localmente asociados a depósitos de pómez o flujos detríticos; 8) cráter erosionado. Modificada de Rodríguez 2010

Las lavas del Llullaillaco corresponden a dacitas calcoalcalinas con altos contenidos de potasio, presentando megacrístales y glomerocrístales de plagioclasa, existiendo mínimas diferencias entre las dos unidades. En el Llullaillaco I se encuentran mayores proporciones de fenocrístales de cuarzo y biotita. Las muestras del Llullaillaco II indican una mayor diferenciación magmática que el Llullaillaco II. Por otra parte, ambas unidades

presentan altos contenidos de  $\text{TiO}_2$  y de elementos traza (Rb, Sr y Ba), acercándose más a asociaciones shoshoníticas (Gardeweg et al., 1984).

El edificio del volcán Llullaillaco está cubierto, en sectores, por depósitos detríticos volcánicos del Plioceno-Cuaternario, y por depósitos aluviales y coluviales del Cuaternario, los que incluyen material piroclástico (Figura 3).

### **2.1.2 Marco Geotectónico**

Durante el Eoceno-Oligoceno se encontraba activo un arco magmático en la Precordillera del norte de Chile. En el Oligoceno Tardío hay un incremento de la tasa de convergencia entre las placas Nazca y Sudamericana, junto con una disminución del ángulo de subducción, lo que produjo que este arco se desplazara hacia el este, generando un arco de 250 km de ancho durante el Mioceno Temprano-Medio (Coira et al., 1982; Jordan y Alonso, 1987). Hace unos 25 Ma se produjo el evento Quechua, que fue provocado por tectonismo compresional con una dirección de acortamiento NW, lo cual dio paso a la formación del Altiplano, con unos 500.000 km<sup>2</sup> de superficie y una elevación aproximada de 3.7 km (Lahsen, 1982; Allmendinger et al., 1997). Durante este período de compresión, se alojaron magmas derivados del manto en la base de la corteza, generando magmas intermedios a félsicos por procesos de tipo MASH, magmas que extruyeron desde el Mioceno Medio al Plioceno a lo largo de la Puna (Zappettini et al., 1997). Hace unos 2 Ma, en el Plioceno Tardío, el régimen tectónico cambió desde un acortamiento con dirección WNW-ESE a una extensión NNW-SSE con sistemas de fallas de rumbo, lo que se debería a una disminución de la tasa de convergencia entre ambas placas, durante la llamada fase deformacional Diaguita (Allmendinger, 1986). Con este cambio, se pasa de un volcanismo félsico de grandes volúmenes, a la construcción de estratovolcanes de composición intermedia en el margen este de la Puna, además de generarse pequeñas erupciones de magma máfico y shoshonítico en la zona trasarco, aprovechando zonas de fallas en el Altiplano. En la Zona Volcánica Central de los Andes se encuentran muchos estratovolcanes del Cuaternario (Richards y Villeneuve, 2004; Lahsen, 1982).

Muchos autores han propuesto que los mayores centros volcánicos en esta zona estarían asociados a profundas estructuras corticales. El volcán Llullaillaco se ubica justo sobre el lineamiento Archibarca (Gardeweg y Ramírez, 1987; Lahsen, 1982; Salfity, 1985; Figura 4), con dirección NW-SE, que ha sido trazado desde la costa del Pacífico en la ciudad de Antofagasta, pasando por el pórfiro cuprífero gigante La Escondida, por el volcán Llullaillaco y finaliza en la caldera Cerro Galán en Argentina (Richards et al., 2000)

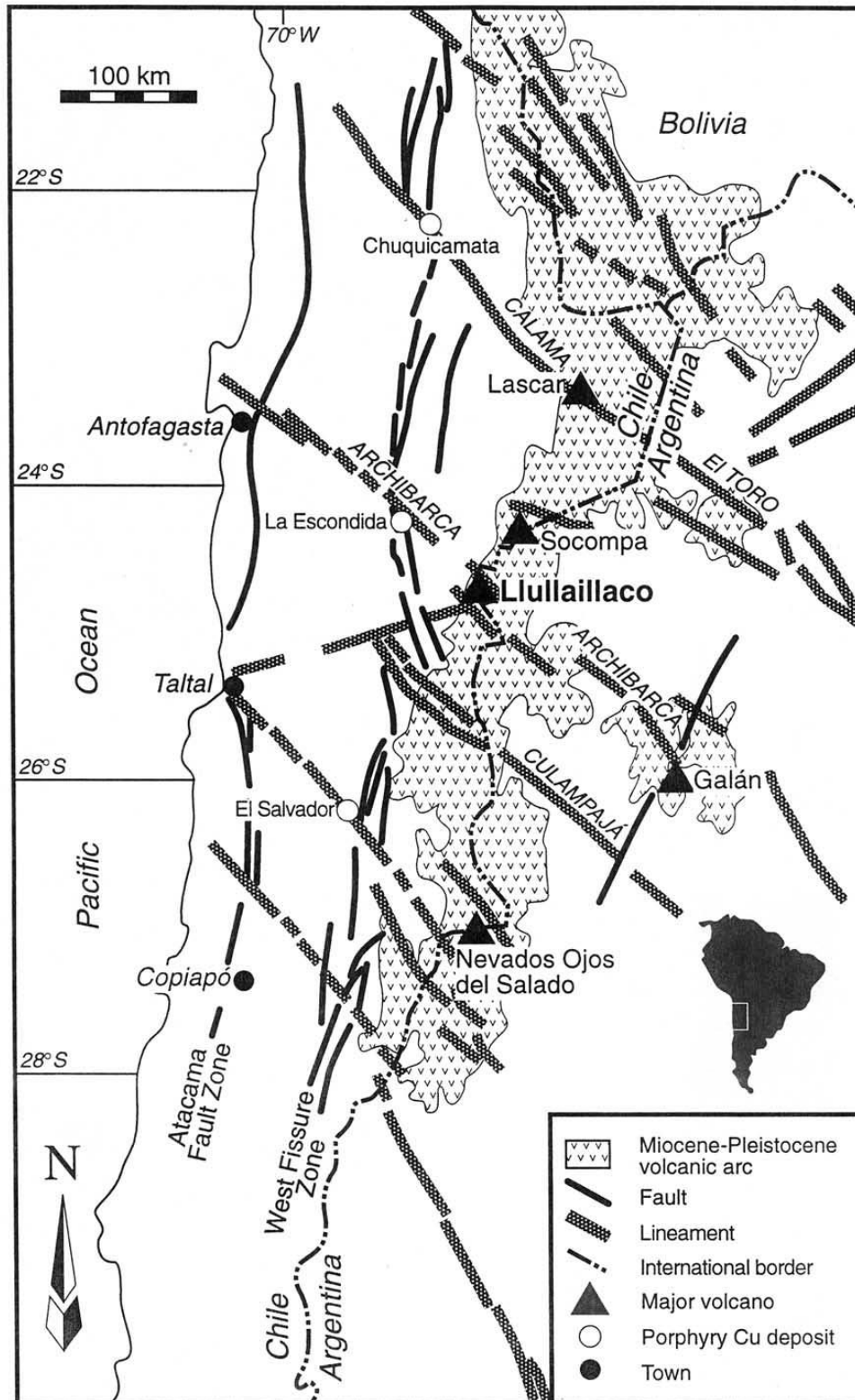


Figura 4 Mapa esquemático de la zona norte de Chile y noroeste de Argentina, mostrando los lineamientos y sistemas de fallas a escala regional. También se señala la localización del magmatismo durante el Mioceno-Pleistoceno, los pórfidos cupríferos y los centros volcánicos mayores. Tomada de Richards y Villaneuve, 2004.

## 2.2 Marco Teórico

### 2.2.1 Avalanchas Volcánicas de Detritos

Una avalancha volcánica de detritos se define como el colapso catastrófico de un sector de un edificio volcánico, asociado a un depósito volcanoclástico (Ui, 1983), diferenciándose de otras remociones en masa en que ésta se produce en volcanes con sistemas hidrotermales y magmáticos activos e inactivos (Siebert, 1984), lo que significa que las rocas se encuentran generalmente muy fracturadas y a menudo son muy ricas en arcillas y contienen grandes cantidades de agua (Figura 5).

Este tipo de remociones en masa ocurre en todo tipo de volcanes, ya sea oceánicos, continentales, monogenéticos o poligenéticos. Además, pueden generarse en cualquier contexto geodinámico, tales como rift oceánicos, hot spots, arcos volcánicos o intraplaca, incluso hay evidencias de avalanchas en otros planetas. Un colapso puede ocurrir en volcanes activos, inactivos o que se han reactivado después de un largo tiempo de reposo (van Wyk de Vries y Delcamp, 2015).



*Figura 5 Fotografía tomada de Glicken, 1996. Aparece el depósito de la avalancha del volcán St. Helens de 1980, con las morfologías típicas que genera este tipo de remociones.*

#### 2.2.1.1 Factores condicionantes y gatillantes de las avalanchas volcánicas

##### *Factores condicionantes*

Hay variados factores que generan zonas de debilidad en los edificios volcánicos, lo cual aumenta la probabilidad de generación de una avalancha volcánica. Estas debilidades pueden formarse en conjunto con el crecimiento del volcán, tales como capas de piroclastos no consolidados o lavas fracturadas durante su enfriamiento. También pueden tratarse de rocas alteradas por la actividad hidrotermal. Las rocas pueden también fracturarse debido a la deformación producida por intrusiones, movimientos tectónicos, o inducida gravitacionalmente (van Wyk de Vries y Davies, 2015).

Otro factor importante es la distribución de agua dentro del edificio volcánico, ya que ésta, al encontrarse en los poros de un medio granular, reduce la resistencia de la roca, haciéndola más propensa a colapsar. En volcanes ubicados en zonas con climas más húmedos o con glaciares, acumulan gran cantidad de agua en sus poros, lo que los hace más susceptibles a una avalancha que en climas más áridos (van Wyk de Vries y Delcamp, 2015).

Por último, otros condicionantes son la erosión que provoca laderas más empinadas e inestables, así como el aumento de material depositado sobre las zonas de debilidad tras una erupción, lo que contribuye a la inestabilidad del edificio (van Wyk de Vries y Davies, 2015).

### ***Factores gatillantes***

Si bien los factores condicionantes provocan inestabilidad en el edificio volcánico, es poco probable que por sí solas provoquen una remoción en masa de gran envergadura, y necesitan, en la mayoría de los casos, un efecto que gatille el colapso.

Existen cinco principales gatillantes de avalanchas volcánicas (van Wyk de Vries y Delcamp, 2015): una **intrusión magmática** puede generar deformación tanto externa como interna, provocando aumentos de pendientes en las laderas y creando zonas de cizalle; un **cambio en el sistema hidrotermal** puede alterar la presión de los poros, lo cual se puede dar por una intrusión magmática o por un bloqueo de los poros por precipitación de minerales; algunos **cambios climáticos**, tales como derretimientos de glaciares o largas precipitaciones, pueden variar la cantidad de agua contenida en la roca, lo que puede provocar avalanchas menores; la **formación de domos volcánicos** durante algunas erupciones aumenta rápidamente la presión sobre el edificio volcánico, lo que puede generar un colapso; por último, los **terremotos y movimientos de fallas regionales** que corten al volcán también pueden provocar deformación o aumento de la presión de poros, causando remociones en masa. Las erupciones en sí mismas no tienen mucho efecto en estos eventos catastróficos, ya que la mayor parte de su energía se va a la atmósfera y no al edificio volcánico.

#### **2.2.1.2 Tipos de avalanchas**

A continuación, se clasifican las avalanchas volcánicas según su magnitud y la profundidad, con respecto al volcán, que alcanza el escarpe (Figura 6; van Wyk de Vries y Davies, 2015):

- **Monogenéticas:** Se generan en volcanes monogenéticos, generando depósitos de menores proporciones que en otros volcanes poligenéticos, y viajando distancias muy inferiores a las generadas en dichos volcanes.
- **Avalanchas superficiales:** Se trata de avalanchas formadas en las zonas más superficiales de los flancos del edificio volcánico, sin incluir su núcleo. A



pesar de dejar depósitos con espesores menores, comparativamente hablando, éstos pueden alcanzar los millones de metros cúbicos de volumen.

- **Avalanchas generadas internamente:** Este tipo de avalanchas afectan al volcán por completo, incluyendo su núcleo. Se originan tras una intrusión magmática o por un núcleo del volcán alterado hidrotermalmente. Ejemplos del primer caso pueden observarse en el Bezimyanny en 1956 y en el Monte St. Helens en 1980; mientras que deslizamientos producidos por actividad hidrotermal se encuentran en el volcán Bandai en 1888 y en el Mombacho en Nicaragua. En estos casos, los depósitos rondan los 3 km<sup>3</sup> de volumen.
- **Avalanchas que incluyen sustrato:** Son las que generan los depósitos con mayores volúmenes. Son deslizamientos que incluyen grandes cantidades de material del sustrato de la base de los volcanes, además del cono volcánico mismo. Un ejemplo es el volcán Paríacota con más de 10 km<sup>3</sup> de material, incluyendo el sustrato (Clavero et al., 2002). Por otra parte, los depósitos de avalanchas de volcanes oceánicos son los más grandes registrados en la tierra, con decenas de km<sup>3</sup>, viéndose favorecidas por las capas de sedimentos pelágicos y estratos volcánicos de baja resistencia en la base de dichos volcanes, tal como se observa en la isla La Reunión.
- **Otros planetas:** La mayoría de los volcanes en el sistema solar corresponde a volcanes escudo, y pueden llegar a provocar avalanchas a escalas mucho mayores que las que se pueden observar en la Tierra, tal como ocurre en el Monte Olimpo en Marte, con un depósito muy bien preservado de cientos de kilómetros de largo y que descendió más de 10 km por los flancos del cono volcánico.

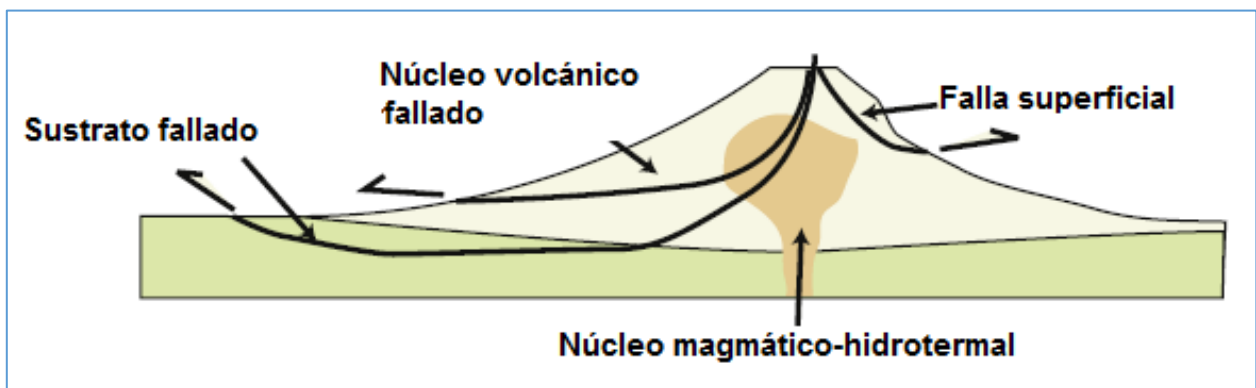


Figura 6 Esquema representativo de las diferentes profundidades a las que puede cortar un plano de deslizamiento, generando los diferentes tipos de avalancha.

### 2.2.1.3 Mecanismos de transporte

Debido a la dificultad para estudiar los depósitos de avalanchas, tanto volcánicas como no-volcánicas, en particular sus zonas basales, aún no hay un consenso con respecto al mecanismo de transporte de dichos procesos. Esto se debe a que las avalanchas viajan

mucho más lejos de lo que lo harían si se rigieran solamente por las leyes de fricción granular. Debido a la gran cantidad de información geológica y geométrica necesaria para describir una avalancha, cualquier intento de modelarlas tiene siempre una alta probabilidad de error asociado (van Wyk de Vries y Davies, 2015). Sin embargo, tras distintos estudios, se han propuesto variadas opciones que podrían resolver el problema. Se han hecho modelos análogos, numéricos y analíticos para intentar hallar el proceso que explique cómo se transportan estas grandes masas, los cuales han propuesto los siguientes mecanismos: un colchón de aire basal (Shreve, 1967), una base acuosa (Shaller, 1991), incorporación de arcillas ricas en agua durante el trayecto (Stoopes y Sheridan, 1992; Vallance y Scott, 1997; Capra y Macías, 2000), fluidización por vibración (Campbell, 1989; Campbell et al., 1995), y lubricación por liberación de energía en fracturas elásticas durante la fragmentación basal intensa (Davies et al, 1999; Davies et al, 2010).

#### **2.2.1.4 Depósitos de avalanchas volcánicas**

##### ***Estructura general de los depósitos***

La estructura del depósito de una avalancha depende de las condiciones iniciales con que se originó el deslizamiento, lo cual ha sido muy estudiado en modelos análogos de este tipo de remociones (Paguican et al., 2014a; Andrade y van Wyk de Vries, 2010). Los depósitos pueden dividirse en una zona proximal, media, distal y marginal, los cuales pueden asociarse a la cabeza, el graben, la parte frontal y lateral de la avalancha, siendo éstos generalmente bien preservados (Figura 7; van Wyk de Vries y Delcamp, 2015). En la región de la cabeza se observan fallas normales asociadas a superficies de deslizamiento cercanas a la cumbre del volcán; el área de graben se presenta como un sector de cerrillos (*hummocks*) alargados y perpendiculares a la dirección del movimiento; la zona frontal es un amplio área con *hummocks* alargados, *ridges* y/o estructuras como fallas; mientras que los límites laterales presentan fallas de rumbo e inversas.

Los depósitos tienen variados elementos que los caracterizan y diferencian de otros tipos de remociones en masa (van Wyk de Vries y Delcamp, 2015). El **escarpe** puede tener forma de herradura o triangular, y cortar sólo el cono volcánico o alcanzar las zonas basales de éste removiendo sustrato. Los **bloques toreva** son bloques rotados que provienen de la cabeza de la avalancha, que pueden mantener estructuras originales del edificio volcánico, tales como direcciones de flujo de lava o intercalaciones de piroclastos. A menudo, estos bloques se mantienen bien conservados en avalanchas de grandes envergaduras, no así en avalanchas que descienden sobre el flanco del cono volcánico o en terreno muy erosionados. Una de las principales características de estos depósitos son los ***hummocks* o cerrillos**, los cuales se forman durante la extensión de la avalancha, se orientan, principalmente, paralelos a la dirección del flujo, y disminuyen en tamaño conforme se alejan del volcán. Se han identificado dos tipos de *hummocks* (Paguican et al., 2014a): los que fueron formados con características de horst y graben, que incluyen a los bloques tipo toreva, alcanzando varios kilómetros de ancho; y los que se formaron por un proceso de vesiculado o por aislamiento de bloques individuales provenientes del edificio volcánico.

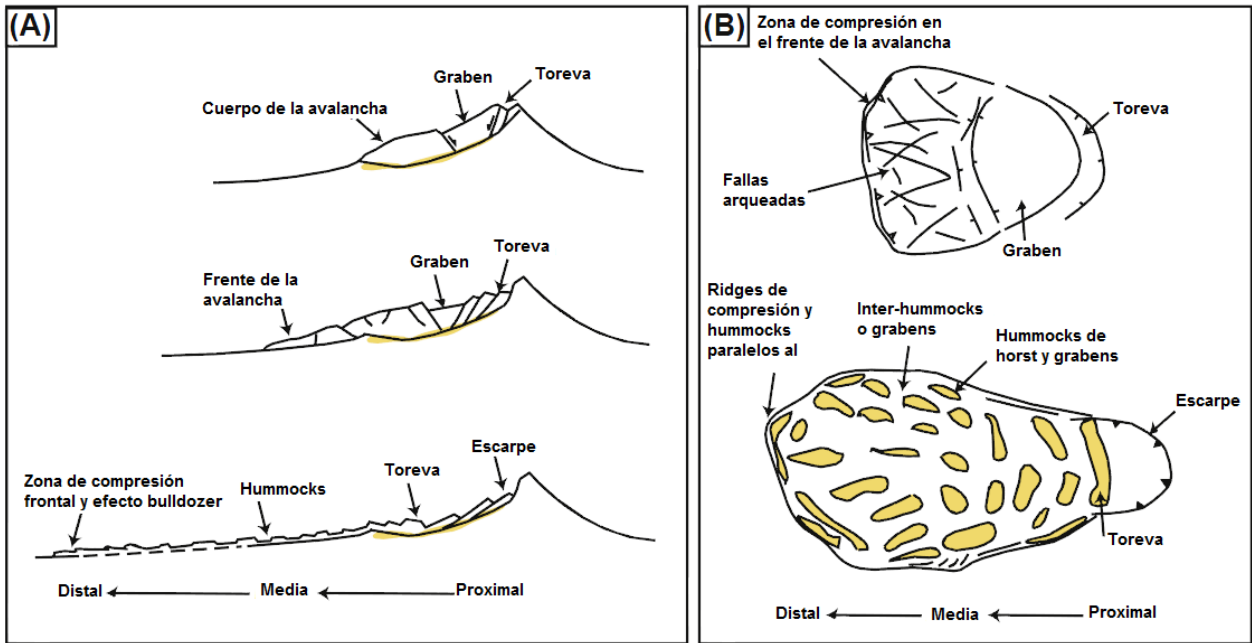


Figura 7 Modelo general de una avalancha volcánica, modificado de (van Wyk de Vries y Davies, 2015). (A) Vista en perfil del origen de una avalancha volcánica, con su evolución en el avance y extensión del depósito. (B) Vista en planta de la evolución de las estructuras presentes en un depósito de avalancha.

La mayor parte de la superficie del depósito corresponde a **áreas interhummock**, ocupando más espacio hacia zonas distales, donde los *hummocks* se encuentran más dispersos. Es en estas áreas en que se acomoda la mayor parte de la extensión de la avalancha, generando grabens entre los horst que componen a los *hummocks*. En zonas laterales pueden formarse **ridges o crestas**, originadas tras la formación de *hummocks* alargados limitados por fallas de rumbo. Estos *ridges* también pueden aparecer relacionados a la selección granular diferenciada durante el transporte a altas velocidades. Estas estructuras pueden tener pocos metros de alto, decenas de ancho y superar el kilómetro de largo. También pueden presentarse **albardones o levées**, los cuales se definen como crestas o *hummocks* alargados en los márgenes laterales del depósito (Glicken, 1996).

La zona frontal y las laterales de un depósito de avalancha pueden ser escarpadas, presentando grandes *ridges*, mostrando estructuras compresivas en la zona frontal. Dichos *ridges* en el frente de la avalancha pueden contener o estar compuestos enteramente de material del sustrato, incluido por efecto bulldozer.

## ***Facies de las avalanchas volcánicas***

En los depósitos de avalanchas volcánicas se han reconocido cuatro facies distintas: facies bloques, facies matriz, facies mixta y facies basal (van Wyk de Vries y Davies, 2015).

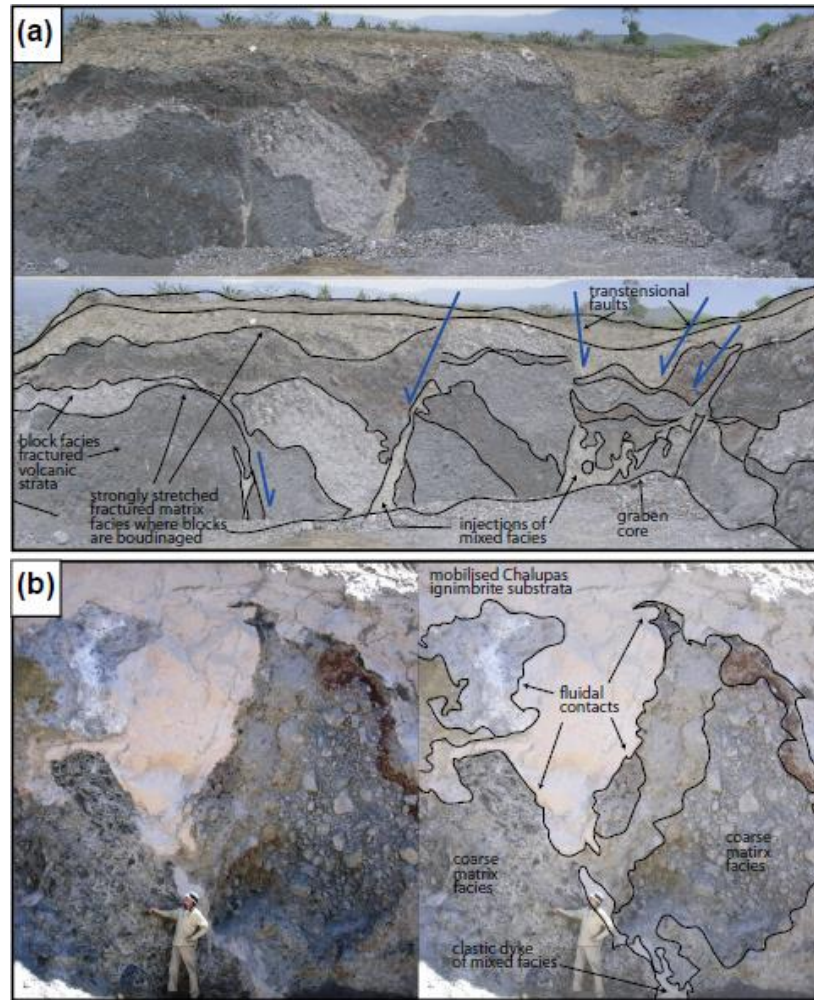


Figura 8 Tomada de van Wyk de Vries y Davies, 2015. En (a) se observan bloques de lavas y piroclastos, preservando su estratificación original. También, en azul se señalan algunas estructuras, por las que se inyectan facies mixtas. En (b) se observan facies matriz de grano grueso, inyecciones de facies mixtas y contactos fluidos con depósitos piroclásticos.

- **Facies bloques:** Se encuentran bloques desde muy bien preservados hasta altamente fracturados, que provienen directamente de la masa original que comenzó la avalancha (Figura 8A). Generalmente presentan textura de rompecabezas, la cual fractura la roca pero mantiene cada parte de los bloques en su lugar inicial.
- **Facies matriz:** Está compuesta principalmente de fragmentos de bloques muy brechizados, con fragmentos de tamaño limo a arena, comúnmente rodeados por bloques de la misma composición (Figura 8B).
- **Facies mixta:** Al igual que la facies matriz, posee fragmentos tamaño limo-arena rodeado de bloques de mayor tamaño, pero altamente polilitológicos.

Esta variación en las composiciones puede deberse a la inclusión de nuevo material durante el transporte o a una mezcla original de material volcánico con sedimentos fluviales. Tanto la facies matriz como la mixta presentan texturas fluidas en los límites con otras facies, así como migración de granos o volúmenes completos dentro de zonas aledañas. Esto indicaría que las facies matriz y mixta poseen un comportamiento de masa granular fluidizada durante el movimiento. Otro argumento para esta fase granular fluida corresponde a la presencia de diques clásticos de facies mixtas que se inyectan dentro de facies matriz o de bloques.

- Facies basal: Es una capa de matriz fina ubicada en la parte inferior del depósito (Figura 9). Es posible encontrar material del sustrato que fue incluido durante el movimiento. También se encuentran texturas de abrasión y cizalle interno, además de diapiros. Esta zona es donde se piensa que existe la mayor concentración del cizalle durante el movimiento, por lo que pueden trasladar grandes bloques sobre ella, creando así los *hummocks* y distintas estructuras.

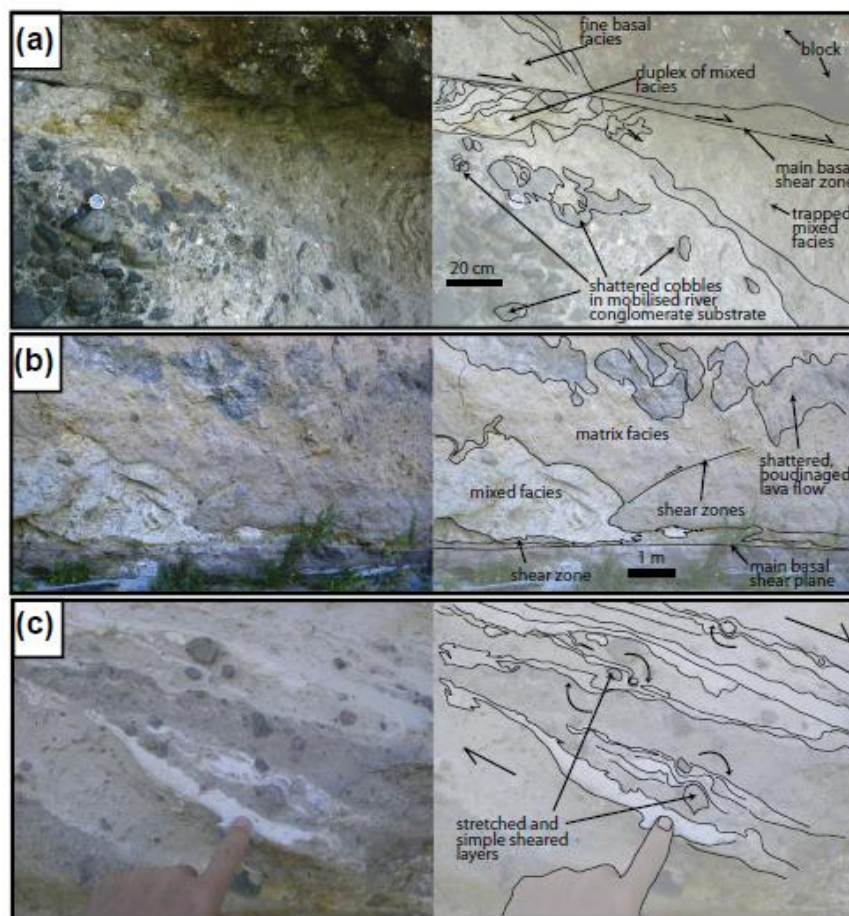
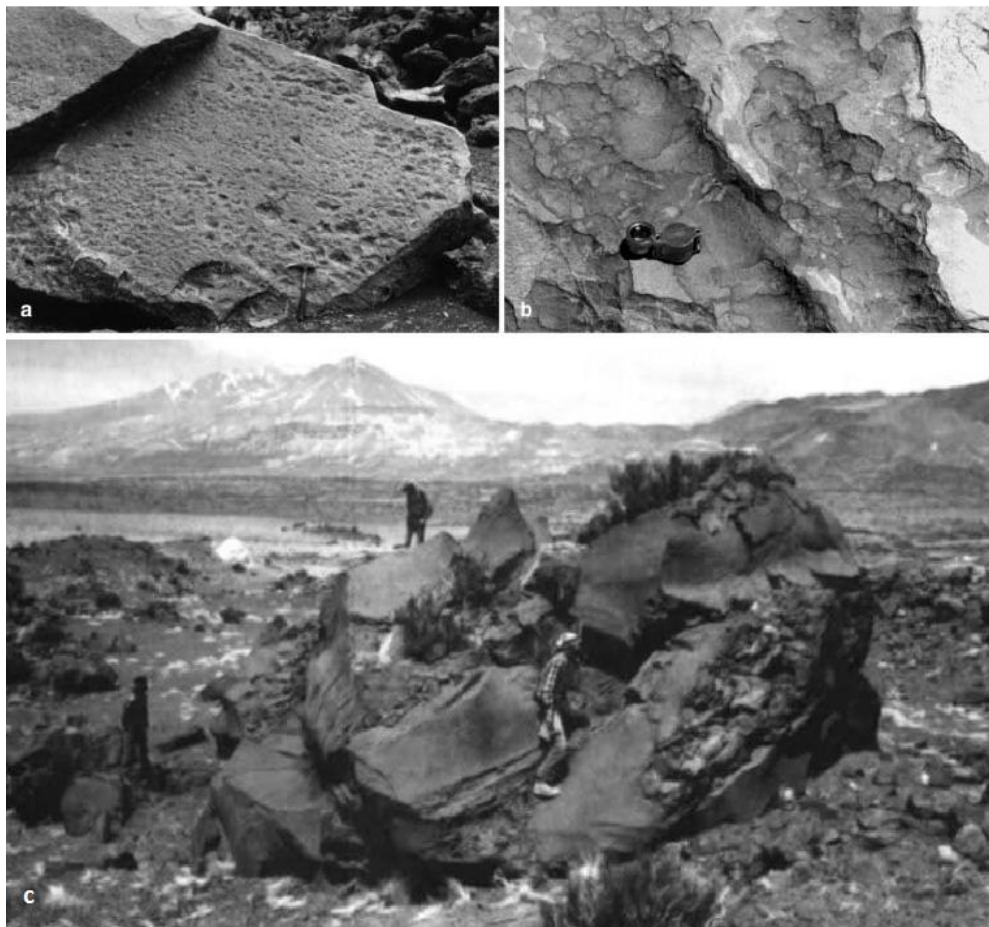


Figura 9  
Tomado de van Wyk de Vries y Davies, 2015. Ejemplos de zonas basales de distintas avalanchas. (A) Guijarros deformados y movilizados bajo un plano de cizalles muy marcado entre la zona basal y un bloque superior de lava. (B) Se observa una zona de cizalle basal, mientras que en la parte superior aparece un depósito de lava muy fracturado y desmembrado. (C) Acercamiento a la zona de cizalle, con rotación de pequeños granos.

## ***Texturas y estructuras del depósito***

Todas las facies que conforman los depósitos de avalancha poseen material altamente brechizado (van Wyk de Vries y Delcamp, 2015). Si bien, la mayoría de los clastos son angulares, dependiendo de su litología pueden llegar a ser más redondeados, como ocurre con los que están compuestos de materiales más dúctiles como la arcilla. Generalmente, poseen una pobre selección de los clastos, pero sí existe una distribución a mayor escala de los tamaños de grano, lo cual se debe a diferencias en la brechización en las diferentes zonas del depósito, o a las características granulométricas originales. Una gran dificultad aparece al intentar diferenciar los depósitos de avalancha de otros tipos de depósitos volcánicos, y es que las texturas volcánicas originales adquiridas durante la formación del cono volcánico pueden conservarse en los bloques de mayor tamaño, e incluso en algunos clastos de la facies matriz. Para diferenciarlos, habría que encontrar zonas de evidente brechización u otra información que pudiese contextualizar. Otra textura que puede encontrarse en los bloques del depósito es la de rompecabezas, en la cual se mantiene la forma de los bloques, pero su masa es destrozada. También, es posible encontrar, en algunos bloques, marcas de impacto que indiquen la vibración de éstos durante el transporte y cómo van chocando unos con otros (Figura 10).



*Figura 10 (a) y (b) muestran distintas marcas de impacto, que se generan al chocar los bloques durante el transporte de la avalancha. Tomada de Clavero et al., 2002. (c) Se presenta un bloque de más de 20 m de diámetro con textura de rompecabezas (jigsaw) en el depósito de avalancha de detritos del volcán Socompa. Tomada de Francis et al., 1985.*

Por otra parte, es posible encontrar fallas y zonas de cizalle, cuyas características dependerán de la reología del material al cual están afectando. Por ejemplo, en facies matriz, las fallas se presentan como una zona de cizalle ancha, sin un plano claro de ruptura, mientras que en límites entre bloques y matriz, se observan espejos de falla y zonas de salbanda. Hay fallas que se relacionan a la presencia de diques clásticos. Además, es posible encontrar pliegues en la zona de facies basal, donde se incluye sustrato al depósito (van Wyk de Vries y Davies, 2015).

### 2.2.1.5 Parámetros físicos

Para comprender la dinámica de la avalancha que produjo los depósitos estudiados, es fundamental establecer los parámetros físicos básicos que la caracterizan, tales como la distancia recorrida, el área y el volumen que abarca, la velocidad mínima y máxima alcanzadas, el coeficiente de fricción durante su trayecto y la “distancia de viaje excesiva”.

La **distancia (L)** de la avalancha de detritos se mide desde el centro de masa del material colapsado, hasta el centro de masa del depósito final (Hayashi y Self, 1992; Figura 11a). Generalmente, como no es factible determinar con exactitud el punto del centro de masa en el edificio volcánico ni en el depósito, se mide la distancia desde un punto superior del escarpe, hasta el punto más alejado del volcán, alcanzado por la avalancha (Figura 11b). El **área (A)** mide la superficie dentro de los límites establecidos del depósito, mientras que el **volumen (V)**, además, toma en consideración las diferentes potencias verticales alcanzadas.

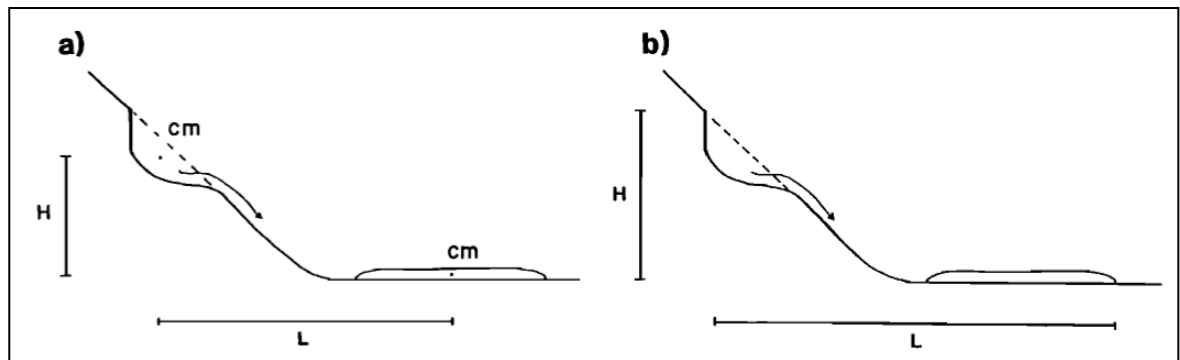


Figura 11 Tomada de Hayashi y Self, 1992. (a) Muestra la correcta medición de H y L, (b) muestra la típica medición para depósitos de avalanchas de detritos.

La **velocidad mínima** de una avalancha se estima por la capacidad de la avalancha de ascender obstáculos en su camino. Si se asume que toda la energía cinética se transforma en potencial y no hay pérdida por fricción, la fórmula para calcular la velocidad mínima ( $v_{mín}$ ), utilizada por variados autores (Naranjo y Francis, 1987; Clavero et al., 2002; Clavero et al., 2004; Richards y Villeneuve, 2004; entre otros), sería:

$$v_{mín} = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

donde g corresponde a la aceleración de gravedad y h a la altura ganada. Por su parte, Francis y Baker en 1977, encontraron un método que sí toma en cuenta la pérdida de fricción, comparando la altura total descendida con la máxima altura ascendida en un

obstáculo. Con lo anterior, se obtuvo un **porcentaje de pérdida de fricción** (F) y una **velocidad máxima** ( $v_{max}$ ):

$$F = 100 \left( 1 - \sqrt{\frac{h}{H}} \right) \quad (2)$$

$$v_{max} = 10 \sqrt{\frac{2gh}{100 - F}} \quad (3)$$

donde H corresponde a la altura total descendida, h a la altura ganada y g a la aceleración de gravedad. H, al igual que L, se mide desde el centro de masa del material colapsado, hasta el centro de masa del depósito, pero posee la misma fuente de error que H: la dificultad de determinar el centro de masa, conlleva a medir desde un punto a mayor altura, generando una sobreestimación de este valor (Hayashi y Self, 1992; Figura 11)

Existen dos indicadores de movimiento que ayudan a comprender mejor la dinámica del deslizamiento: el **coeficiente de fricción** ( $\sigma$ ) (Ui, 1983), que se relaciona a la fuerza de fricción como  $\sigma N$ , donde N es la fuerza normal sobre un bloque en un plano (Hayashi y Self, 1992). Si se considera que al transportarse el material por un plano inclinado, toda la energía potencial inicial se disipa por fricción, se tiene que:

$$mgH = \sigma mg \cos \alpha x_1 + \sigma mg L_2 \quad (4)$$

donde m es la masa, g es gravedad,  $\sigma$  es el coeficiente de fricción, y  $\alpha$ ,  $x_1$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ , y H se muestran en la Figura 12. Sabiendo que:

$$\cos \alpha = \frac{L_1}{x_1} \quad (5)$$

y sustituyendo:

$$H = \sigma L_1 + \sigma L_2 = \sigma L \quad (6)$$

con lo que finalmente, se obtiene que:

$$\sigma = \frac{H}{L} \quad (7)$$

siendo H la altura total descendida, y L la máxima distancia recorrida por el material. Como ya se mencionó, los dos parámetros que componen la ecuación del coeficiente de fricción (H y L), normalmente se sobreestiman, siendo probablemente mayor la sobreestimación de L que de H, el coeficiente de fricción tenderá a subestimarse, por lo que se considera que el valor calculado corresponde a un límite inferior (Hayashi y Self, 1992). El otro indicador es la “**distancia de viaje excesiva**” (Hsü, 1975), que se refiere a la distancia que recorre la parte más distal de una avalancha, más allá de lo que viaja una masa deslizándose con un coeficiente de fricción “normal” de  $\tan 32^\circ$ , que es igual a 0,62. Esta distancia de viaje excesiva se calcula:



$$L_e = L - H/0.62 \quad (8)$$

con las mismas variables que  $\sigma$ .

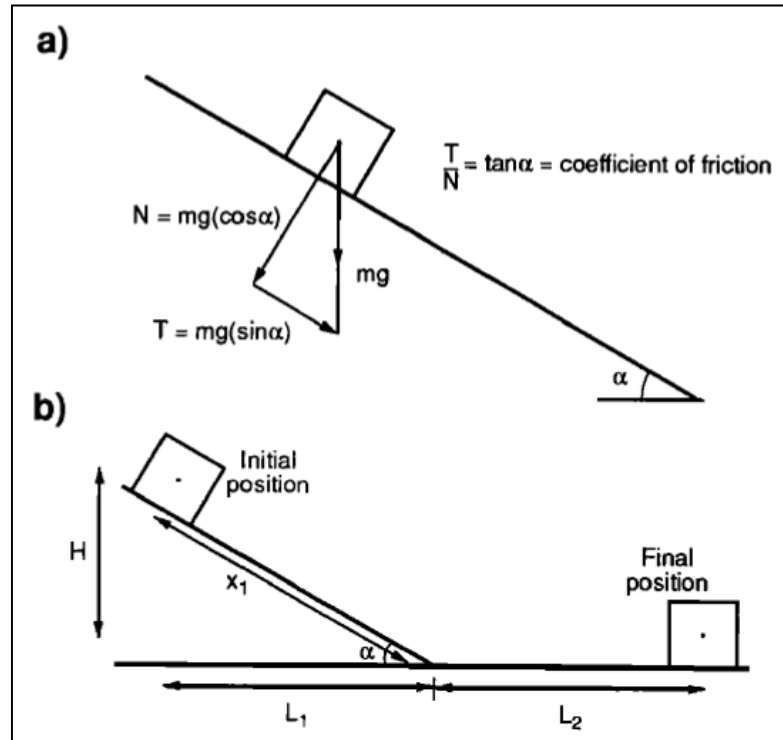


Figura 12 Tomada de Hayashi y Self, 1992. (a) Coeficiente de fricción de un bloque deslizando en un plano inclinado. (b) Geometría de la posición inicial y final de un bloque deslizando por un plano inclinado.

Finalmente, como último parámetro a considerar para realizar comparaciones con otros casos de avalancha de detritos, se puede utilizar el ratio  $A/V^{2/3}$  (Dade y Huppert, 1998), donde  $A$  corresponde al área y  $V$  al volumen del depósito, y sirve como un indicador de la movilidad del flujo.

## 2.2.1.6 Principales avalanchas volcánicas en el Pleistoceno-Holoceno en la Zona Volcánica Central

### *Avalancha de detritos en el volcán Socompa*

El volcán **Socompa**, ubicado en el norte de Chile, en la frontera con Argentina, sufrió un colapso unos 7500 años atrás (Francis et al., 1985; Wadge et al., 1995; Kelfoun y Druitt, 2005). La avalancha producida descendió alrededor de 3000 m, recorriendo una distancia horizontal de unos 35 km, cubriendo una superficie de 490 km<sup>2</sup> y con un volumen aproximado de 25 km<sup>3</sup> (Figura 13). Se conservaron bloques de hasta 400 m del cono original, presentando textura de fracturamiento prismático de dacitas, además de observarse un depósito pumíceo de grano fino. Lo anterior sugiere que el posible gatillante sea la actividad magmática del volcán, y pudo haber sido acompañada por una violenta explosión lateral. Se ha estimado una velocidad máxima de 360 km/h, calculada a través de métodos numéricos, así como un coeficiente de fricción de 0.078.

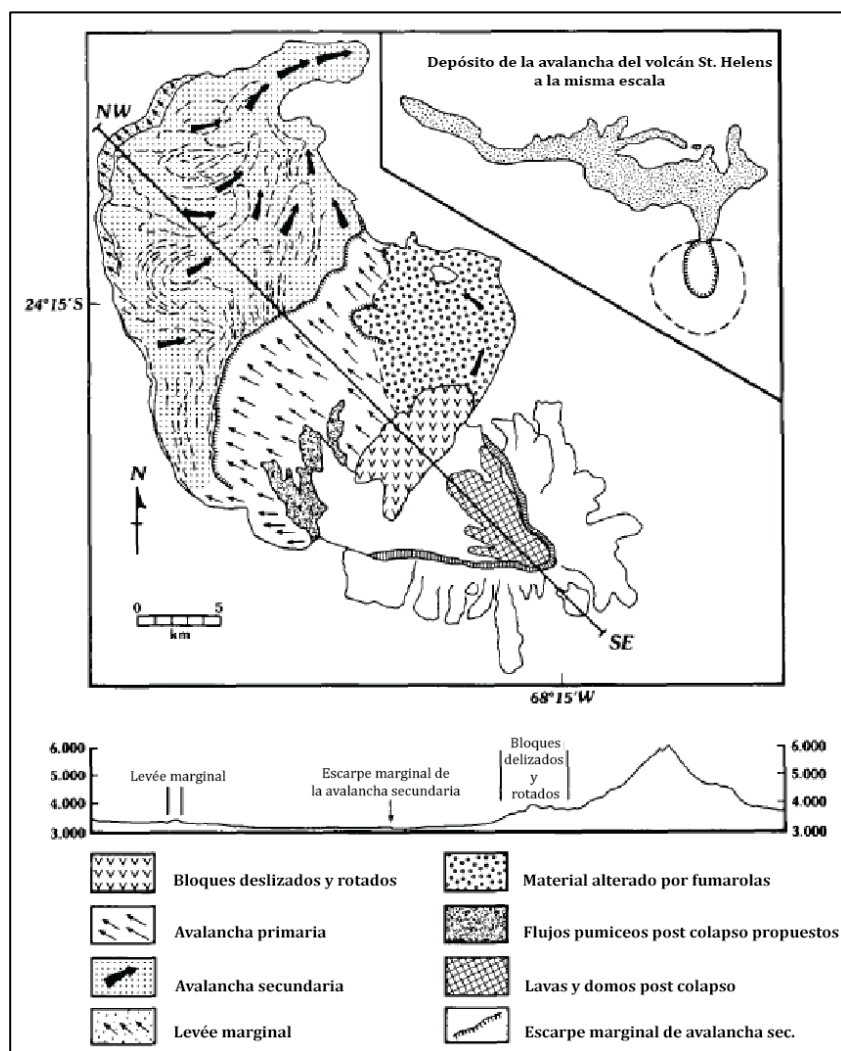


Figura 13 Figura tomada de Francis et al., 1985, y que muestra la dirección inferida del flujo primario y secundario de la avalancha de detritos del volcán Socompa, así como sus levées y escarpes.

## ***Avalancha de detritos en el volcán Parinacota***

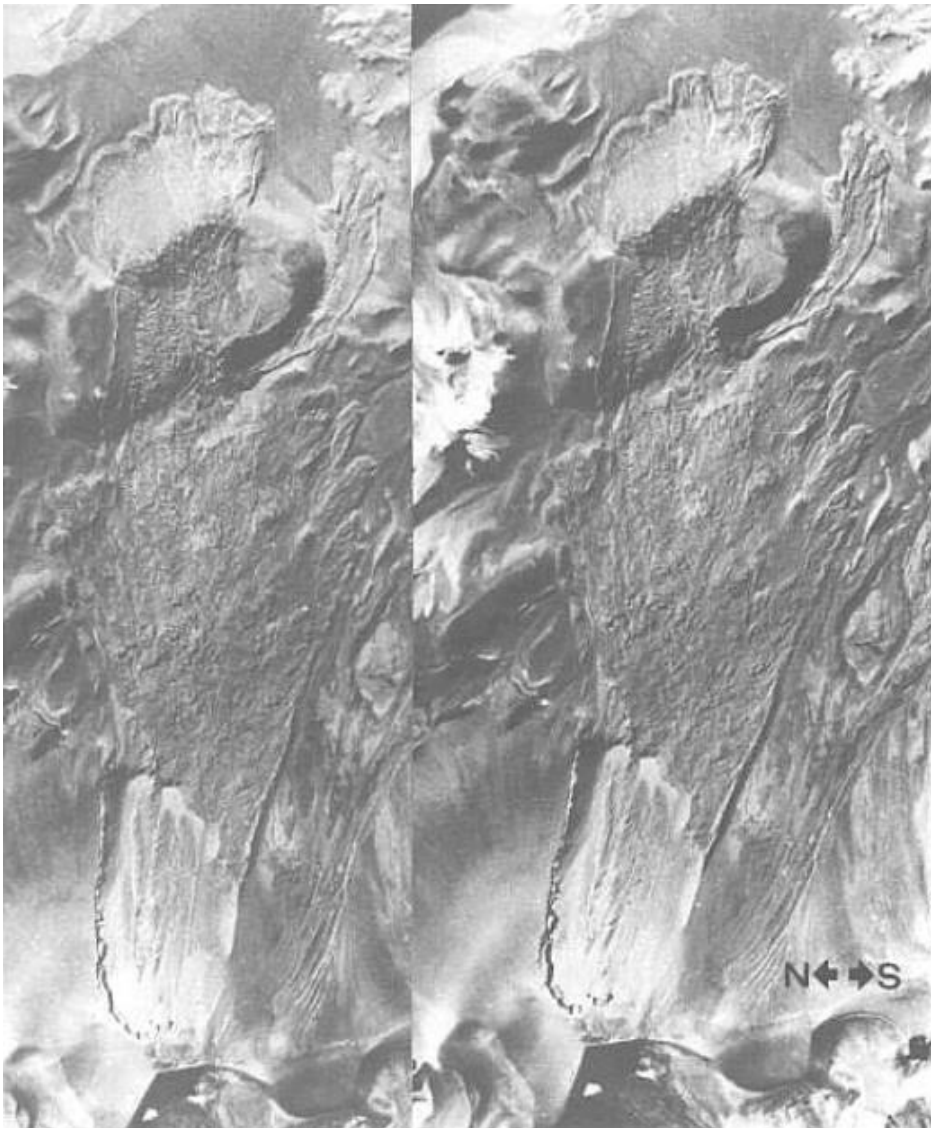
El volcán **Parinacota** forma parte de la región volcánica Nevados de Payachata, en los Andes Centrales, norte de Chile. Hace unos 7-8 ka, el cono volcánico colapsó, provocando una avalancha volcánica (Figura 14) que viajó una distancia de 22 km, cubrió un área de 140 km<sup>2</sup> y, se estima, alcanzó un volumen de 6 km<sup>3</sup> (Clavero et al., 2002). El depósito se dividió en dos unidades: una inferior compuesta de bloques de riodacita y depósitos de flujo piroclástico, además de sedimentos lacustres y fluvio-glaciales ; y una superior con brechas de grano grueso y poca matriz, además de bloques angulares de andesita. Se propuso que este volcán colapsó debido a la sobrecarga sobre el basamento que constaba de sedimentos fluvio-glaciales y lacustres, aprovechando también fracturas preexistentes, así como una menor componente magmática. Para esta avalancha de detritos se estimaron velocidades mínimas de 216 km/h a una distancia de 12 km desde la fuente, y de 90 km/h a 20 km, además de un coeficiente de fricción de 0.08, una distancia excesiva de 20 km y un ratio  $A/V^{2/3}$  de 50.

*Figura 14 Figura tomada de Clavero et al., 2004. a Volcán Parinacota visto desde el sureste, mostrando en R la cicatriz que dejó la avalancha y que luego fue rellenada con los nuevos depósitos. b Avalancha del volcán Parinacota vista desde el suroeste, mostrando las típicas formaciones de cerrillos.*



### ***Avalancha de detritos en el volcán Lastarria***

Ubicado 250 km al SE de Antofagasta, el volcán **Lastarria** presenta una cicatriz en su flanco este, la cual marca el evento catastrófico que generó un depósito de avalancha volcánica (Figura 15). Con un largo de 7 km, un área de 10.76 km<sup>2</sup> (Rodríguez et al., 2015) y un volumen estimado de 0.091 km<sup>3</sup> (Naranjo y Francis, 1987), esta avalancha está compuesta por una matriz de grano fino y bloques de lavas basálticas, tobas cristalinas, escorias, brechas volcánicas y pómez. Con un coeficiente de fricción de 0.175, se asemeja más a un flujo de detritos volcánicos, cuya alta movilidad puede deberse a la alta concentración de material de baja densidad. En este caso, se estimaron una velocidad mínima promedio de 94.28 km/h y una máxima de 270.42 km/h, un coeficiente de fricción de 0.175 (Rodríguez et al., 2015) y una distancia excesiva de 5.1 km.



*Figura 15 Figura tomada de Naranjo y Francis, 1987. Fotografía aérea del flanco este del volcán Lastarria, mostrando la cicatriz y el depósito que dejó la avalancha volcánica.*

### ***Avalancha de detritos en el volcán Ollagüe***

El volcán **Ollagüe**, ubicado en los Andes Centrales entre Chile y Bolivia, se formó en tres etapas entre el Pleistoceno Medio y el Pleistoceno Superior. En el flanco oeste del volcán se identificó un depósito de avalancha (Figura 16), la cual se habría generado por un colapso parcial del volcán hace unos 600-400 ka. El depósito presenta la morfología característica de *hummocks*, entre los cuales, los que poseen mayores dimensiones y mayores pendientes, se componen principalmente de brechas con fragmentos de lava, mientras los más pequeños y de menor pendiente contienen piroclastos y sedimentos salinos. En cuanto a sus dimensiones, cubrió un área de unos 50 km<sup>2</sup> y se estima un volumen de 1 km<sup>3</sup>. En zonas distales, a 12 km y 20 km del volcán, se calcularon velocidades mínimas de 72 km/h y 120 km/h, respectivamente (Clavero et al., 2004).



*Figura 16 Vista hacia el este del depósito de avalancha del volcán Ollagüe, con presencia de hummocks de grandes dimensiones. Al fondo el cono volcánico actual. Figura tomada de Clavero et al., 2004.*

### ***Avalancha de detritos en el flanco este del volcán Llullaillaco***

Finalmente, en el volcán **Llullaillaco**, se ha identificado un depósito de avalancha volcánica muy bien preservado hacia el flanco este (sector argentino). Se caracteriza por poseer dos lóbulos mayores, uno norte y uno sur, separados por el cerro Rosado (Figura 17), que sirvió como obstáculo topográfico al transporte de la avalancha, y contra el cual chocó el flujo y dejó marcas de su ascenso por la ladera del cerro. El colapso que provocó la avalancha, según la datación de <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar realizada e biotitas de un bloque de lava, ocurrió al menos hace 0.15 Ma. (Richards y Villeneuve, 2004).

El depósito fue dividido en 15 facies, caracterizando cada una por la composición de los fragmentos, morfología, estructuras, entre otros parámetros (Rodríguez, 2010). El lóbulo sur presenta *hummocks* alargados, paralelos a la dirección del flujo (noroeste). Los bloques que componen estos cerrillos son subangulosos con diámetros de hasta 6 metros, y corresponden a dacitas con fenocristales de plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol, con una matriz gris-rosácea. En la zona central, aparecen *hummocks* alargados y

amalgamados con dirección preferencial NE, también compuestos de bloques de lava dacíticos. El sector norte contiene menos concentración de cerrillos alargados, con dirección NW, y también con bloques de lava dacíticos. Las zonas más distales incorporan material de la Salina Llullaillaco, además de generar deformación y formación de cerrillos en el salar (Figura 17).

La avalancha descendió alrededor de 2.8 km en la vertical, mientras que los lóbulos sur y norte alcanzaron distancias de 23 y 25 km respectivamente, llegando hasta los depósitos de la Salina de Llullaillaco. El área abarcada por el depósito alcanza los 165 km<sup>2</sup> y un volumen estimado de 1 a 2 km<sup>3</sup> (Richards y Villeneuve, 2004). Los parámetros físicos han sido estudiados en dos trabajos: Richards y Villeneuve en 2004, y Rodríguez en 2010. Los primeros calcularon una velocidad de 324 km/h en el sector en que la avalancha remonta el Cerro Rosado, y una de 162 km/h en zonas aún más distales, mientras que el coeficiente de fricción calculado es de entre 0.11 y 0.12. La distancia excesiva entregada por los datos fue de 20.5 km y 18.5 km para el lóbulo norte y el sur, respectivamente. En el trabajo de Rodríguez, se calculó una velocidad de 244 km/h, y un coeficiente de fricción entre 0.09 y 0.093.

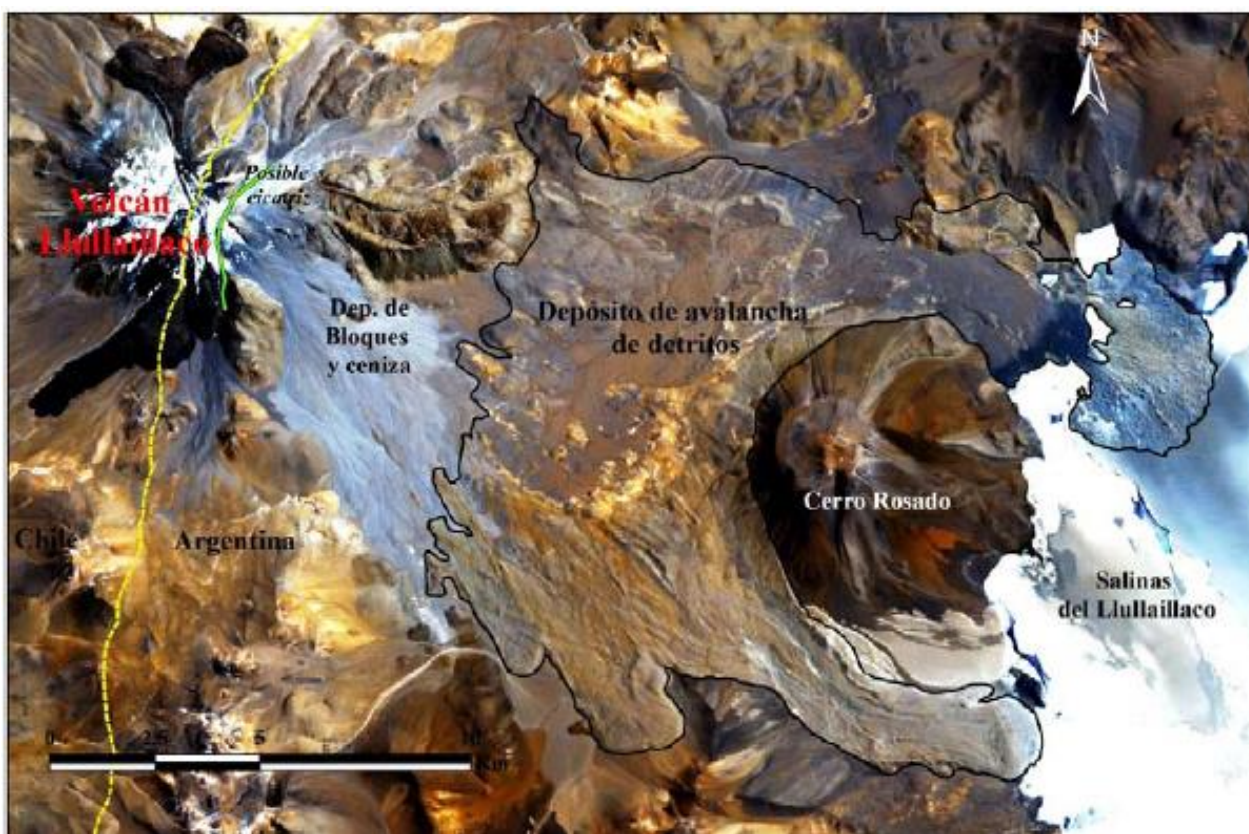


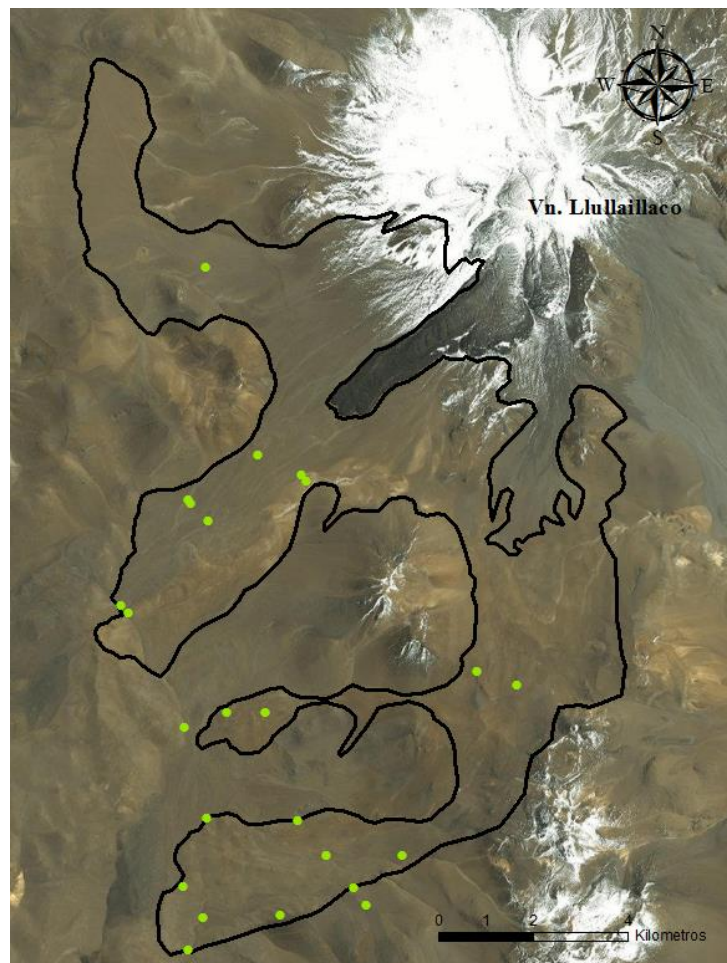
Figura 17 Imagen satelital Aster mostrando el depósito de la avalancha volcánica dirigida hacia el este del volcán Llullaillaco. Se observa cómo ésta se divide en dos lóbulos separados por el cerro Rosado, y cómo alcanza los sedimentos de la Salina del Llullaillaco. Figura tomada de Rodríguez, 2010.

## CAPÍTULO 3 Metodología de trabajo

### 3.1.1 Trabajo en terreno

Durante seis días, entre el 11 y el 16 de mayo de 2017, se realizó una visita a terreno a la zona del volcán Llullaillaco, específicamente, a los depósitos ubicados al suroeste del volcán, con el fin de obtener los datos necesarios para llevar a cabo el estudio propuesto.

En terreno se realizaron observaciones de la geomorfología de la zona, con énfasis en las estructuras que caracterizan los depósitos de avalancha. Se determinaron 24 puntos de control para muestreo. Dichos puntos de control fueron ubicados sobre los distintos cerrillos encontrados o en sectores con una buena visibilidad del depósito (Figura 18). También, se determinó la concentración, distribución, forma y texturas de los bloques de mayor tamaño en cada punto.



*Figura 18 Imagen satelital del Basemap de ArcGISIS. Los puntos de color verde indican los lugares en que se tomaron las muestras, y cómo se asocian espacialmente con el depósito de avalancha.*

Por otra parte, se llevó a cabo un muestreo sistemático, tanto de la matriz, la cual pasaría luego por un análisis granulométrico, como de los clastos mayores presentes. Para ello, se cumplió siempre con el mismo procedimiento: con una pala, se cavaba una calicata

de ~0.5 m de profundidad, buscando una zona que pareciera homogénea en cuanto a su matriz, y se guardaba en bolsas una cantidad de unos 2 a 3 kg, las que se etiquetaban con códigos de tipo DMA-X (día-mes-año-número de muestra). En cuanto a los clastos mayores, se tomaron ejemplares de las distintas litologías encontradas, para describirlas y clasificarlas petrográficamente. En total se tomaron 24 muestras.

### 3.1.2 Trabajo de gabinete

#### 3.1.2.1 Definición de facies volcánicas y alcances del depósito

En primer lugar, se realizó una **revisión bibliográfica**, para reconocer las condiciones, causas y características relacionadas a las avalanchas volcánicas. Esto ayudó en la identificación de las facies volcánicas correspondientes a dicho evento, y poder aislarlas de otros depósitos. Dentro de los estudios revisados, se encuentran unos asociados a volcanes de la ZVC, otros al mismo volcán Lullailaco, lo cual permitirá un reconocimiento general de estos eventos en la zona de estudio, y además, otros estudios enfocados en la teoría general de este tipo de procesos.

A continuación, se hizo un **análisis geomorfológico** de la zona y uno **estructural** del depósito mismo. Para la geomorfología, primero se realizaron observaciones generales en el software Google Earth, en conjunto con las realizadas en terreno. Luego, se estudiaron las pendientes del terreno y cómo éstas varían en los distintos sectores en que se asentó la avalancha. Esto se realizó a través de un análisis de pendientes y de dirección de pendientes de una imagen satelital DEM de ALOS PALSAR, con resolución de 12 metros, a través del software ArcGIS Para las estructuras, se clasificaron las distintas morfologías que componen este tipo de depósitos, así como una descripción de las mismas. Lo último se llevó a cabo gracias al análisis de imágenes satelitales Aster, en conjunto con las observaciones de terreno.

Luego, se realizó una **separación granulométrica** de 24 muestras de matriz de los depósitos, en tamaños desde phi -2 a phi 4, según la escala de Udden-Wentworth (Wentworth, 1922; Figura 19). Esto se hizo en el laboratorio del Sernageomin, mediante el siguiente procedimiento:

- Cada muestra se seca en un horno durante tres a cinco días, a una temperatura de 50°C
- Se prepara la zona de trabajo calibrando la balanza y limpiando la campana en que se trabajará
- Se pesa la muestra completa
- Se vierte la muestra en los tamices, que fueron separados en dos torres: una desde phi -2 a phi 1 (gruesos) y la otra desde phi 2 hasta phi 4 (finos)
- Se pesa cada tamiz con su respectivo porcentaje de muestra, a lo cual se le resta la masa del tamiz, para obtener la de la matriz
- Las muestras tamizadas son guardadas en bolsas



- Se limpian los tamices: los gruesos con escobilla y los finos con ultrasonido

Milímetros	Micrometros	Phi ( $\phi$ )	Clasificación
4096		-12.0	<b>Bloque</b>
256	-----	-8.0	<b>Canto</b>
64	-----	-6.0	<b>Guijarro</b>
4	-----	-2.0	<b>Gránulo</b>
2.00		-1.0	<b>Arena muy gruesa</b>
1.00	-----	0.0	<b>Arena Gruesa</b>
1/2	----- 500 -----	1.0	<b>Arena Media</b>
1/4	----- 250 -----	2.0	<b>Arena Fina</b>
1/8	----- 125 -----	3.0	<b>Arena Muy fina</b>
1/16	----- 63 -----	4.0	<b>Limo grueso</b>
1/32	----- 31 -----	5.0	<b>Limo medio</b>
1/64	----- 15.6 -----	6.0	<b>Limo fino</b>
1/128	----- 7.8 -----	7.0	<b>Limo muy fino</b>
1/256	----- 3.9 -----	8.0	
0.00006	0.06	14.0	<b>Arcilla</b>

Figura 19 Tabla de Clasificación granulométrica, modificada de Wentworth, 1922.

También, se hizo una **descripción litológica** de 25 muestras de bloques (Anexo A) y de las 24 muestras de matriz (Anexo B). Para los bloques, se realizaron observaciones con lupa de mano, trabajo que fue guiado por la clasificación de la IUGS (International Union of Geological Sciences) de rocas volcánicas y rocas piroclásticas, con enfoque en la textura, color, grado de alteración y mineralogía de cada muestra. En el caso de la matriz, se estudiaron tres tamaños de grano (según la escala de Udden-Wentworth (Wentworth, 1922)): gránulos, arena gruesa y arena media. Esto, debido a que los gránulos son el menor tamaño en que se presentaban sólo fragmentos líticos, sin cristales sueltos, y la arena media era el menor tamaño en el que se reconocían correctamente los minerales presentes. Este análisis se llevó a cabo con un estereomicroscopio Olympus SZ61, y se obtuvieron imágenes de las muestras gracias a una cámara Mshot, modelo CO-90.

Finalmente, se determinó la presencia de **4 facies** dentro del depósito final asociado a la avalancha, las cuales fueron determinadas según su geometría, estructuras presentes, litología de matriz y de bloques, y por su granulometría. Los polígonos que definen las facies fueron generados a través del software ArcGIS.

### 3.1.2.2 Establecer parámetros físicos

Para calcular los parámetros físicos de la avalancha y así poder compararlos con los de otros depósitos de este tipo, se realizaron mediciones del largo de cada uno de los lóbulos, así como del área total del depósito a través de Google Earth y ArcGIS, respectivamente. Luego para el volumen, se dividió el depósito en 21 sectores, también en ArcGIS, para los cuales se estimó un espesor promedio y, multiplicado por el área entregada por el mismo software, se obtiene un volumen para cada sector. En particular, el espesor de cada sector se estimó con la proyección en profundidad de las pendientes adyacentes al depósito, y luego se calculó un espesor promedio de dicha zona, para el cual se consideró la mitad de la profundidad máxima del depósito (Figura 20). El resto de los parámetros se tomaron de la teoría y se calcularon con los datos ya mencionados (Tabla 1).

Parámetro	Método de cálculo
Longitud	Generación de rutas en Google Earth
Área	Generación de polígonos en ArcGis
Volumen	Ecuación: Área x espesor. El espesor se obtuvo en Google Earth, más estimaciones de terreno. El área se calculó para cada polígono generado en ArcGIS.
Velocidad mínima	Ecuación (1)
Velocidad máxima	Ecuación (2)
Coefficiente de fricción	Ecuación (3)
Distancia excesiva de viaje	Ecuación (4)
Comparación entre área y volumen	Ecuación (5)

Tabla 1 Tabla de asociación entre los parámetros físicos calculados, y el método en que esto se hizo

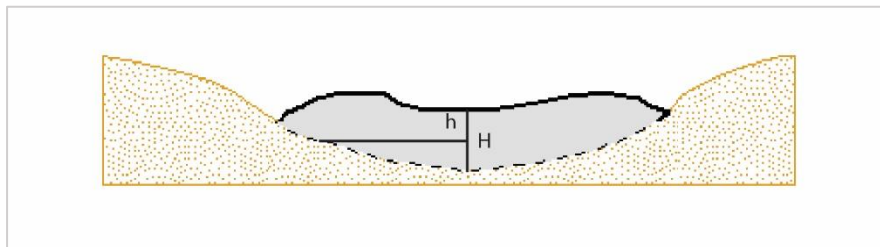


Figura 20 Esquema del perfil del depósito de la avalancha en profundidad., utilizado para estimar los espesores de cada sector.  $H$  corresponde a la profundidad máxima del depósito, y  $h$  es el espesor promedio del área estudiada. La línea negra continua señala la superficie del depósito, mientras que la segmentada indica la proyección en profundidad de la pendientes adyacentes al depósito.

### 3.1.2.3 Comparación con depósitos volcánicos y no volcánicos

Con los resultados obtenidos hasta este punto, se compararon las características del depósito estudiado, con otros casos de avalancha, así como también se estableció si los parámetros que lo caracterizan se encuentran dentro de rangos normales para remociones de este tipo, tanto volcánicas como no volcánicas, y así poder clasificarla bajo los parámetros establecidos en la teoría.

#### **3.1.2.4 Origen del colapso**

Finalmente, se propuso un rango de edad posible para el colapso del edificio. También, al analizar la distribución y orientación del depósito y sus estructuras, se estimaron las condiciones en que se encontraba el material del volcán al momento del colapso. Por último, se propusieron distintos procesos geológicos que pudiesen explicar el factor gatillante de esta gran remoción en masa.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterización morfológica, estructural y petrográfica del depósito

Integrando los resultados obtenidos en los estudios llevados a cabo hasta este punto, se propone una delimitación de los depósitos correspondientes a la avalancha volcánica SW del volcán Lulluillaco (Figura 21). Este depósito final consta de una llanura a mayor altura (sobre los 4900 msnm) en el sector oriental, que, entre el volcán mismo y depósitos del cerro Silla, pasa a formar tres lóbulos principales, orientados entre E-W y SW. Abarca un área total de 31.5 km<sup>2</sup>, y alcanza un volumen de 0.5 km<sup>3</sup>.

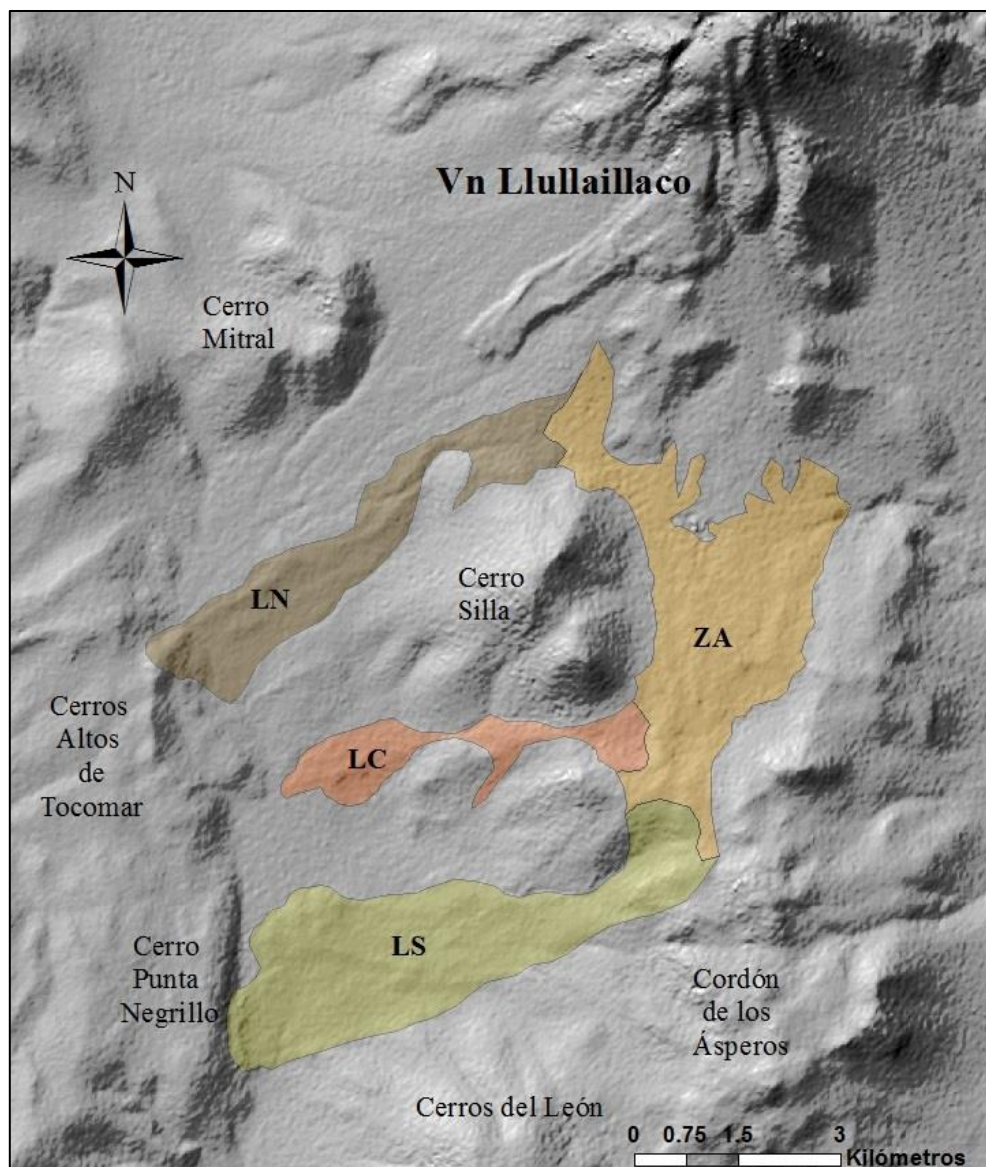


Figura 21 División en facies de la zona de estudio. ZA: Facies Zona en Altura; LN: Facies Lóbulo Norte; LC: Facies Lóbulo Central; LS: Facies Lóbulo Sur.

El depósito se presenta de color rojizo-amarillento hasta tonos de gris, y se ubica en el sector SW del volcán Llullaillaco. Se emplaza entre los 4100 y los 5300 msnm. A partir de sus características morfológicas, estructuras presentes, litología de bloques y de matriz, así como su geometría y distribución en el mapa, el depósito fue dividido en cuatro facies principales: Facies Lóbulo Norte (LN), Facies Lóbulo Central (LC), Facies Lóbulo Sur (LS) y Facies Zona en Altura (ZA) (Figura 21). Una caracterización detallada de la geomorfología, estructuras y litología correspondiente a cada facies se presenta en los capítulos 4.1.1 y 4.1.2. Además de los tres lóbulos y la zona a mayor altura, se identifica un sector al norte del depósito y al oeste del edificio volcánico, el cual se observa de un color gris, diferente del rojizo-amarillento del resto del depósito, por lo que se analizará si corresponden al mismo o a distintos eventos (Tabla 2).

Se trata de un depósito no consolidado, con presencia estructuras de tipo *hummocks*, con longitudes entre 45 m y 230 m, y *ridges*, alcanzando longitudes de hasta 1200 m, ambos orientados tanto longitudinales como oblicuos a la elongación del depósito, variando en su distribución y concentración dentro de la zona de estudio. Tanto los bordes laterales como los frontales de cada lóbulo son abruptos y con altas pendientes. Además, se encuentra muy mal seleccionado, con bloques subangulosos de hasta 6 m de diámetro, principalmente compuestos por rocas dacíticas de textura porfírica y, en menor medida, de fragmentos volcánicos silicificados, distribuidos por todo el depósito, y tobas cristalinas en sectores más distales al volcán Llullaillaco. La matriz contiene los mismos componentes que los clastos de mayor tamaño, y consta de granos desde subredondeados, hasta muy angulosos.

Por otra parte, se observó una zona del volcán que presenta un claro contacto erosivo entre depósitos volcánicos más antiguos, del Llullaillaco I, con lavas modernas del Llullaillaco II (Figura 22). Este corte en el edificio volcánico tiene una inclinación aproximada de  $40^{\circ}$ , y miente hacia el SE.

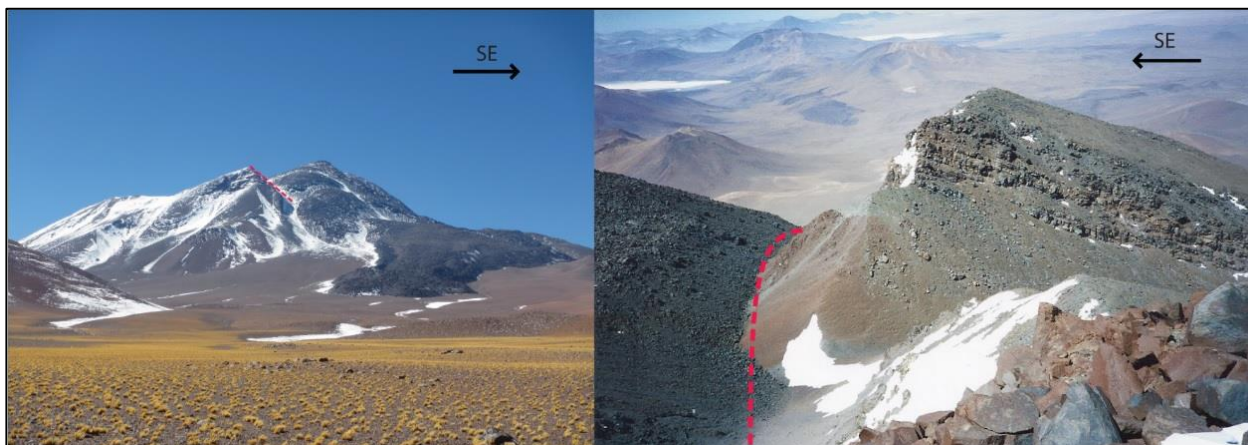


Figura 22 A la izquierda, se señala con la línea roja segmentada el corte de los depósitos antiguos del volcán Llullaillaco, y cómo son cubiertos por lavas modernas hacia el SE. A la derecha, se observa un acercamiento del contacto, el cual se indica con la línea roja segmentada.

#### 4.1.1 Caracterización geomorfológica de la zona de estudio

En este trabajo se llevaron a cabo análisis geomorfológicos, con el fin de ayudar a comprender los diferentes comportamientos por los que atraviesa la avalancha durante su transporte. Estos análisis corresponden a un mapeo de las variaciones de pendientes en el sector, y otro indicando la dirección en que apuntan dichas pendientes. Ambos mapas se basan en una imagen satelital con resolución de 12,5 m.

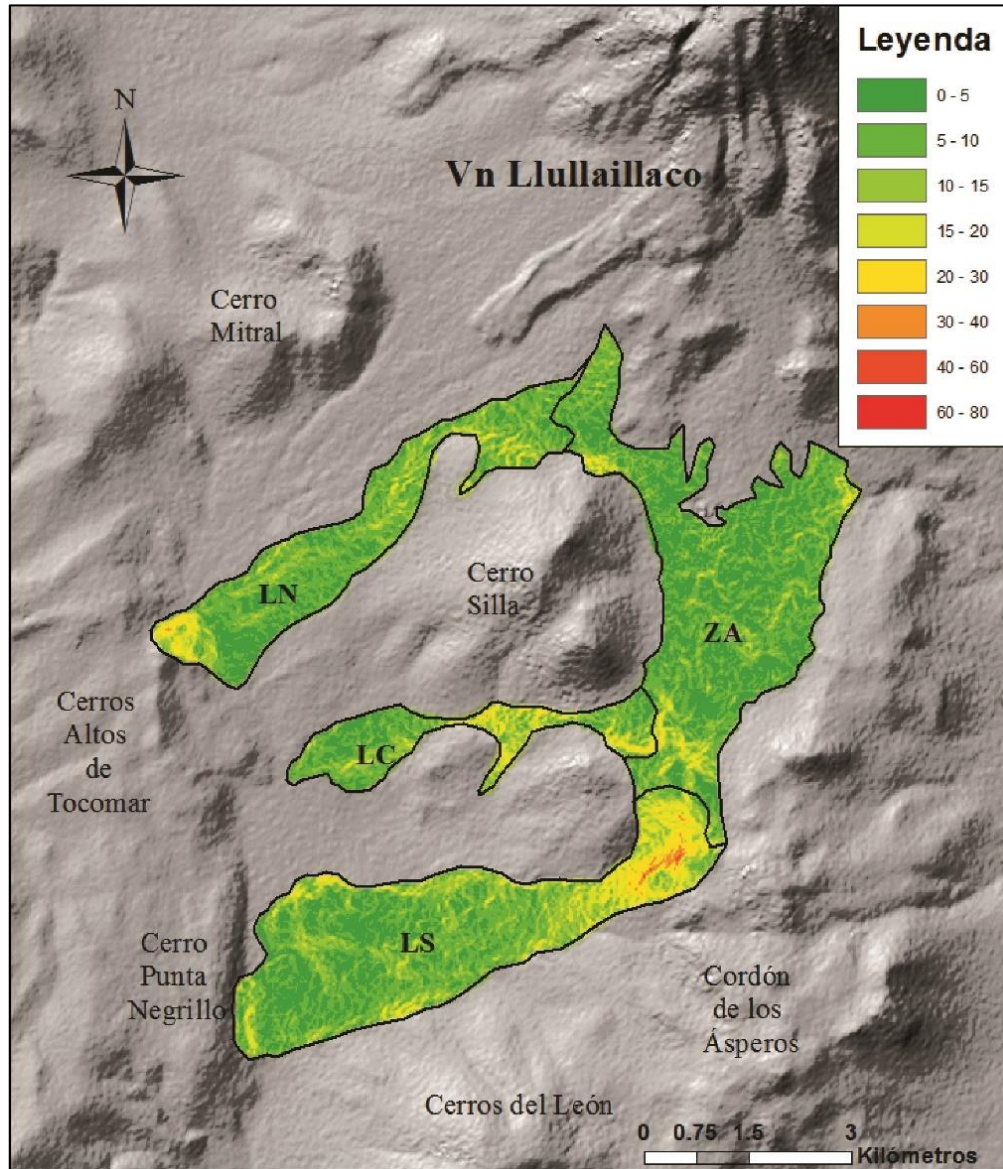


Figura 23 Mapeo de pendientes del depósito de la avalancha al suroeste del volcán Llullaillaco, donde se muestran las diferencias de pendiente, variando de verde oscuro hasta naranja-rojo conforme aumenta la pendiente. Depósito dividido en las cuatro facies definidas para la avalancha volcánica.

En el mapa de pendientes (Figura 23) se observa que los sectores del depósito más alejados al volcán, así como la facies ZA, son lugares con menor pendiente, generalmente inferiores a 15°, es decir, es en estos sectores en que, durante el transporte, la velocidad disminuiría y se depositaría más material, a diferencia de los lugares con una pendiente

más pronunciada. También se puede notar cómo, generalmente, los bordes o límites laterales y frontales de los lóbulos principales, poseen mayores pendientes que sus sectores más centrales, alcanzando valores de hasta 30°. Finalmente, se notan altas pendientes, de hasta 40°, en los sectores de transición entre la facies ZA y los tres lóbulos.

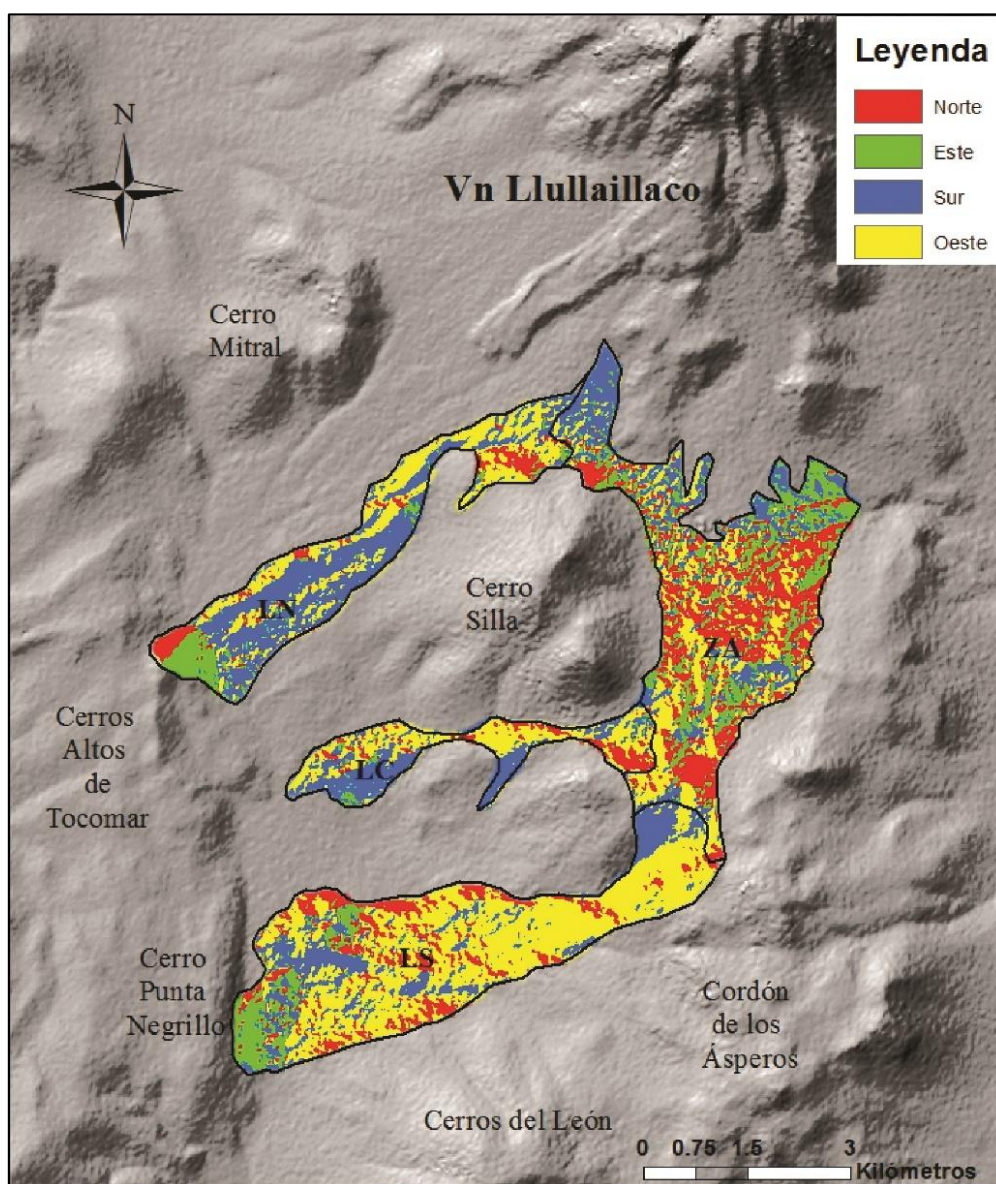


Figura 24 Mapeo de dirección de pendientes del depósito de la avalancha al suroeste del volcán Llullaillaco, donde: en rojo se indica hacia el norte, amarillo al este, verde al oeste y azul al sur. Depósito dividido en las cuatro facies definidas para la avalancha volcánica.

En cuanto a la dirección de las pendientes (Figura 24), se nota una predominancia de la dirección oeste en los lóbulos, aunque, si se analiza zona por zona, en ZA se observa una gran variación en la dirección de sus pendientes, lo que se asocia a irregularidades en el terreno; en LN se observan lineaciones que apuntan al oeste y al sur, lo que indica la presencia de crestas alargadas con la misma dirección que la elongación del lóbulo, mientras que su zona más distal apunta hacia el norte y al este, lo que marca un cambio brusco en sentido contrario del resto de este sector; en LC también se observa un

lineamiento apuntando hacia el oeste y hacia el sur, lo que también indica la presencia de una cresta alargada; y por último, en LS predomina la dirección oeste, sin embargo, en sectores distales, también hay gran variedad de colores, con posibles irregularidades en su morfología.



## 4.1.2 Descripción petrográfica de y estructural de las facies

### 4.1.2.1 Facies Zona en Altura (ZA)

#### *Geometría general del depósito*

Corresponden a depósitos ubicados justo al sur del volcán Llullaillaco, limitados por el Cerro Dos Naciones hacia el este y sureste, y por el Cerro Silla hacia el oeste, y se disponen en una llanura de 17 km<sup>2</sup>, entre los 4850 y los 5000 msnm (Figura 25), la que pierde altura moderadamente hacia el sur. Se emplazan sobre depósitos de lavas andesíticas a dacíticas del Mioceno Medio-Tardío (Richards y Villeneuve, 2004) y los sobreyacen a lavas y detritos volcánicos del Plioceno-Cuaternario por el sector norte (Richards y Villeneuve, 2004). En terreno, generalmente, se observan de color pardo-amarillento, mientras que cerca del cambio de pendiente existente en el límite entre ZA y LC, se presenta de un tono más rojizo.

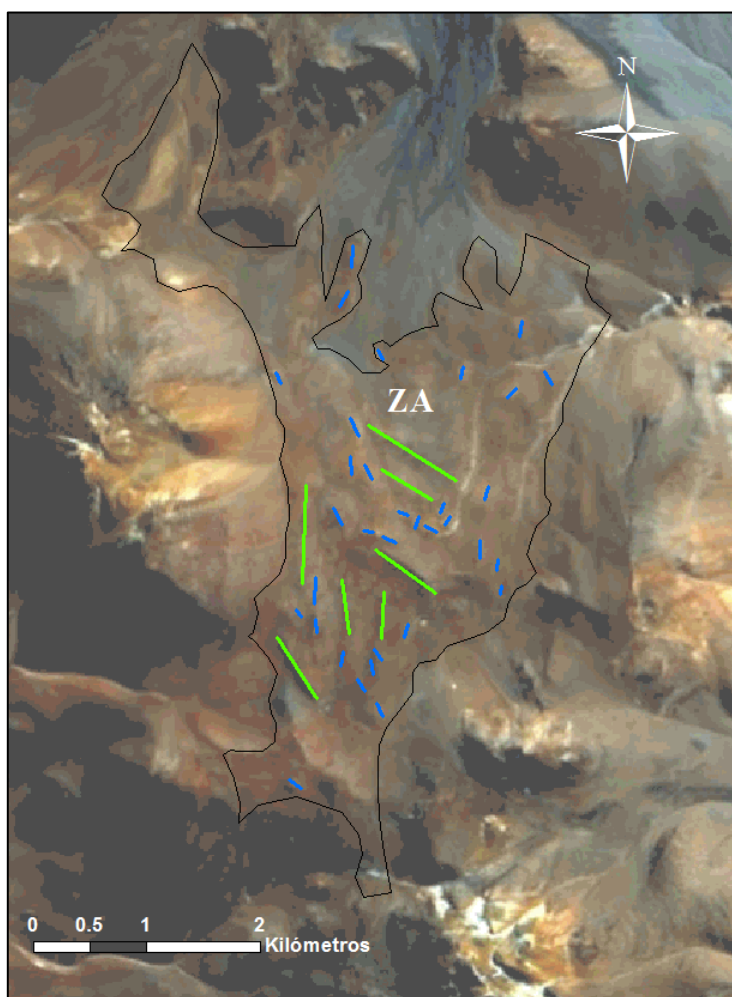


Figura 25 Estructuras de la ZA. En negro se encierra la zona de estudio, en azul se indican los hummocks y en verde los ridges. Imagen satelital Aster.

## ***Estructuras***

- ***Hummocks***

En total, se identificaron 33 *Hummocks* (Figura 27). Si bien la mayoría presenta una elongación con dirección N-S o similar (Figura 26), nueve de ellos se emplazan con dirección aproximadamente NW. Sus dimensiones son variables, presentando longitudes desde 80 m hasta 230 m, con una altura promedio de entre 5 y 10 m, bajas pendientes y formas basales redondeadas y ovaladas. Estas estructuras se concentran en el sector central del depósito, formando lineamientos orientados hacia el NW.

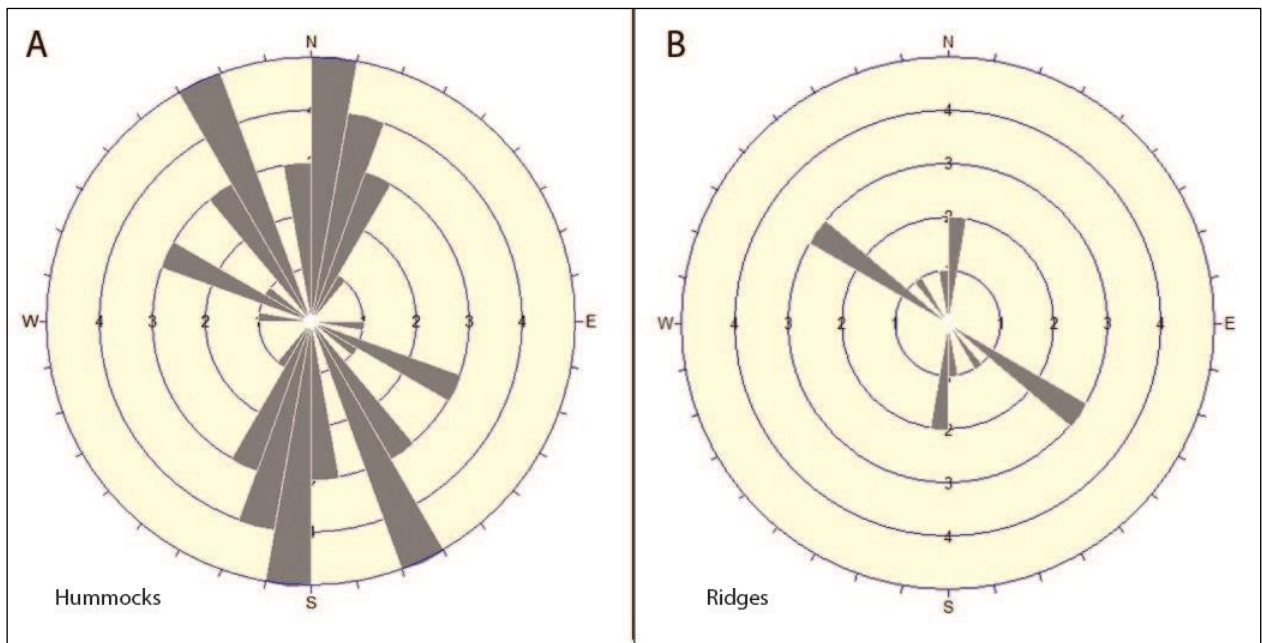


Figura 26 Diagrama de roseta indicando el rumbo de las estructuras presentes en ZA. A) *Hummocks*. B) *Ridges*.

- ***Ridges***

Fueron identificados siete *ridges*: cuatro de ellos se presentan elongados con una dirección aproximada NW, mientras que los otros tres se disponen aproximadamente N-S (Figura 26). Sus potencias alcanzan valores de 40 m, mientras que en su dirección más alargada llega a medir desde 400 m hasta 900 m de longitud, y poseen morfologías basales ovaladas.

- ***Levéés***

En el límite lateral oeste del depósito se observa un *levées* formado por *ridges* y *hummocks* alargados en dirección N-S, alineados, lo que genera un borde continuo que alcanza un largo de hasta 2 km.

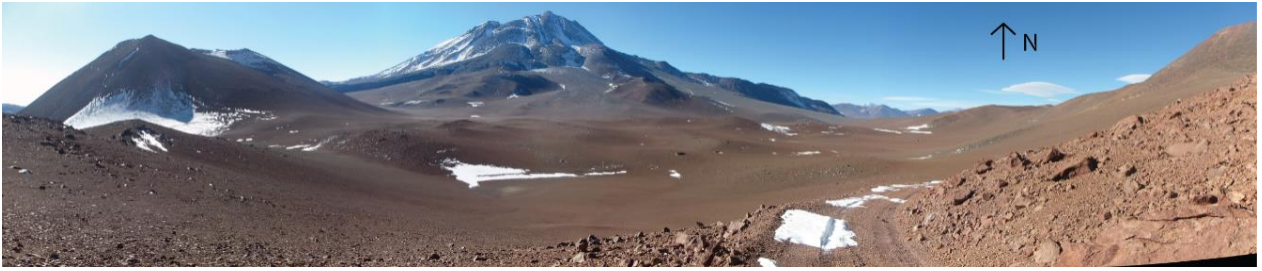


Figura 27 Depósito al sur del volcán Llullaillaco (ZA). En color pardo se observa el campo de hummocks, y hacia la izquierda (oeste) se ve el portezuelo que limita con los depósitos a menor altura

## Litología

- **Bloques**

En terreno, se observaron bloques de hasta 2,5 metros, siendo más comunes una familia de entre 50 y 100 centímetros de diámetro (Figura 28). Son polimícticos, subangulosos (unos con formas prismáticas) y se concentran preferentemente en los sectores de mayor altura de los *hummocks*. Se observaron dos tipos de litologías predominantes: dacitas porfíricas de anfíbol y dacitas porfíricas de biotita, las cuales se presentan como clastos subangulosos de roca volcánica, porfírica, con presencia de cristales de plagioclasa de hasta 6 mm, cuarzo de hasta 4 mm y anfíbol y biotita menores a 2 mm, con matriz de color gris claro compuesta de cristales y vidrio; así como con estas mismas características, pero con una matriz de color rojizo, muy alterada por óxidos de hierro. También se observaron, en menor proporción, clastos con características similares a las de las dos familias predominantes, pero con variaciones en el color de su matriz, con colores rosados y negros, además de unos con matriz silicificada, con presencia de oquedades y arcillas.

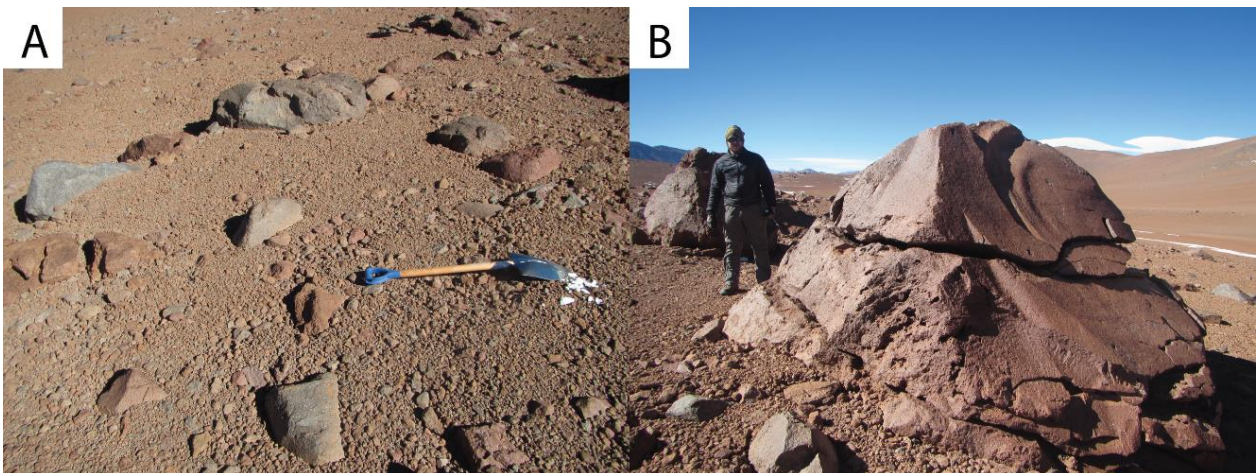


Figura 28 Distribución y texturas de los bloques en ZA. A) Distribución y variabilidad litológica de los bloques más comunes encontrados en la zona. B) Bloque aislado de mayor tamaño (aprox. 2.5 m)

- **Matriz**

En el tamaño gránulos, se identificaron, predominantemente, fragmentos líticos volcánicos, subredondeados y subangulosos, de color rojizo y pardo, con cristales de plagioclasa, cuarzo, anfíbol y biotita. También, se encontraron fragmentos líticos volcánicos de color grisáceo, angulosos a subangulosos, con la misma mineralogía que los anteriores. Por último, hay una baja proporción de fragmentos silicificados de color blanquecino, subredondeados, con pequeños cristales negros.

El tamaño arena gruesa posee los mismos componentes que el tamaño gránulos, pero con un aumento de la proporción de fragmentos silicificados. También, se observaron cristales separados de cuarzo translúcido.

En el tamaño arena media se observan los mismos componentes que en los dos anteriores, pero con un mayor porcentaje de cristales de cuarzo, además de presentar cristales separados de anfíbol y biotita.

#### **4.1.2.2 Facies Lóbulo Norte (LN)**

##### ***Geometría general del depósito***

Depósito ubicado al suroeste del volcán Llullaillaco y al oeste del Cerro Silla, y que presenta una forma lobular alargada, con dirección suroeste. Se emplaza entre los 4310 y los 4870 msnm, ganando altura hacia el noreste, y con un área calculada de 6 km<sup>2</sup>. Sobreyace depósitos dacíticos del cerro Silla (Mioceno Superior) hacia el NE, así como a depósitos volcánicos del Mioceno Inferior-Medio de los Cerros Altos de Tocomar hacia el SW; y subyace a depósitos aluviales y coluviales del Cuaternario (Gardeweg et al., 1993). En terreno (Figura 29), así como en la imagen satelital (Figura 31), se observan de color pardo-anaranjado, intercalado con sectores de color amarillo-blanquecino. En su sector más distal, con respecto al volcán Llullaillaco, se observa cómo el depósito remonta los Cerros Altos de Tocomar hacia el suroeste.



*Figura 29 Fotografía vista desde el sur, se muestra en primer plano el depósito ZN, observándose un campo llano y más en el fondo suaves lomas. Al fondo el volcán Llullaillaco.*

## ***Estructuras***

- ***Hummocks***

En este lóbulo se identificaron 14 estructuras de tipo *hummock*, 10 de ellos dispuestos aproximadamente en dirección NE, uno cercano al centro del depósito se emplaza en dirección N-S, y tres en las zonas más alejadas al volcán Lullailaco, se orientan cercano a la dirección E-W (Figura 30). Sus tamaños varían desde los 80 m hasta los 210 m de largo, alcanzan espesores de más de 8 m y poseen formas redondeadas en sus bases.

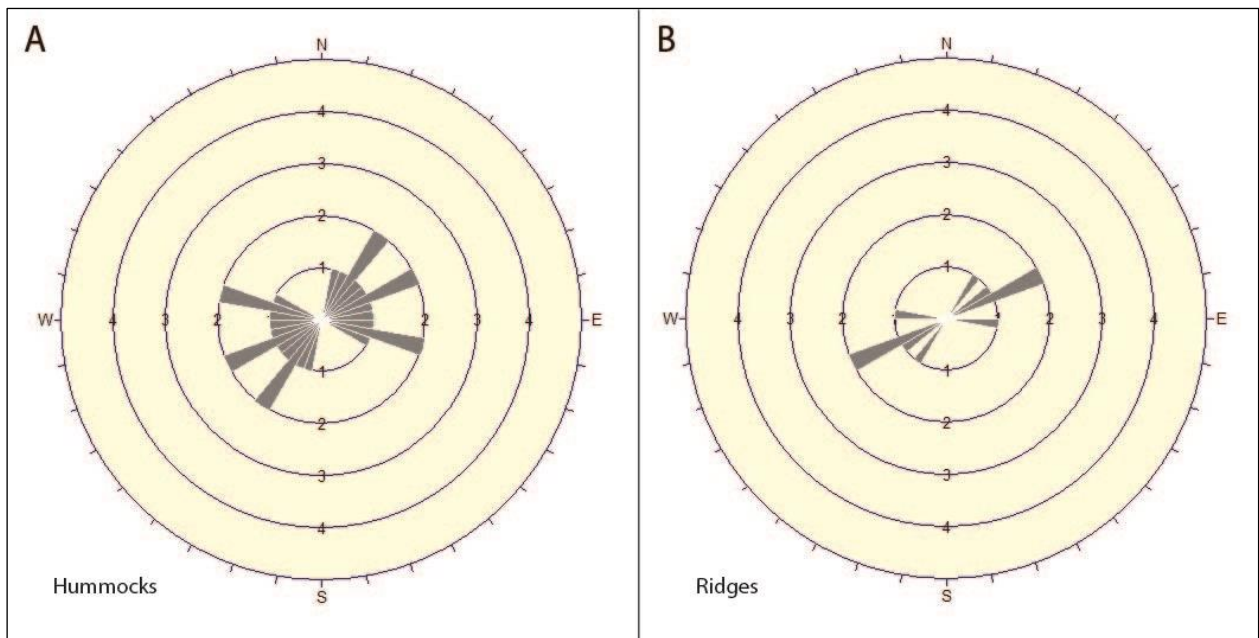


Figura 30 Diagrama de roseta indicando el rumbo de las estructuras presentes en LN. A) *Hummocks*. B) *Ridges*.

- ***Ridges***

Se lograron identificar cinco *ridges* longitudinales. Cuatro de ellos se disponen de forma muy cercana a la dirección más alargada del depósito (NE), mientras que uno se presenta de forma oblicua a éste, con una dirección aproximadamente E-W (Figura 30). Sus longitudes varían desde los 580 m hasta los 1200 m, y alcanzan potencias promedio de 10 m, con formas basales ovaladas.

- ***Levées***

Por la forma elongada del depósito, asemeja dos largos *levées* que lo cruzan a lo largo de toda su elongación, desde el lugar en que la pendiente disminuye en el NE, hasta alcanzar los cerros Altos de Tocomar en el SW, y que están formados por todos los *ridges* y *hummocks* descritos en las otras secciones, alineados.

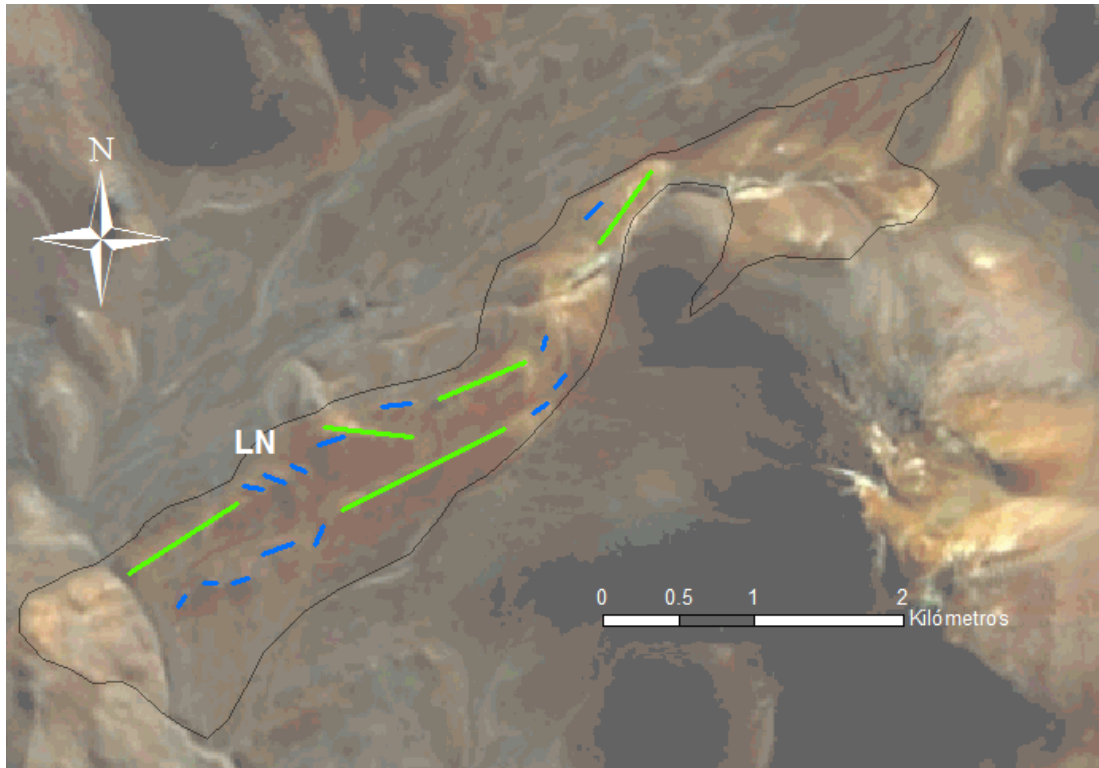


Figura 31 Estructuras del LN. En negro se encierra la zona de estudio, en azul se indican los hummocks y en verde los ridges. Hacia la zona más distal (zona más amarillenta) pareciera que la avalancha remontó unos cerros más antiguos durante su transporte. Imagen satelital Aster.

## **Litología**

- **Bloques**

En sectores medios del lóbulo, cercano a la colada SW del volcán Lullillaco, los bloques alcanzan tamaños de más de un metro, son subangulosos y presentan, en su mayoría, intensa alteración hidrotermal (Figura 32 A y B). Se observaron clastos de roca volcánica muy alterada y otros brechizados. Ambos con mineralogía similar: cristales de plagioclasa de 4 mm de diámetro máximo, cuarzo hasta 3 mm y biotita y anfíbol menores a 2 mm, además de presentar arcilla y minerales amarillentos de alteración. También, se identificaron fragmentos de brecha hidrotermal con matriz silicificada, de color blanquecino y presencia de oquedades, con clastos de roca volcánica muy alterada, con fenocristales de plagioclasa.

En partes más cercanas al final del lóbulo, en su zona suroccidental, hay bloques polimícticos de hasta dos metros, subredondeados y subangulosos, con presencia de clastos prismáticos de roca volcánica (Figura 32 C y D). Los clastos corresponden a dacitas porfíricas de anfíbol y de biotita, con cristales de plagioclasa de hasta 8 mm de diámetro, cristales de cuarzo hasta 5 mm, y biotita y anfíbol menores a 2 mm. El color de la matriz varía entre el rojizo, el negro y el gris, estos últimos se presentan, en ocasiones, en forma prismática. También, se encontraron, en baja proporción, fragmentos de toba cristalina dacítica, amarillentos y vesiculares.

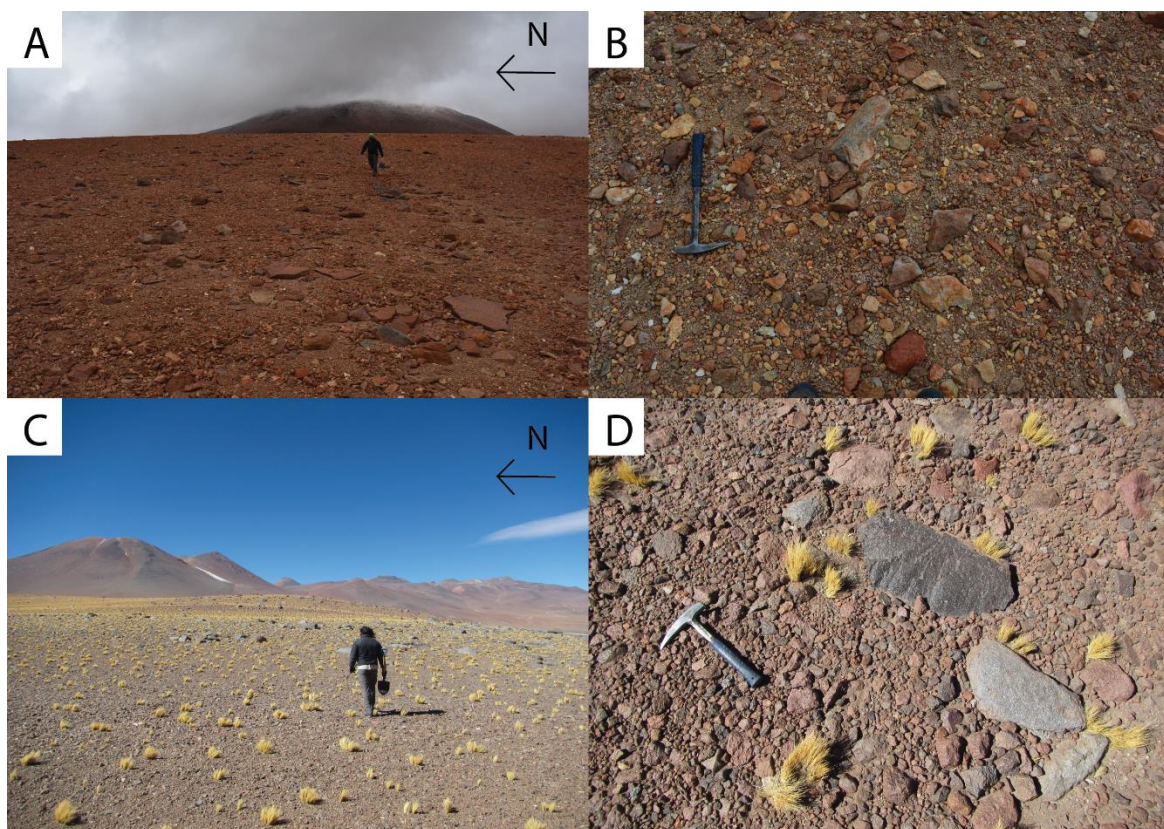


Figura 32 Distribución y texturas de bloques en LN. A) Distribución de los bloques en zonas proximales del depósito. B) Variabilidad litológica en zonas proximales del lóbulo. C) Distribución de los bloques en zona distales, con presencia de bloques de hasta 2 m. D) Variabilidad litológica en los clastos encontrados en zonas distales.

- **Matriz**

En sectores nororientales, la matriz presenta, en su tamaño gránulo, fragmentos líticos silicificados, subangulosos, de color blanco lechoso, en una alta proporción; fragmentos líticos volcánicos, subangulosos, de color rojizo y con cristales negros y blancos; y clastos volcánicos de colores pardo y gris, angulosos a subangulosos, con cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol. En el tamaño arena gruesa, se observa la misma composición, pero con un pequeño porcentaje de cristales separados de cuarzo. El tamaño arena media también posee la misma composición que los anteriores, pero con presencia de cristales de cuarzo, biotita y anfíbol separados.

El tamaño gránulos de la matriz, en la zona más suroccidental del depósito, presenta fragmentos líticos grises, pardos y rojizos, subredondeados, con cristales de cuarzo, plagioclasa y anfíbol. También, se observan fragmentos silicificados de color blanco lechosos, con cristales rojos tabulares. En el tamaño arena gruesa, se encontraron, además de los fragmentos anteriores, cristales separados de cuarzo, biotita y anfíbol. Finalmente, en el tamaño arena media, ya no se observan los fragmentos silicificados, y aumenta la proporción de cristales de cuarzo, además de incluir, en baja proporción, cristales de plagioclasa.

### 4.1.2.3 Facies Lóbulo Central (LC)

#### ***Geometría general del depósito***

Depósito con forma lobular, alargado en dirección E-W, que tiene mayores espesores laterales hacia el oeste que en sus zonas medias, donde está confinado a las pendientes adyacentes de la topografía (Figura 33). Se ubica al sur del cerro Silla, entre los 4200 y los 4820 msnm, con pérdida de altura hacia el oeste. Se calculó para esta zona un área de 3 km<sup>2</sup>. Sobreyacen depósitos de lavas andesíticas a dacíticas del Mioceno Medio-Tardío (Richards y Villeneuve, 2004) hacia el sur, norte y este, donde está en contacto con el Cerro Silla; y subyace a depósitos aluviales y coluviales cuaternarios hacia el oeste (Gardeweg et al., 1993). Tanto en terreno como en la imagen satelital, se presentan de color rojizo-anaranjado, homogéneo en toda su superficie.

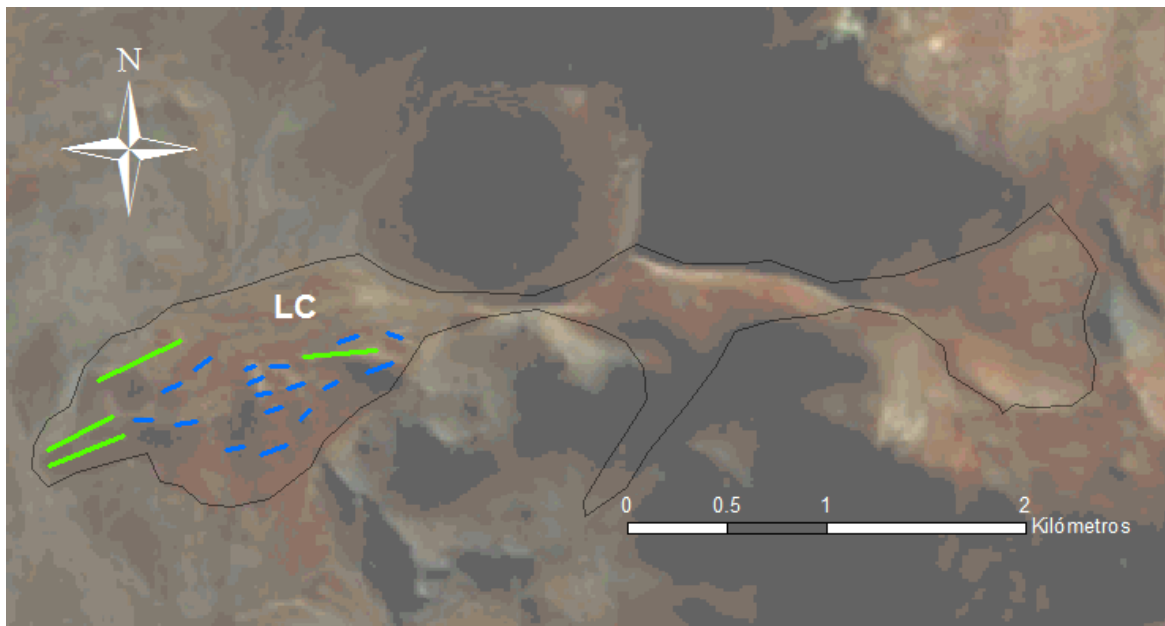


Figura 33 Estructuras del LC. En negro se encierra la zona de estudio, en azul se indican los hummocks y en verde los ridges. Imagen satelital Aster con color real.

#### ***Estructuras***

- ***Hummocks***

Se identificaron 17 *hummocks* (Figura 35) dispuestos, 12 de ellos, en dirección entre NE y ENE, cuatro se orientan cercanos al E-W, y uno hacia WNW (Figura 34). Sus longitudes alcanzan longitudes de entre 45 m y 140 m, y presentan potencias de 10 m en promedio, con simetrías redondeadas en sus bases.

- ***Ridges***

Se identificaron cuatro *ridges*: tres en zonas distales, y uno en la zona media del depósito. Este último se orienta en dirección aproximada E-W, mientras que los otros tres se disponen inclinados hacia el ENE (Figura 34). Sus dimensiones alcanzan extremos



entre 370 m y 460 m de largo, y espesores de hasta 15 m, además de formas basales ovaladas.



Figura 35 Fotografía de la superficie abarcada por LC, mirando hacia el este. Se observa la alta concentración de bloques y los hummocks hacia el centro del lóbulo.

- **Levées**

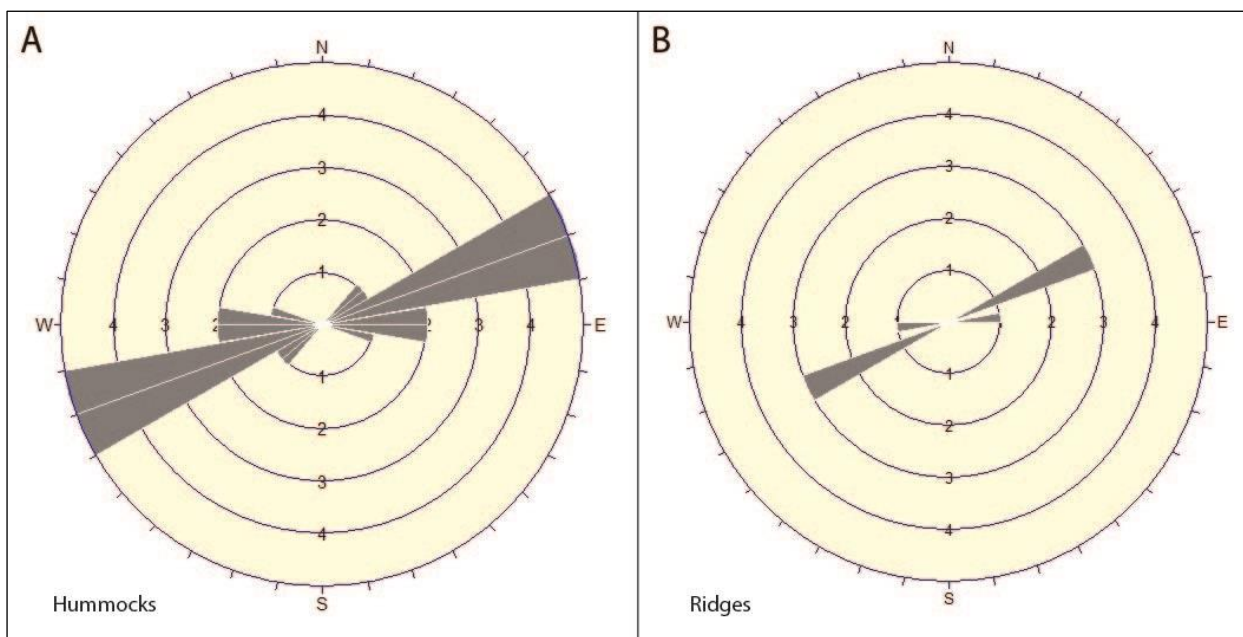


Figura 34 Diagrama de roseta indicando el rumbo de las estructuras presentes en LC. A) Hummocks. B) Ridges.

No se observan *levées* propiamente tal, los *hummocks* se concentran en el centro del lóbulo, teniendo, el depósito, pendientes más suaves hacia los laterales.

### **Litología**

- **Bloques**

En sectores más orientales del lóbulo, cercano al cerro Silla, se observan bloques de hasta 3 m, polimícticos y con mala selección. En bloques de mayor tamaño (sobre 2 m) se observaron marcas de impacto (Figura 36 A y B). Se identificaron dacitas porfíricas de anfíbol y de biotita, con cristales de plagioclasa y cuarzo de hasta 7 mm, y de biotita y anfíbol menores a 2 mm. La matriz de los fragmentos líticos es, predominantemente, de color rojizo o gris claro, sin embargo, se presentan, en menor proporción, clastos de color rosáceo y otros amarillo-blanquecinos, los cuales se encuentran muy alterados, con minerales amarillos de alteración.

Hacia el oeste, cercano al final del lóbulo, se presentan bloques de menor tamaño (hasta 1.5 m), también polimícticos y con mala selección (Figura 36 C y D). Presenta clastos con composiciones similares entre sí, pero variando en su matriz y grado de



Figura 36 Distribución y texturas de bloques en LC. A) Distribución de bloques de mayor tamaño en zonas distales. B) Marcas de impacto en bloques de la zona distal. C) Distribución de los bloques en zonas distales. D) Variabilidad litológica, en particular, se observa un bloque prismático vítreo

alteración: dacitas porfíricas de anfíbol, con cristales de plagioclasa y cuarzo de hasta 5 mm y de biotita y anfíbol hasta 3 mm de diámetro. Predominan los de matriz gris claro, con bajo grado de alteración, seguidos de unos con matriz de color rojizo, alterada por óxidos de hierro, y que incluye cristales de epidota en amígdalas junto con cuarzo. También, se encontraron con matriz rosácea y gris oscura, este último también con cristales de epidota en amígdalas.

A unos 400 m al oeste del lóbulo, en la ladera de los cerros Altos de Tocomar, se encontraron bloques de hasta 3.5 m de diámetro, subredondeados y subangulosos, algunos con morfologías prismáticas. Los clastos corresponden a dacitas porfíricas de anfíbol y de biotita, con cristales de plagioclasa de hasta 7 mm de diámetro, cuarzo de hasta 5 mm, anfíbol y biotita menores a 4 mm. La matriz varía entre colores gris claro, rosáceo, rojizo y amarillento, este último con un alto nivel de alteración, con presencia de oquedades.

- **Matriz**

En zonas medias a orientales del depósito, el tamaño gránulos de la matriz, presenta clastos de roca volcánica de colores rojizos, pardos y rosados, subredondeados, con cristales de plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol. También, se encontraron fragmentos volcánicos de color gris, angulosos a subangulosos, con la misma mineralogía que los anteriores. En muy baja proporción, se identificaron fragmentos de sílice translúcido botroidal. En tamaño arena gruesa, ya no se observa el sílice botroidal, pero se encontraron fragmentos silicificados de color blanco lechoso, además de cristales separados de cuarzo translúcido. En el tamaño arena media, se presentan los mismos componentes que en el tamaño anterior, pero con cristales separados de anfíbol y de biotita, y en muy baja proporción, de epidota.

En el sector occidental del lóbulo, el tamaño gránulos está compuesto de fragmentos líticos volcánicos, subredondeados, de color rojizo y pardo, con cristales de plagioclasa, cuarzo, anfíbol y biotita. Se identificaron además, rocas volcánicas de color gris, subangulosos con los mismos minerales. Por último, se encontraron fragmentos silicificados de color naranja-lechoso. La única diferencia con el tamaño arena gruesa, es que este último presenta cristales separados de cuarzo translúcido, mientras que para el tamaño arena media, se identificaron cristales de biotita y anfíbol en baja proporción, además de los mismos componentes anteriores.

En la ladera este de los cerros Altos de Tocomar, al oeste del lóbulo, el tamaño gránulos de la matriz presenta: fragmentos líticos subangulosos, de color gris con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita; fragmentos volcánicos subangulosos de colores rosáceos (vesiculares), pardos y rojizos, con la misma mineralogía anterior; muy baja concentración de fragmentos silicificados café lechosos, con cristales negros; y fragmentos líticos amarillentos muy alterados, subredondeados, con cuarzo y plagioclasa. Los tamaños arena gruesa y arena media presentan los mismos componentes, presentando el primero, cristales de cuarzo separados, y el segundo, cristales de cuarzo, biotita, anfíbol y muy baja proporción de epidota.

#### 4.1.2.4 Facies Lóbulo Sur (LS)

##### ***Geometría general del depósito***

Corresponden a los depósitos ubicados más al sur en la zona de estudio, con morfología lobular, elongado en la dirección E-W, y que se emplaza entre los 4130 y los 4900 msnm (Figura 37). Se ubica al oeste de los cerros del Cordón de los Ásperos, al norte de los Cerros del León y hacia el oeste se observa cómo los depósitos de LS remontan la ladera del cerro Punta Negrillo (Figura 39). El área calculada es de 11 km<sup>2</sup>. Como ya se mencionó, sobreyace depósitos andesíticos y dacíticos del Mioceno Inferior-Medio del cerro Punta Negrillo en el sector más occidental, hacia el sur se encuentra en contacto con depósitos de lavas dacíticas del Mioceno Inferior-Medio de los Cerros del León (Gardeweg et al., 1993), y hacia el noreste está sobre depósitos de lavas andesíticas a dacíticas del Mioceno Medio-Tardío (Richards y Villeneuve, 2004). Subyace a depósitos aluviales y coluviales cuaternarios hacia el norte (Gardeweg et al., 1993). En terreno, se observan de color pardo-grisáceo, mientras que en la imagen satelital, se presentan con un color más rojizo, cambiando a amarillento hacia el sur.

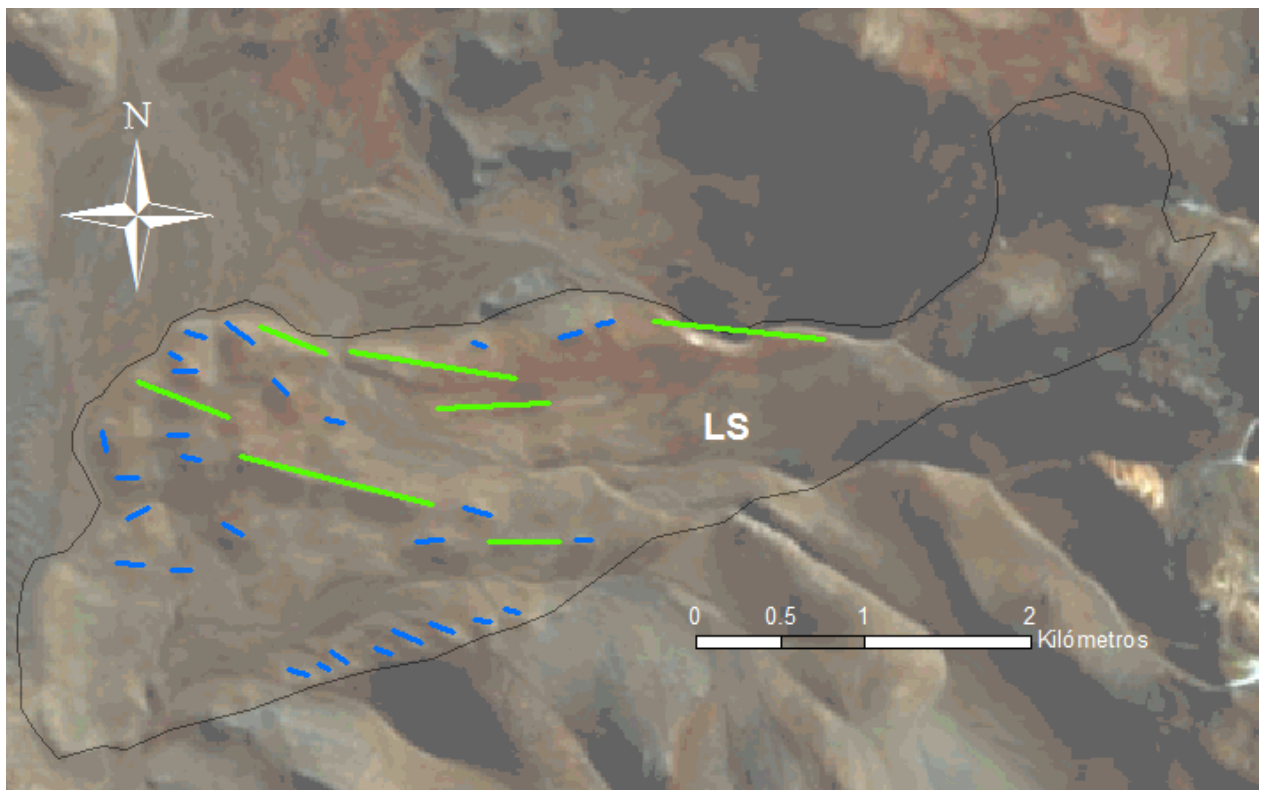


Figura 37 Estructuras de LS. En negro se encierra la zona de estudio, en azul se indican los hummocks y en verde los ridges. Imagen satelital Aster

## ***Estructuras***

- ***Hummocks***

Fueron identificados 28 *hummocks* en esta área. Estos alcanzan longitudes desde 70 m hasta 200 m, y se concentran en las zonas más bajas del lóbulo (Figura 39). Todos ellos se emplazan en las zonas más occidentales, donde la superficie presenta una menor pendiente y menores alturas. En general, en los sectores central y norte del lóbulo, se disponen con dirección E-W, similar a la elongación del depósito, sin embargo, cercano al borde NW, cinco *hummocks* se orientan con dirección NW. Además, se observan ocho de estas estructuras en el límite sur del lóbulo, todos ellos con una dirección aproximada NW (Figura 38). El espesor de estas estructuras aumenta hacia el borde norte, hasta aproximadamente 15 m. Todas ellas presentan simetrías basales redondeadas a ovaladas.

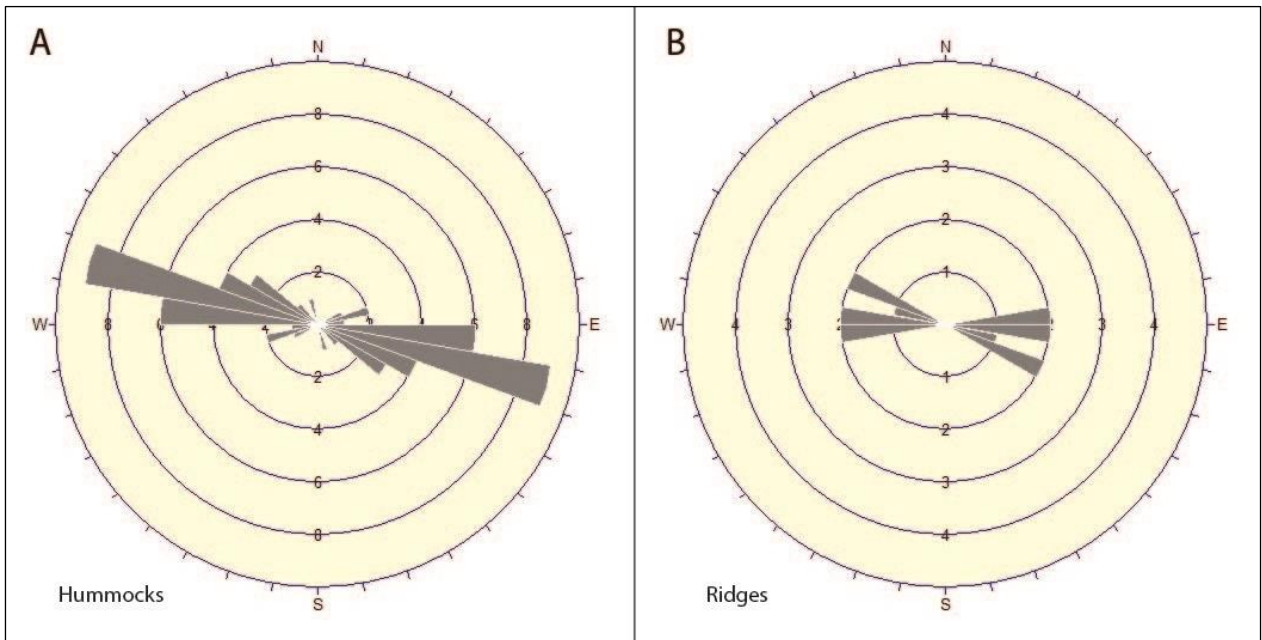


Figura 38 Diagrama de roseta indicando el rumbo de las estructuras presentes en LS. A) Hummocks. B) Ridges.

- ***Ridges***

Siete estructuras de tipo *ridge* se identificaron en LS. Cinco de ellos, ubicados desde el sector central del lóbulo y hasta el límite norte, se orientan con dirección entre E-W y WNW (Figura 38), con longitudes desde 420 m hasta 1200 m. Los otros dos *ridges* se encuentran en zonas medias de la elongación del depósito, ambos con dirección E-W, y con dimensiones de 425 m y 670 m, respectivamente. Alcanzan espesores de 30 m hacia el límite norte del lóbulo, y muestran formas basales ovaladas.



Figura 39 Depósito LS visto desde el este. Se observa la presencia de muchos hummocks, los levées y cómo el depósito remonta hacia el final del valle

- **Levéés**

Los *hummocks* alineados en el borde sur del depósito forman una morfología de tipo *levée*, con un largo estimado de 2500 m. En el límite norte, son tres *ridges* y tres *hummocks* alineados los que generan la estructura, los que alcanzan una longitud aproximada de 3000 m.

### **Litología**

- **Bloques**

En los sectores más orientales del depósito, se presentan bloques de hasta 2.5 m, aunque también se observaron bloques aislados de hasta 6 m de diámetro en el borde sur. Son polimícticos, predominando lavas porfíricas grises y rojizas (Figura 40 A, B y C). En partes centrales del depósito, se observaron clastos de dacitas porfíricas de anfíbol, con cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, biotita hasta 4 mm, y cuarzo y anfíbol menores a 2 mm de diámetro. La variación de los bloques se encuentra en el color de la matriz, con tonos de gris claro, gris oscuro y rojizo, estos últimos más alterados y con presencia de oquedades. En zonas más al sur del lóbulo, predominan dos familias de rocas volcánicas: una con dacitas porfíricas de anfíbol, con cristales de plagioclasa de hasta 10 mm de diámetro, cuarzo hasta 5 mm, y biotita y anfíbol menores a 2 mm, además de epidota en amígdalas, y con matriz de color rojizo muy alterada; y otra compuesta por dacitas porfíricas de biotita, con plagioclasas de hasta 4 mm, cuarzo hasta 3 mm y biotita menores a 1 mm, con matriz de color gris oscuro. Por último, en la muestra P130517-3B, ubicada al sur del lóbulo, en la ladera norte de los Cerro del León, los bloques son todos volcánicos, con dacitas porfíricas y afaníticas de biotita, y andesitas porfíricas de biotita; con presencia de plagioclasas de hasta 4 mm de diámetro, y cuarzo, anfíbol y biotita menores a 1 mm. La matriz de estos clastos varía en su color y grado de alteración: unos poco alterados de color gris claro y gris oscuro, y otros de color rojizo, con un alto grado de alteración por óxidos de hierro.

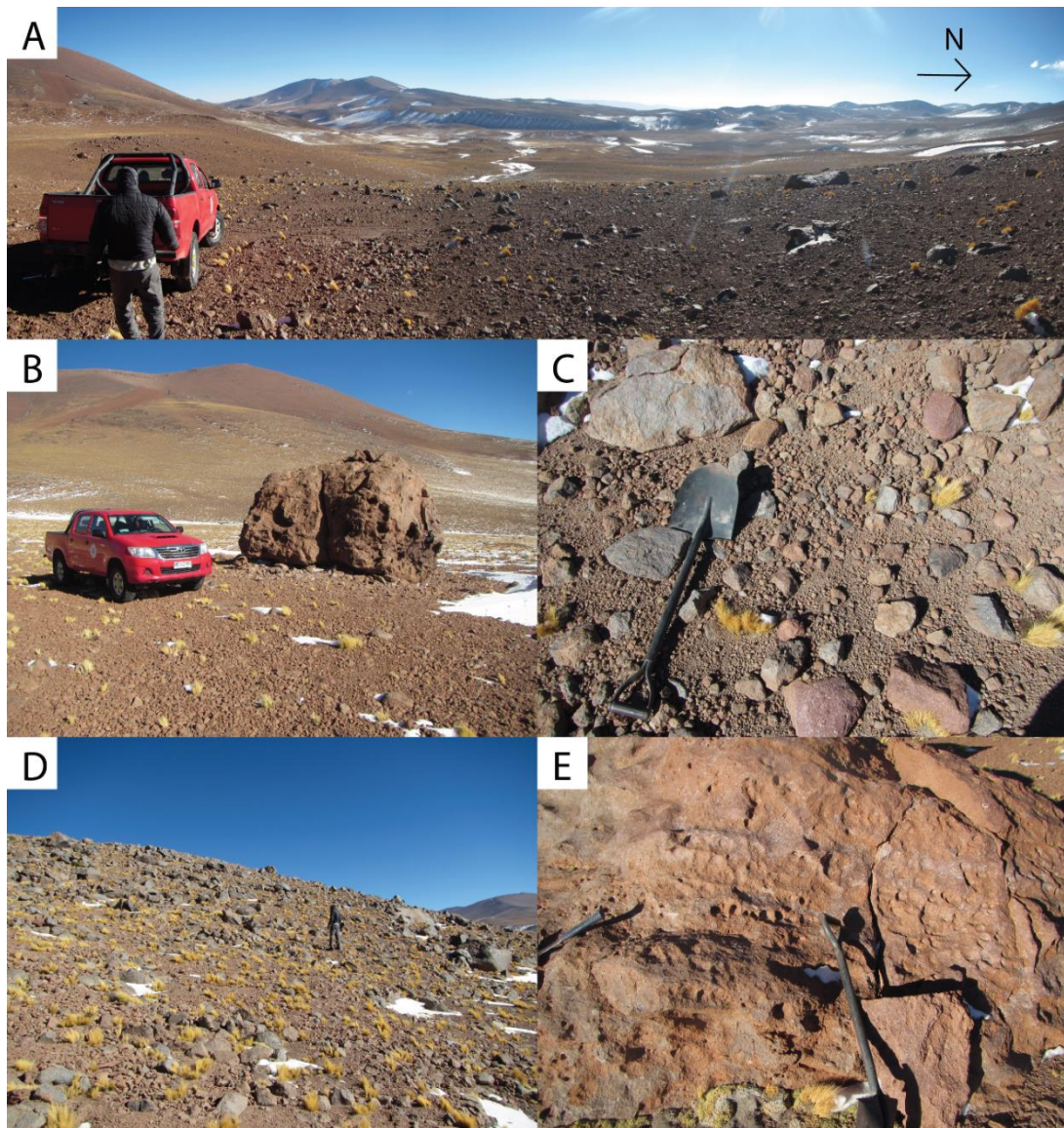
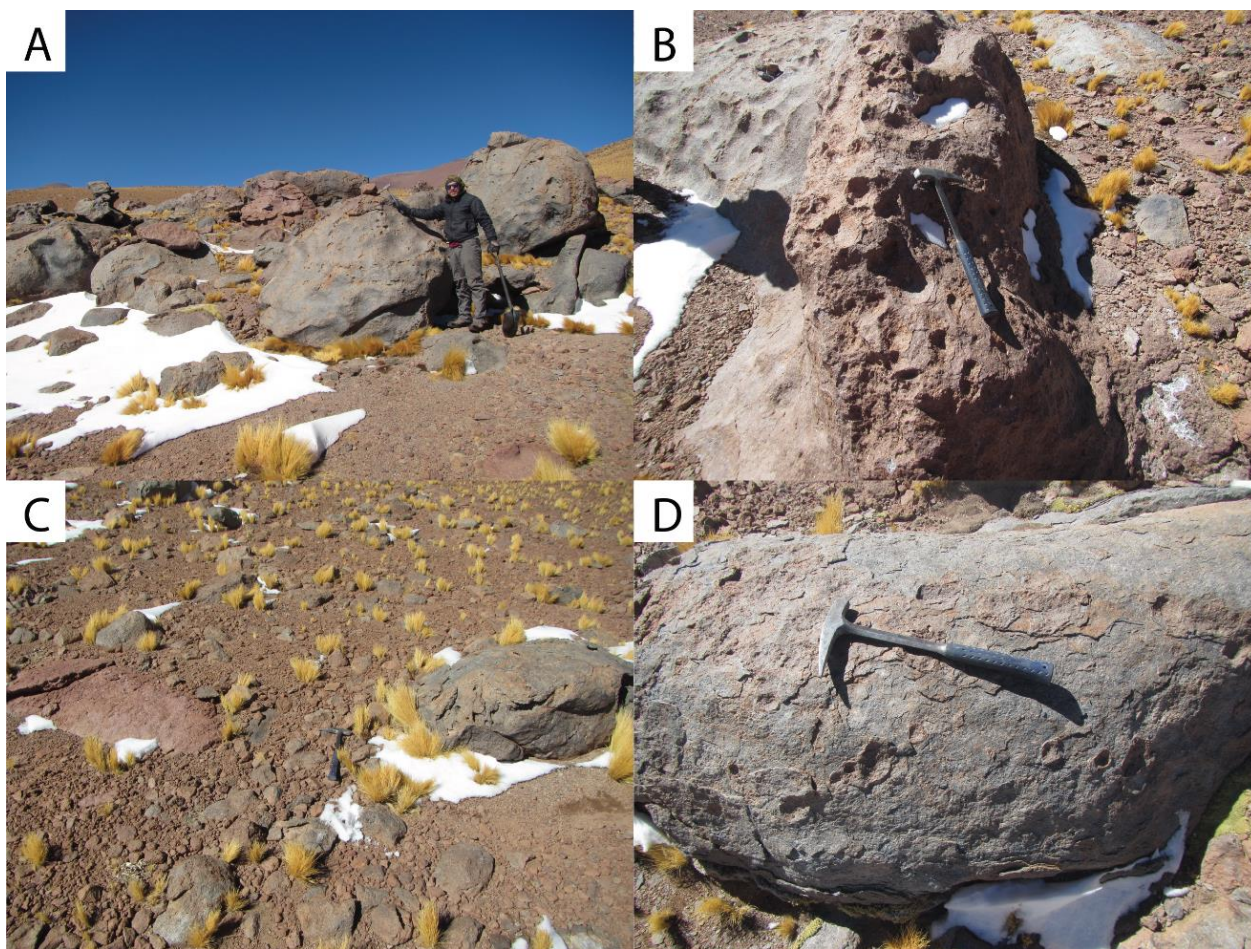


Figura 40 Distribución y texturas en bloques en LC, zonas proximales y medias. A) Distribución de bloques en zonas proximales. B) Bloque aislado de gran tamaño (unos 5 m) en zona proximal. C) Variabilidad litológica en zona proximal, con presencia de lavas grises y probables piroclastos. D) Distribución de bloques en zonas medias del lóbulo. E) Marcas de impacto en algunos bloques de gran tamaño, también en zonas medias.

En zonas medias del lóbulo, aparecen bloques de hasta 4 m, polimícticos, nuevamente predominando las lavas porfíricas grises, subangulosas y subredondeadas vesiculares. En el sector sur se observan algunos clastos de bombas piroclásticas rojizas de hasta 80 cm. Presencia de marcas de impacto en algunos bloques de tamaño superior a 2 m (Figura 40 D y E). En el límite sur del lóbulo se encontraron bloques de dacitas porfíricas y afanítica de anfíbol, con cristales de plagioclasa y cuarzo de hasta 5 mm de diámetro y biotita y anfíbol menores a 2 mm, con matrices de color gris, gris oscuro y rojizo, esos últimos con un mayor grado de alteración. También, se identificaron fragmentos de toba cristalina de colores gris, rojizo y pardo, muy porosas, y con presencia de plagioclasa, cuarzo y biotita. En el sector central, se reconocieron clastos de dacitas porfíricas de anfíbol, con cristales de plagioclasa y cuarzo de hasta 5 mm de diámetro, biotita de hasta 4 mm y anfíbol menor a 2 mm. Las matrices varían entre colores gris claro,

rosáceo (las cuales, además, presentan cristales de epidota en amígdalas), rojizo y pardo, estas dos últimas con mayor grado de alteración y con presencia de oquedades. Finalmente, en el borde norte del depósito, se encontraron distintos tipos de dacitas porfíricas de anfíbol, con cristales de plagioclasa de hasta 7 mm, cuarzo hasta 5 y biotita y anfíbol hasta 3 mm. Se diferencian en el color de su matriz, con colores gris claro, anaranjado y rojizo (estos dos últimos presentan cristales de epidota menores a 1 mm en amígdalas), además de unos anaranjados-amarillentos en el cual no se reconocen minerales primarios por su alto grado de alteración. Aproximadamente, a 200 m al norte se observó un depósito monomítico, sin presencia de matriz, también con bloques de dacitas porfíricas de anfíbol, con cristales de plagioclasa, cuarzo, anfíbol y biotita, con matriz gris claro o rojiza.



*Figura 41 Distribución y texturas en bloques en LC, zonas distales del lóbulo. A) y C) muestran la distribución y variabilidad litológica para el sector lateral y para el centro, respectivamente. B) y D) muestran marcas de impacto en bloques de mayor tamaño también para los laterales y el centro, respectivamente.*

Por último, en el frente del lóbulo, los bordes presentan bloques de mayor tamaño (hasta 5 m en el norte y 3 m en el sur), mientras que en el centro sólo alcanzan diámetros de hasta 1.5 m (Figura 41 A y C). Son subredondeados y subangulosos y polimíticos. Los bloques de mayor tamaño, sobre 2 m de diámetro, presentan marcas de impacto (Figura 41 B y D). A lo largo de todo el frente se identificaron clastos de dacitas porfíricas de anfíbol y de biotita, con cristales de plagioclasa de hasta 8 mm de diámetro, cuarzo de hasta 6 mm, y biotita y anfíbol menores a 4 mm, además de la presencia, en algunos bloques, de cristales de epidota en amígdalas. Se presentan con distintos colores en su matriz, tales



como gris claro, rojizo y rosáceo, y en menor proporción, unos de color café claro y anaranjados, con un alto grado de alteración y muy oquerosos. Además, en el sector sur, se observaron fragmentos de toba cristalina dacítica de muy baja densidad, vesiculares, y con presencia de fragmento líticos volcánicos.

- **Matriz**

El sector este del lóbulo, en la parte central, el tamaño gránulos de la matriz presenta un bajo contenido de fragmentos líticos volcánicos de color rojizo, subangulosos, con cristales de anfíbol, plagioclasa y cuarzo; fragmentos líticos volcánicos grises, subangulosos a angulosos, con cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita; y un alto porcentaje de fragmentos líticos de color pardo, subangulosos y subredondeados, con la misma mineralogía que los clastos anteriores. En el tamaño arena gruesa, se observa la misma composición anterior, más fragmentos líticos silicificados, café lechosos; y cristales separados de cuarzo. En el tamaños arena media se identificaron, además, cristales separados de anfíbol, biotita y epidota. En el límite sur, el tamaño gránulos contiene fragmentos líticos silicificados de color café lechoso, con anfíboles, biotita, cuarzo y plagioclasa; fragmentos líticos de color pardo, subangulosos y subredondeados, también con los mismos minerales anteriores; y fragmentos líticos rosáceos y grises con la misma mineralogía; un bajo contenido de fragmentos de color rojizo, silicificados. Los tamaños arena gruesa y arena media incluyen, además de los componentes anteriores, cristales separados de cuarzo el primero, y cristales separados de cuarzo, biotita, anfíbol y epidota, además de fragmentos esféricos de color pardo el segundo. Finalmente, 300 m al sur del lóbulo, el tamaño gránulos de la matriz presenta fragmentos líticos volcánicos de colores gris, pardo y rosáceo, subangulosos y subredondeados, con cristales de cuarzo, anfíbol, biotita y plagioclasa; y un bajo contenido de fragmentos líticos de color rojizo, subredondeados, vesiculares, con cuarzo, plagioclasa y pequeños cristales negros. En el tamaño arena gruesa se observaron los mismos fragmentos anteriores, incluyendo líticos silicificados de color blanco lechoso, subredondeados a redondeados; y cristales de cuarzo, anfíbol y biotita. Por último, el tamaño arena media presenta la misma composición anterior, más cristales de epidota y fragmentos líticos de color pardo, subredondeados a redondeados esféricos.

En zonas medias del depósito, el tamaño gránulos de la matriz en el sector norte presenta fragmentos líticos grises, subangulosos con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita; fragmentos líticos con igual mineralogía, de color rojizo a pardo, subredondeados; y fragmentos silicificados de color blanco lechoso con cristales negros. En los tamaños arena gruesa y arena media se observaron las mismas características, incluyendo cristales de cuarzo separados en el primero, y cristales de cuarzo, anfíbol y biotita en el segundo. En el tamaño gránulo de la matriz en la parte central, se identificaron fragmentos líticos volcánicos rojizos, subangulosos, con cristales de anfíbol; fragmentos volcánicos grises, con cristales translúcidos y negros; y muy baja concentración de cristales separados de cuarzo. El tamaño arena gruesa contiene los mismos componentes que los gránulos, mientras que la arena media incluye, además, cristales separados de biotita y anfíbol. En borde sur, el tamaño gránulo está compuesto por fragmentos líticos volcánicos de color pardo y rosáceo, subangulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita; fragmentos silicificados de color blanco lechoso, subredondeados; y fragmentos de color gris oscuro, vesiculares, subredondeados, con cristales de cuarzo, plagioclasa y anfíbol. El tamaño arena gruesa contiene los mismos

componentes que el tamaño mayor, excepto por la presencia de cristales separados de cuarzo y biotita, mientras que el tamaño arena media posee, además, cristales de anfíbol y epidota, y dejan de aparecer los fragmentos silicificados.

Por último, de la zona frontal (oeste) del lóbulo, presenta un tamaño gránulo de matriz compuesto por fragmentos líticos pardos y rojizos, subredondeados, con cristales de anfíbol, cuarzo, plagioclasa y biotita; fragmentos líticos grises subangulosos con cuarzo, plagioclasa y anfíbol, algunos de ellos vesiculares (principalmente en el sector centro y sur); y fragmentos silicificados de color blanco-café lechoso, subredondeados y subangulosos. Los tamaños menores están compuestos por los mismos fragmentos, con la presencia de cristales de cuarzo y biotita en la arena gruesa, y de cuarzo, biotita y anfíbol, además de muy baja concentración de epidota (en el sector central del lóbulo), en la arena media.

#### **4.1.3 Descripción petrográfica y estructural de la Zona Norte**

En el sector ubicado justo al oeste del volcán, y al norte del depósito de avalancha, se identificó un depósito clástico que en imágenes satelitales se presenta con características de colores y estructuras distintas a la avalancha de detritos, como se presenta en la Tabla 2, en que se resumen las características de las facies y la Zona Norte, por lo que se estudió por separado a al resto del depósito.

##### ***Geometría general del depósito***

Área ubicada justo al oeste del volcán Llullaillaco, entre los 4340 y los 5580 msnm, con mayor altura en sectores cercanos al edificio volcánico, y que está conformada por dos morfologías lobulares separadas por el Cerro Mitrol y que se orientan hacia el oeste y hacia el suroeste, respectivamente (Figura 42). Para este sector, se calculó un área de 28 km<sup>2</sup>. Estos depósitos sobreyacen los volcánicos de carácter andesíticos a dacíticos del Mioceno Medio-Tardío (Richards y Villeneuve, 2004), y subyacen a lavas dacíticas del Pleistoceno Tardío, pertenecientes al volcán Llullaillaco (Richards y Villeneuve, 2004), los cuales se disponen en dirección suroeste, en el sector este de ZN. Tanto en terreno como en la imagen satelital, se observan de color grisáceo de manera homogénea.



Figura 42 Fotografía vista desde el sur, se muestra en primer plano el depósito ZN, observándose un campo llano y más en el fondo suaves lomas. Al fondo el volcán Lulluillaco.

### **Estructuras**

El depósito corresponde a una llanura que es atravesada por quebradas de bajas pendientes (Figura 43). Hay sectores con una mayor acumulación de bloques de dimensiones de más de un metro de diámetro, que en conjunto con las zonas más altas, adyacentes a las quebradas, pueden llegar a confundirse con la presencia de estructuras, pero en terreno se descartó esta idea, ya que se observó un depósito más bien homogéneo y llano.

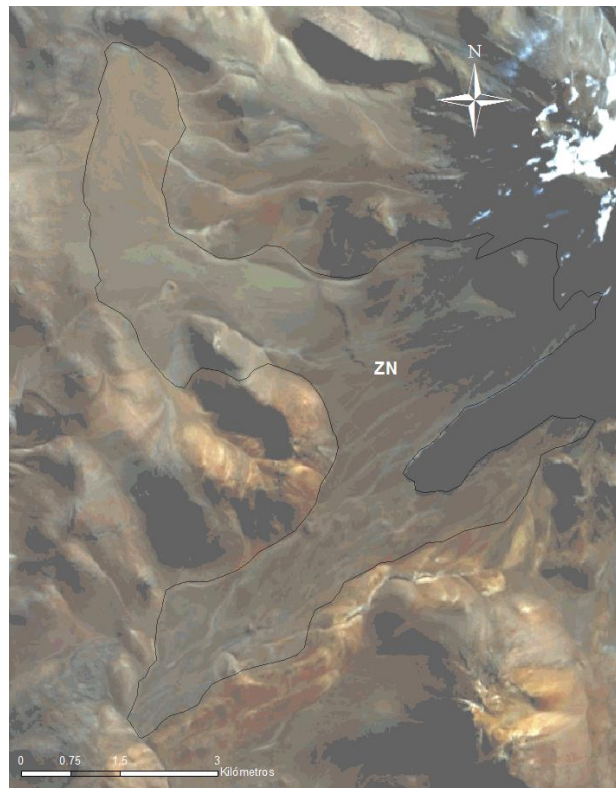


Figura 43 Imagen satelital Aster, donde se muestran las delimitaciones de la Zona Norte, depósito al norte de la zona de estudio.

## Litología

- **Bloques**

En el lóbulo norte de esta zona, se observan bloques de hasta 1 m de diámetro, polimícticos, con clastos subredondeados y otros prismáticos (predominan estos últimos) (Figura 44 A y B). La muestra P160517-5B, indica que los fragmentos presentes corresponden a dacitas porfíricas de anfíbol, con cristales de plagioclasa y cuarzo de hasta 5 mm de diámetro, y biotita y anfíbol menores a 1 mm. La matriz de estos clastos varía entre tonos de gris, rojizo (con presencia de oquedades), y rosácea, esta última con un muy alto grado de alteración. Además, se observaron, en baja proporción, fragmentos piroclásticos de color amarillo.

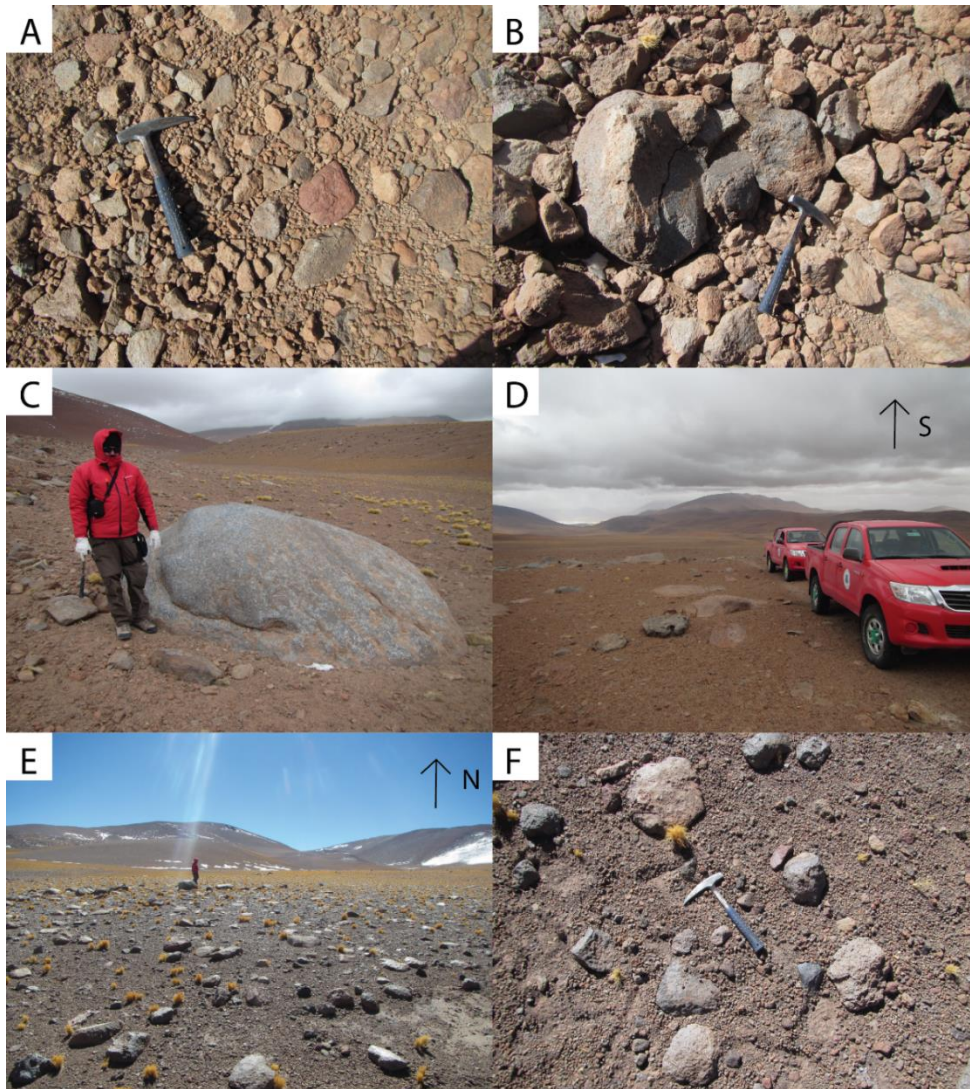


Figura 44 Distribución y textura de los bloques en ZN. En A) y B) se observa la variabilidad de clastos presentes en el lóbulo norte, con sus clastos subredondeados y subangulosos. C) Bloque aislado subredondeado, presente en la zona proximal del lóbulo sur. D) Distribución de los bloques en las zonas medias y proximales del lóbulo sur, siendo polimícticos y muchos de ellos alterados. E) Distribución de los bloques en la zona distal del lóbulo sur, con bloques de hasta 1 m. F) Variabilidad de clastos en la zona distal, con presencia de bloques de lavas y algunos de pómez.

En el lóbulo sur, las zonas nororientales y medias muestran bloques de hasta 3 m de diámetro, subredondeados, y polimícticos, predominando lavas porfíricas, con variado grado de alteración por óxidos de hierro (Figura 44 C y D). En el sector más cercano al volcán Llullaillaco, se encontraron clastos de dacitas porfíricas de anfíbol, con cristales de plagioclasa de hasta 6 mm de diámetro, cuarzo hasta 4 mm y biotita menores a 2 mm. En algunos bloques, los anfíboles eran de hasta 10 mm, mientras en el resto se aproximaban a los 2 mm. Muy baja proporción de cristales de piroxeno menores a 1 mm. La matriz variaba entre colores gris, rosado y rojizo, este último con mayor grado de alteración.

En sectores medios del depósito, los clastos incluyen dacitas afaníticas y porfíricas de anfíbol, con cristales de plagioclasa de hasta 7 mm de diámetro, cuarzo de hasta 4 mm, anfíbol hasta 6 mm en clastos rosados de la muestra P120517-8B y en el resto alcanzan los 4 mm, y biotita menores a 2 mm. Los distintos bloques se diferencian, principalmente, en el color de sus matrices: hay grises, rojizos, anaranjados (muy alterados y oquerosos) y rosados. Además presenta un bajo contenido de brechas volcánicas dacíticas de color rosáceo y gris.

Las zonas más suroccidentales presentan bloques de hasta 1 m de diámetro, polimícticos y subangulosos y subredondeados (Figura 44 E y F). Los clastos corresponden a dacitas porfíricas de anfíbol y de biotita, en dos familias distintas: unos con cristales de plagioclasa de hasta 10 mm, cuarzo hasta 4 mm, y biotita y anfíbol menores a 3 mm, con matriz de color rojizo; y otros con plagioclasas de hasta 4 mm, cuarzo hasta 3 mm y biotitas menores a 1 mm, con matriz de color gris oscuro. También, se identificaron fragmentos de toba cristalina dacítica de color gris claro, vesicular y de muy baja densidad, con cristales de plagioclasa, cuarzo, anfíbol y biotita.

- **Matriz**

El lóbulo norte de ZN presenta, en su tamaño gránulos: fragmentos líticos volcánicos, porfíricos y afaníticos, de color gris claro, subangulosos, con cristales de plagioclasa, cuarzo, anfíbol y biotita; y fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso, con pequeños cristales de anfíbol. En el tamaño arena gruesa se ve la misma composición anterior, más fragmentos líticos rojizos a negros, subredondeados a redondeados; fragmentos líticos pardos y color crema, subredondeados, con fenocristales de anfíbol; y cristales separados de cuarzo y biotita. En el tamaño arena media se identificaron, además de los componentes de los otros tamaños, cristales de anfíbol y, en muy baja proporción, cristales de epidota.

La matriz de la zona nororiental del lóbulo sur de ZN presenta, en su tamaño gránulos, fragmento líticos volcánicos porfíricos, de color gris, subangulosos a angulosos, con pequeños cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita, algunos con fenocristales de anfíbol y otros de plagioclasa; fragmentos líticos de color pardo, subredondeados a redondeados, esféricos, con cristales de plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol; fragmentos silicificados de color blanco lechoso, con cristales de anfíbol. El tamaño arena gruesa, contiene los mismos componentes que en los gránulos, pero incluye fragmentos líticos de color pardo como agregados de distintos cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol; cristales de cuarzo translúcido; y pequeños cristales de yeso. Por último, en el tamaño

arena media se reconocieron, además de la composición de los tamaños anteriores, cristales libres de biotita y anfíbol.

En sectores medios del lóbulo sur de ZN, el tamaño gránulo de la matriz está compuesto por fragmentos líticos pardos, subredondeados a redondeados esféricos, con grandes cristales de anfíbol; fragmentos líticos de color gris claro, angulosos a subangulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol; fragmentos silicificados de color café lechoso, con la misma mineralogía anterior; y un bajo contenido de fragmentos rojizos subangulosos y subredondeados, con los mismos minerales. El tamaño arena gruesa incluye, además de los componentes anteriores, cristales separados de cuarzo y una baja proporción de anfíbol. El tamaño arena media posee igual composición que los otros tamaños, pero presenta también, cristales separados de anfíbol, biotita y epidota.

Finalmente, el sector más suroccidental, el tamaño gránulo de la matriz presenta un alto contenido de fragmentos líticos volcánicos de color grisáceo, angulosos a subangulosos, con cristales de plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol; además de fragmentos volcánicos de color rojizo, con la misma mineralogía anterior. Los granos de tamaño arena gruesa se diferencian en que contienen cristales de cuarzo translúcido y de biotita. En el tamaño arena media, además de los componentes anteriores, contiene cristales separados de anfíbol, y muy baja proporción de fragmentos silicificados de color blanco lechoso, subredondeados a redondeados.

Tabla 2 Resumen de las características principales de cada Facies definida para el depósito de avalancha al SW del volcán Llullaillaco, así como de la Zona Norte.

Zona	General	Estructuras	Litología Bloques	Litología Matriz
<b>Facies Zona en Altura</b>	Llanura entre 4850 y 5000 msnm, justo al sur del volcán Llullaillaco. Color pardo- amarillento.	33 <i>hummocks</i> y siete <i>ridges</i> , ambos N-S o NW. Bases circulares u ovaladas.	Bloques de hasta 2,5 m, polimícticos, subangulosos. Dacitas porfíricas de anfíbol y biotita.	Líticos volcánicos grises, pardos y rojizos, de subredondeados a angulosos. Líticos silicificados.
<b>Facies Lóbulo Norte</b>	Lóbulo al SW del volcán Llullaillaco, con elongación SW. Color pardo-anaranjado. Remonta a los Cerros Altos de Tocomar al SW.	14 <i>hummocks</i> , orientados N-S, NE y E-W. Cinco <i>ridges</i> NE y E-W. Bases circulares u ovaladas.	Proximal: hasta 1 m, alteración hidrotermal, brechas hidrotermales. Distal: 2 m, polimícticos. Dacitas porfíricas de anfíbol y biotita, bajo contenido tobas cristalinas en zonas distales.	Líticos volcánicos rojos, pardos y grises, subredondeados a subangulosos. Líticos silicificados.
<b>Facies Lóbulo Central</b>	Lóbulo con elongación E-W, al sur del cerro Silla. Color rojizo-anaranjado.	17 <i>hummocks</i> y cuatro <i>ridges</i> , orientados entre E-W y NE. Bases circulares y ladovaas.	Polimícticos. Dacitas porfíricas de anfíbol y de biotita. <b>Marcas de impacto.</b> Medio: hasta 1,5 m. Distal: hasta 3 m.	Líticos volcánicos rojizos, pardos y grises, subredondeados y subangulosos. Líticos silicificados.
<b>Facies Lóbulo Sur</b>	Lóbulo E-W, al norte de los Cerros del León. Color pardo-rojizo. Al W remonta al cerro Punta Negrillo.	28 <i>hummocks</i> y siete <i>ridges</i> , todos entre E-W y NW. Bases circulares y ovaladas.	Polimícticos. Dacitas porfíricas de biotita y de anfíbol. Tobas en el sector suroccidental. Alcanzan los 6 m. <b>Marcas de impacto.</b>	Líticos rojizos, pardos y grises, subredondeados y subangulosos. Líticos silicificados. <b>Al S del lóbulo: granos esféricos.</b>
<b>Zona Norte</b>	Dos lóbulos ubicados justo al W del volcán Llullaillaco. Color grisáceo.	No presenta estructuras de avalancha volcánica de detritos.	Polimícticos. Dacitas porfíricas de anfíbol y biotita. Algunas rocas piroclásticas. Proximal: hasta 3 m. Distal: 1 m.	Líticos volcánicos porfíricos y afaníticos, de <b>subredondeados a redondeados esféricos.</b> Líticos silicificados.

## 4.2 Análisis granulométrico del depósito

Con el fin de complementar en la caracterización de las facies definidas en el capítulo anterior, se realizó un análisis granulométrico, en el que se separaron las muestras de matriz en ocho tamaños distintos, desde  $\phi=-2$  (4 mm) hasta  $\phi=4$  (0.063 mm), según la escala de Udden-Wentworth (Wentworth, 1922). Este análisis se hizo por separado para cada una de las facies, además de la Zona Norte (Figura 45, Tabla 3), también para aportar en su descripción.

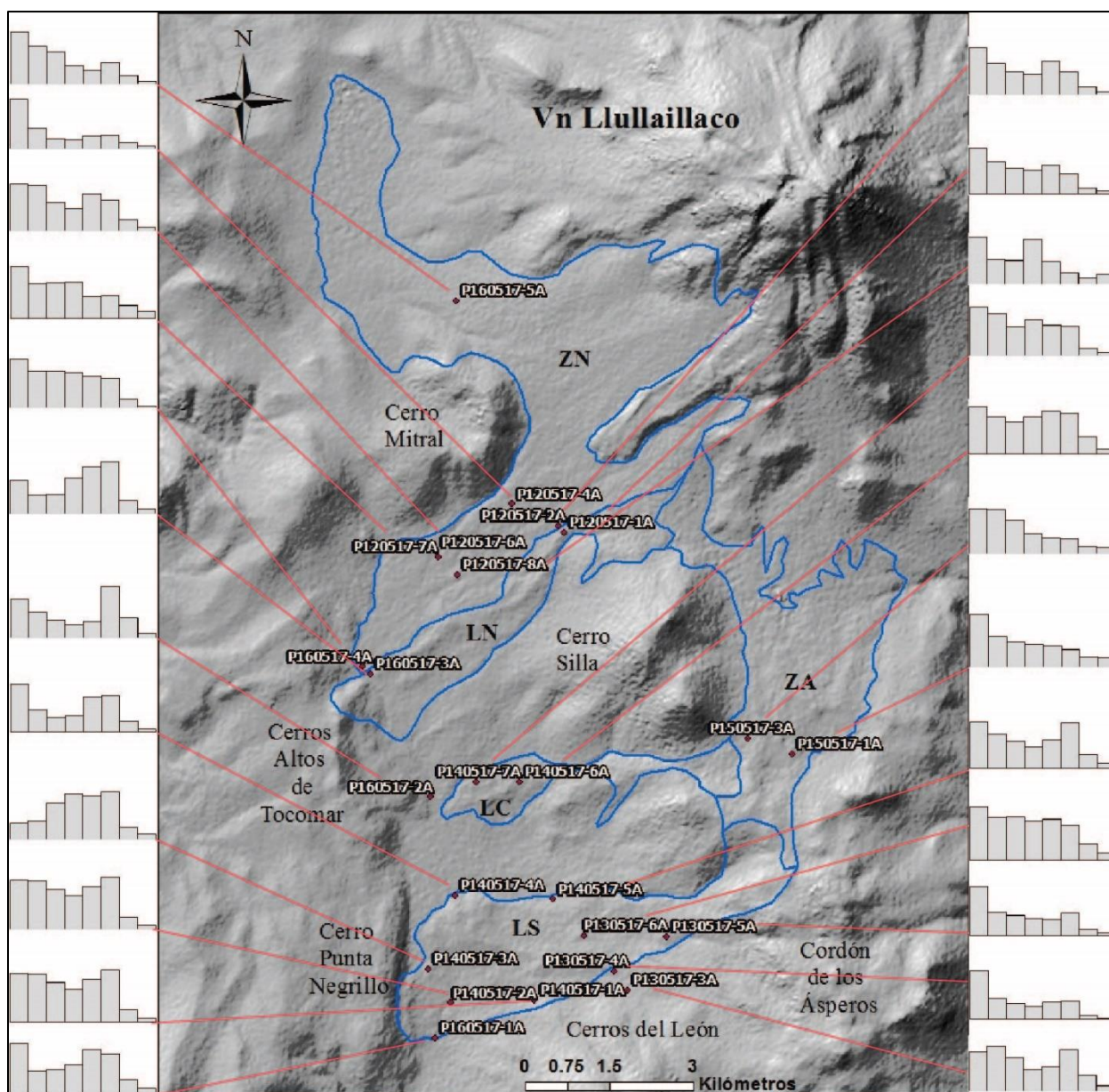


Figura 45 Mapa indicando la variación porcentual del peso de cada tamaño de grano para cada muestra. Los gráficos van, de izquierda a derecha, desde  $\phi -2$  hasta  $\phi 4$  según la escala Udden-Wentworth.



## 4.2.1 Caracterización granulométrica de las facies

### 4.2.1.1 Facies Zona en Altura (ZA)

En esta facies se tomaron dos muestras de matriz, ambas en el sector suroeste. Las dos muestran porcentajes menores, conforme más pequeño es el tamaño de grano. La muestra P150517-3A (sector medio-occidental de ZA) presenta altos porcentajes para los guijarros y los gránulos (24% y 23% respectivamente), un poco menores para la arena muy gruesa (18%), entre la arena gruesa y la arena fina, posee valores medios entre 11% y 8%, mientras que para la arena muy fina y los finos poseen muy bajos porcentajes, con 4% y 3%, respectivamente. Por su parte, la muestra más al sur, P150517-1A (sector medio-oriental de ZA), indica un mayor porcentaje para guijarros (28%), menores para gránulos (16%), porcentajes similares entre arena muy gruesa y arena fina (entre 13% y 9%), y bajos valores para arena muy fina y los finos (5%, ambos) (Figura 46).

### 4.2.1.2 Facies Lóbulo Norte (LN)

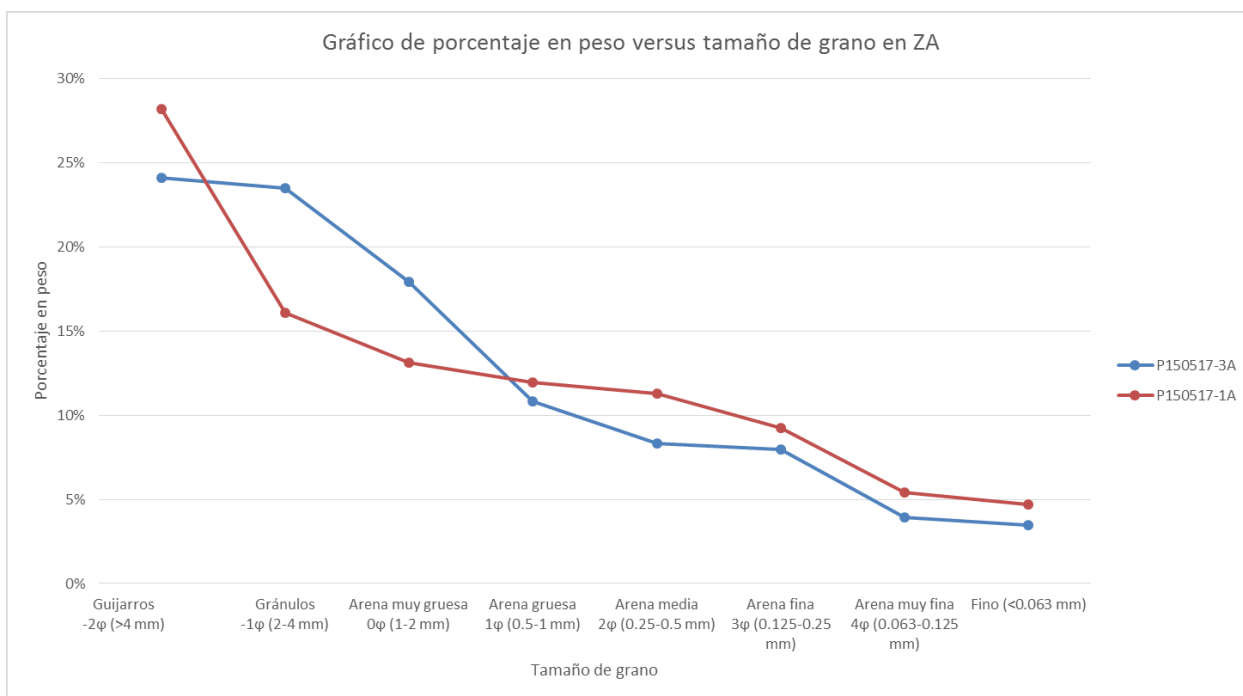


Figura 46 Gráfico de porcentaje en peso versus tamaño de grano para las muestras obtenidas en la ZA

En este lóbulo se pudieron tomar dos muestras de matriz: una en un sector proximal y otra en uno distal. La muestra proximal (P120517-1A) posee altos porcentajes de guijarros y de arena gruesa (25% y 24%, respectivamente), valores medios de arena media, arena gruesa y gránulos, entre 12% y 13%, y bajos porcentajes de menores a arena fina (de 3% a 6%). La muestra distal (P160517-3A) muestra altos valores de arena media y arena fina (21% y 23%, respectivamente), porcentajes medios de guijarros y arena gruesa

(15% y 16%), y un bajo contenido de gránulos (8%), arena muy gruesa (9%). Arena muy fina (6%) y de finos (2%) (Figura 47).

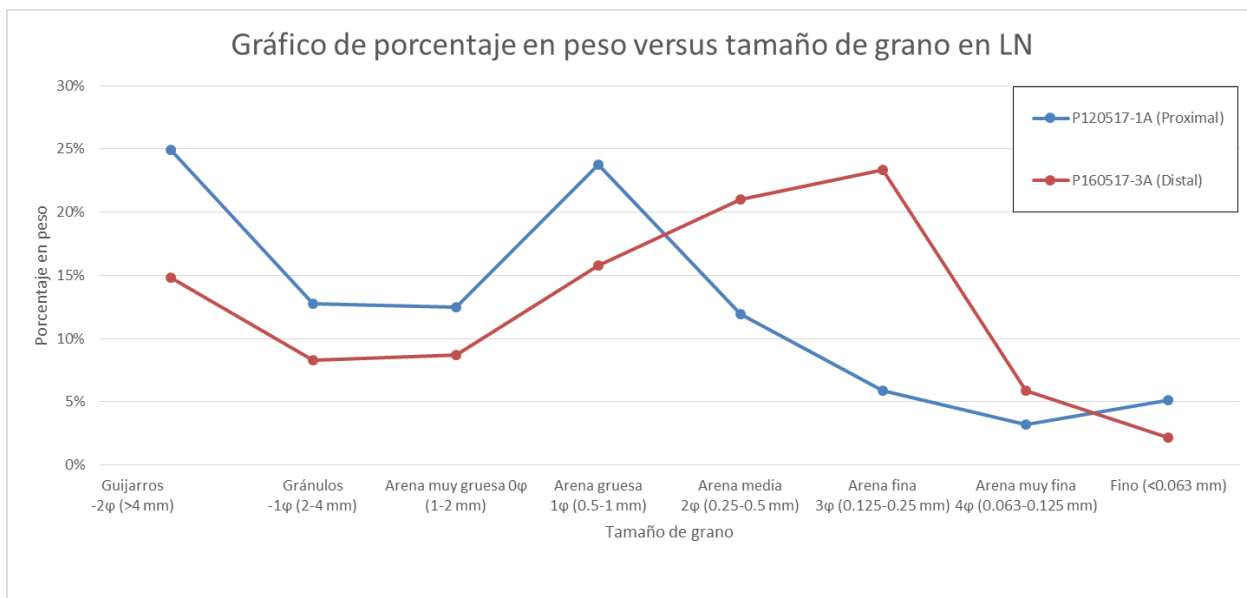


Figura 47 Gráfico de porcentaje en peso versus tamaño de grano para las muestras obtenidas en LN

#### 4.2.1.3 Facies Lóbulo Central (LC)

Se analizaron tres muestras para esta facies, una en zona media (P140517-6A), una en zona distal (P140517-7A) y una en la ladera este de los cerros Altos de Tocomar, al oeste del depósito de avalancha. Las muestras en sectores medio muestran bajas variaciones entre los tamaños guijarro y arena fina, entre 12% y 18%, con alzas para los guijarros (18%), y para la arena media y fina (ambos con 16%), mientras que muestra bajos valores para la arena muy fina (7%) y muy bajos para los finos (2%). En zonas distales del lóbulo se observa un alto contenido de Guijarros y gránulos (22% y 19%), y valores medios entre la arena muy gruesa y la arena fina, entre 13% y 16%, con un mayor porcentaje de arena media (16%), mientras que la arena muy fina y los finos muestran muy bajos números (3% y 1%). La muestra al oeste del depósito muestra un muy alto contenido de arena fina (28%) y de guijarros (21%), valores medios para el resto de tamaños mayores a arena muy fina, con un máximo para los gránulos (14%) y una mínima para la arena gruesa (7%), y un muy bajo contenido de finos (2%) (Figura 48).

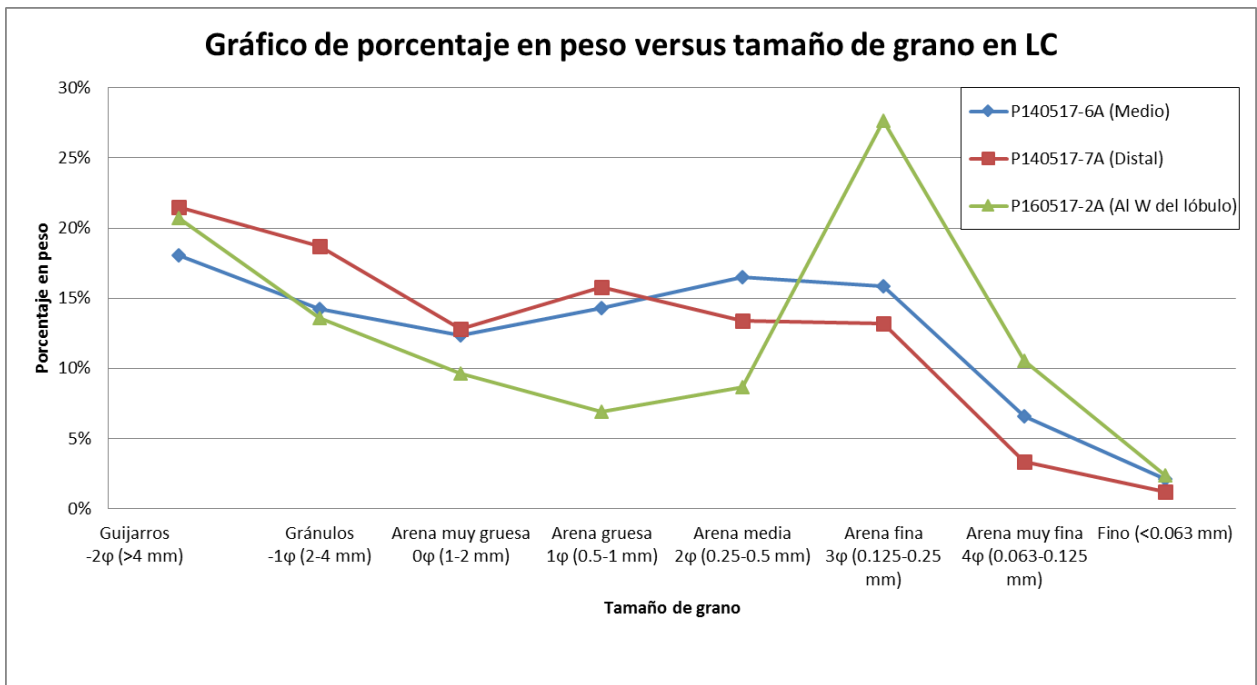


Figura 48 Gráfico de porcentaje en peso versus tamaño de grano para las muestras obtenidas en LC

#### 4.2.1.4 Facies Lóbulo Sur (LS)

La cantidad de muestras obtenidas para esta facies posibilita la división del análisis en tres partes: un sector proximal (oriental), uno medio y uno distal (occidental). Las dos muestras ubicadas en la zona proximal (P130517-4A y P130517-5A) poseen porcentajes muy similares en todos sus tamaños, con altos porcentajes de guijarros (35% y 31%), valores medios desde tamaño gránulo hasta arena fina, entre 11% y 15%, mientras que los de arena muy fina y los finos, muestran bajos porcentajes, entre 1% y 4%. Existe una muestra (P130517-3A) al sur de este sector, que muestra bajas variaciones en los contenidos de tamaño de sus grano, entre 11% y 20% desde arena fina hasta guijarros, con un alza en guijarros (17%), arena fina (18%) y gránulos (20%), y menores valores para arena muy fina (7%) y finos (2%). En el sector medio, el borde norte y el sur muestran características muy similares en cuanto a los tamaños de sus granos, con altos porcentajes de guijarros (21% y 22%) y de arena fina (20% y 21%), entre arena media hasta gránulos los porcentajes varían entre 11% y 15%, 4%-6% de arena muy fina y entre 1% y 2% de finos; por otra parte, la muestra en el centro del lóbulo indica pocas variaciones entre tamaño arena fina hasta gránulos, variando entre 13% y 16%, mientras que los contenidos de guijarros son un poco mayores, con 19%, arena muy fina con 6% y finos con 3%. Finalmente, para la zona más distal, las muestras sur y norte (P160517-1A y P140517-4A) también presentan características similares, con altos porcentajes de guijarros (26% y 22%), así como con los de arena fina y media (varían entre 18% y 19%), mientras que los tamaños entre arena gruesa y gránulos varían entre 9% y 13%, 6% de arena muy fina y 1% y 2% de finos; por otra parte, de las dos muestras tomadas en el centro del lóbulo, una de ellas (P140517-2A) se ubica más cercana al borde sur, entrega porcentajes relativamente similares desde arena fina hasta guijarros, variado entre 12% y 18%, con un máximo de 18% para la arena fina, 4% de arena muy fina y 1% de finos; y finalmente, la muestra (P140517-3A), justo en el medio del frente del lóbulo, posee bajos porcentajes de guijarros

y gránulos (7% y 8%), medios a altos para tamaños desde arena fina a muy gruesa (entre 16% y 21%), y bajos de arena muy fina (5%) y finos (2%) (Figura 49).

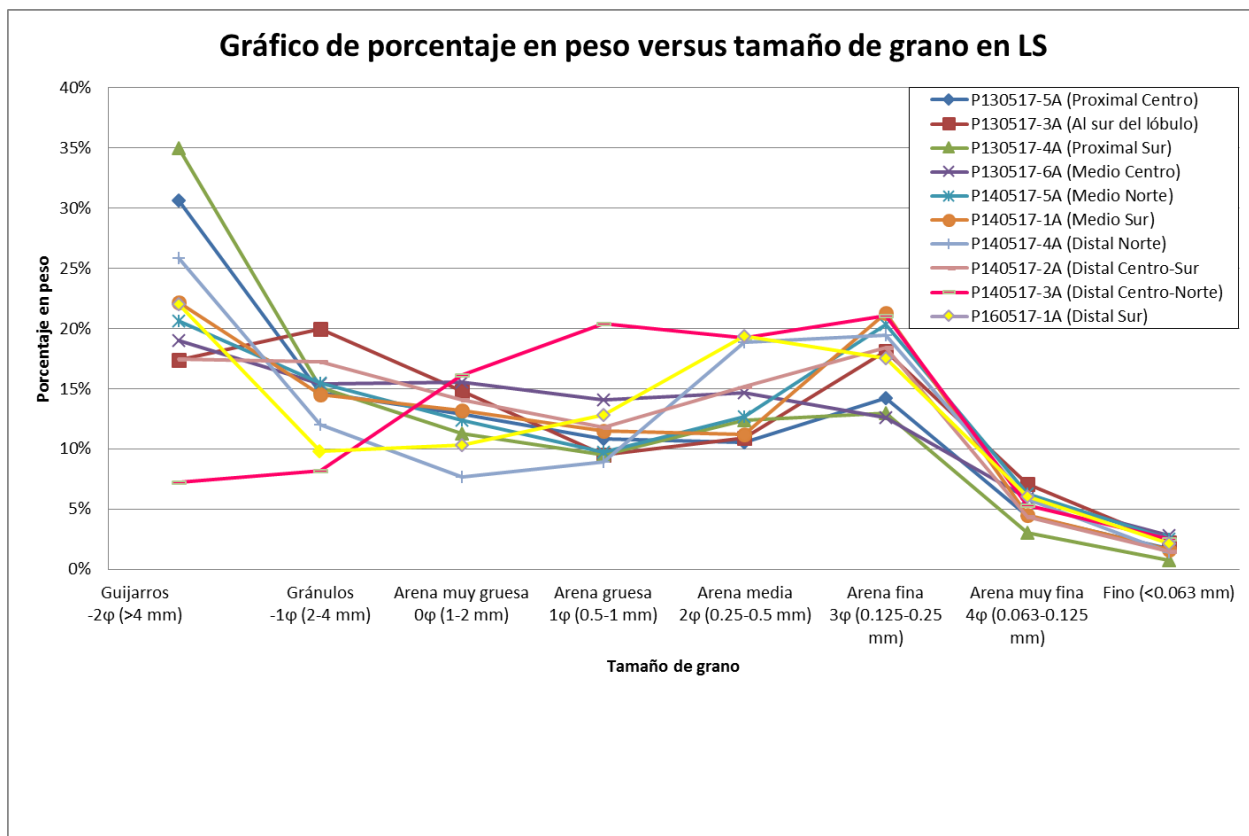


Figura 49 Gráfico de porcentaje en peso versus tamaño de grano para las muestras obtenidas en la LS

#### 4.2.2 Caracterización granulométrica de la Zona Norte (ZN)

Se obtuvieron seis muestras para esta zona: una del lóbulo norte y cinco del lóbulo sur. En el norte, la muestra P60517-5A fue tomada en una zona media del lóbulo, arrojando resultados de altos porcentajes de granos gruesos, con 28% de tamaño guijarros, 20% de gránulos, y 17% de arena muy gruesa, mientras que desde arena gruesa a arena fina, varían entre 7% y 11%, y la arena muy fina y los finos tienen muy bajos porcentajes (5% y 2%, respectivamente). El lóbulo sur se puede dividir en tres partes: su zona más proximal posee variaciones laterales significativas, ya que en su borde NW (muestra P120517-4A) presenta muy elevados porcentajes de grano grueso, con un 39% de guijarros y 16% de gránulos, los tamaños entre arena muy gruesa y arena fina varían entre 8% y 11%, y la arena muy fina y los finos muestran bajos valores, 5% y 2%, respectivamente; mientras que en su borde SE (muestra P120517-2A), se presentan altos valores de granos gruesos, con 25% de guijarros y 17% de gránulos, valores medios entre arena muy gruesa y arena fina, entre 11% y 14%, con un alza en la arena media de 16%, y muy bajos porcentajes de arena fina (3%) y de finos (2%). En su zona media, se observan pequeñas variaciones laterales: en el SE (P120517-8A), se presentan altos contenidos de granos tamaño guijarro (25%), desde gránulos hasta arena muestran valores medios, entre 11% y 16%, con un alza en la arena media (18%), y los tamaño menores muestran

valores de 4% (arena muy fina) y 2% (finos); en el centro (P120517-7A), se observan porcentajes altos de tamaño guijarro (23%), 16% para gránulos, arena muy gruesa y gruesa, 10% de arena media y fina, y sólo 6% de arena muy fina y 3% de finos; y en NW, se muestran altos porcentajes de guijarros y gránulos, con 21% y 20%, respectivamente, valores medios entre arena muy gruesa y arena fina, desde 10% hasta 16%, con un alza para la arena media (16%), y bajo contenido de arena muy fina (5%) y de finos (1%). Finalmente, en su zona más distal, la muestra P160517-4A contiene una alta concentración de guijarros (21%), una equiparación de los porcentajes desde arena fina a gránulos (entre 13% y 16%), y muy bajo de arena muy fina (4%) y de finos (1%) (Figura 50).

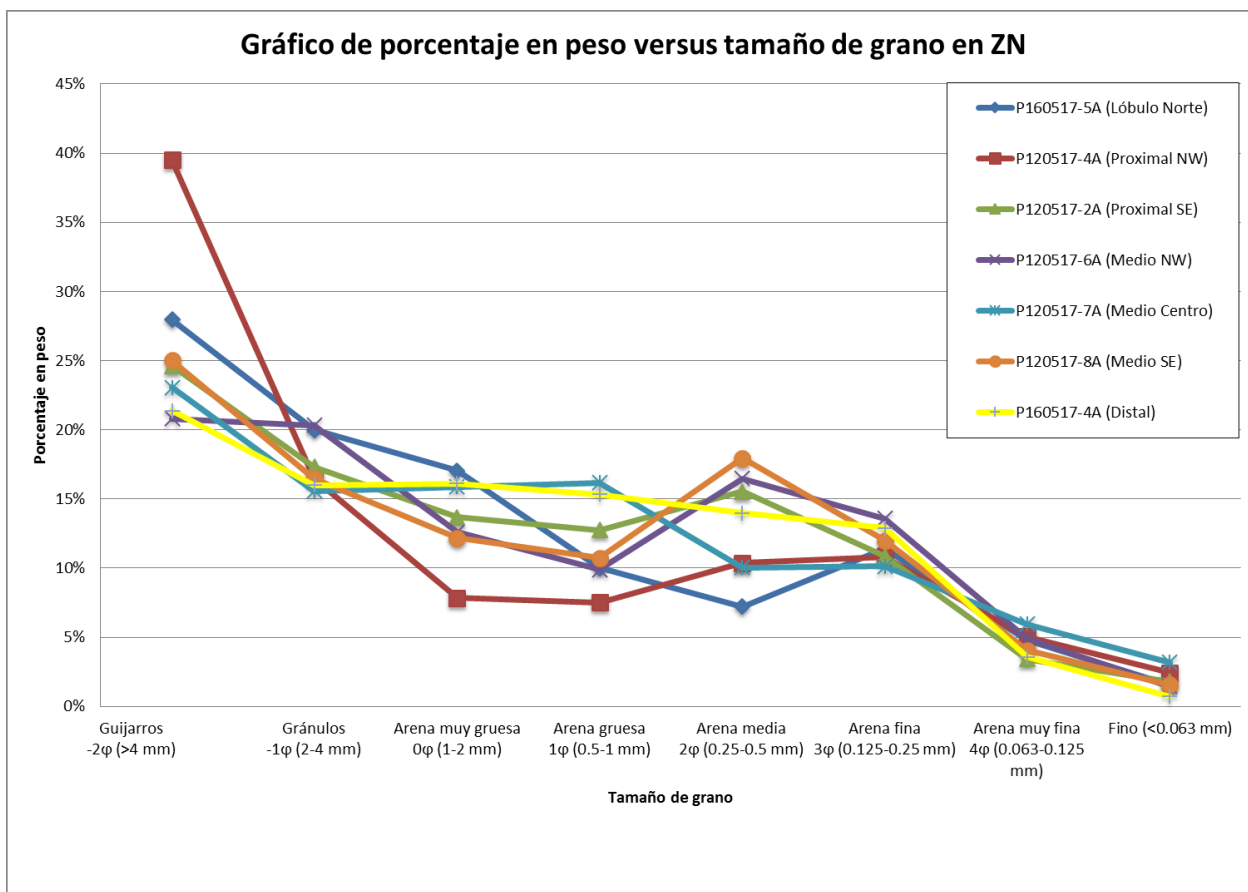


Figura 50 Gráfico de porcentaje en peso versus tamaño de grano para las muestras obtenidas en la ZN

Muestra	Gujarros -2φ (>4 mm)	Gránulos -1φ (2-4 mm)	Arena muy gruesa		Arena gruesa	Arena media		Arena fina	Arena muy fina		Fino (<0.063 mm)
			0φ (1-2 mm)	1φ (0.5-1 mm)	2φ (0.25-0.5 mm)	3φ (0.125-0.25 mm)	4φ (0.063-0.125 mm)				
Depósito proximal en altura											
P150517-3A	24%	23%	18%	11%	8%	8%	8%	4%	3%		
P150517-1A	28%	16%	13%	12%	11%	9%	5%				
Depósito al norte del Lóbulo Norte											
P160517-5A	28%	20%	17%	10%	7%	11%	5%	2%			
P120517-4A	39%	16%	8%	8%	10%	11%	5%	2%			
P120517-2A	25%	17%	14%	13%	16%	11%	3%	2%			
P120517-6A	21%	20%	13%	10%	16%	14%	5%	1%			
P120517-7A	23%	16%	16%	16%	10%	10%	6%	3%			
P120517-8A	25%	16%	12%	11%	18%	12%	4%	2%			
P160517-4A	21%	16%	16%	15%	14%	13%	4%	1%			
Lóbulo Norte											
P120517-1A	25%	13%	12%	24%	12%	6%	3%	5%			
P160517-3A	15%	8%	9%	16%	21%	23%	6%	2%			
Lóbulo Central											
P140517-6A	18%	14%	12%	14%	16%	16%	7%	2%			
P140517-7A	22%	19%	13%	16%	13%	13%	3%	1%			
P160517-2A	21%	14%	10%	7%	9%	28%	11%	2%			
Lóbulo Sur											
P130517-5A	31%	15%	13%	11%	11%	14%	4%	2%			
P130517-3A	17%	20%	15%	10%	11%	18%	7%	2%			
P130517-4A	35%	15%	11%	10%	12%	13%	3%	1%			
P130517-6A	19%	15%	16%	14%	15%	13%	6%	3%			
P140517-5A	21%	15%	12%	10%	13%	20%	6%	2%			
P140517-1A	22%	15%	13%	11%	11%	21%	4%	2%			
P140517-4A	26%	12%	8%	9%	19%	19%	6%	1%			
P140517-2A	17%	17%	14%	12%	15%	18%	4%	1%			
P140517-3A	7%	8%	16%	20%	19%	21%	5%	2%			
P160517-1A	22%	10%	10%	13%	19%	18%	6%	2%			

Tabla 3 Porcentajes en peso para los distintos tamaños de grano de las muestras de matriz tamizadas. Ordenadas desde la muestra más cercana al volcán Llullaillaco para cada sector de la zona de estudio

### 4.3 Parámetros físicos

Para comprender la dinámica de la avalancha volcánica que generó los depósitos estudiados, se calcularon los siguientes parámetros físicos: velocidad mínima, velocidad máxima, coeficiente de fricción, distancia de viaje excesiva y el ratio  $A/V^{2/3}$ . Para estos cálculos se consideraron tres perfiles, que fueron trazados en cada uno de los tres lóbulos que componen el depósito (Figura 51).

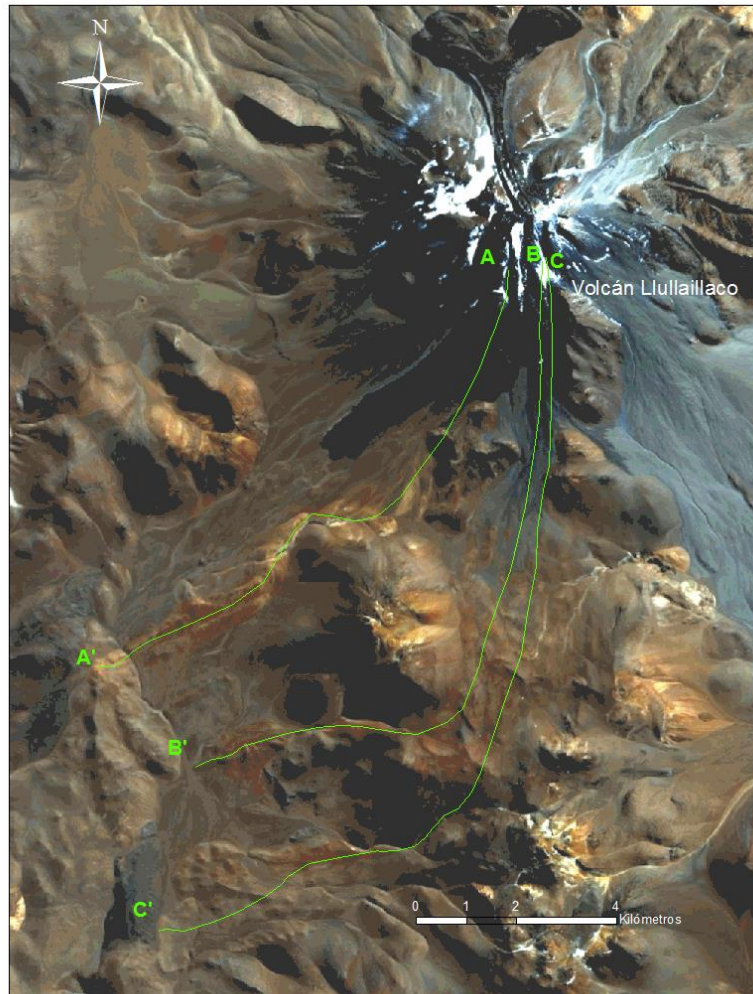


Figura 51 Imagen satelital Aster. En color verde se indican las trazas de los perfiles AA', BB' y CC', para los cuales se calcularon los parámetros físicos.

Para cada uno de los perfiles trazados a lo largo de los lóbulos principales del depósito, se generó un perfil de elevación que grafica la distancia recorrida por el material versus la altura de descenso inferida. El perfil AA' corresponde al lóbulo norte (Figura 52), el perfil BB' corresponde al lóbulo central (Figura 53) y el perfil CC' al lóbulo sur (Figura 54). Con estos perfiles se obtuvieron los valores necesarios para calcular los parámetros físicos de cada uno: distancia total recorrida, altura total descendida y altura ganada (al remontar un obstáculo). Hay que considerar que como el lóbulo central no remonta un cerro al final de su recorrido, no se pudo obtener este valor desde el perfil de elevación para este lóbulo.

### 4.3.1.1 Perfil AA'

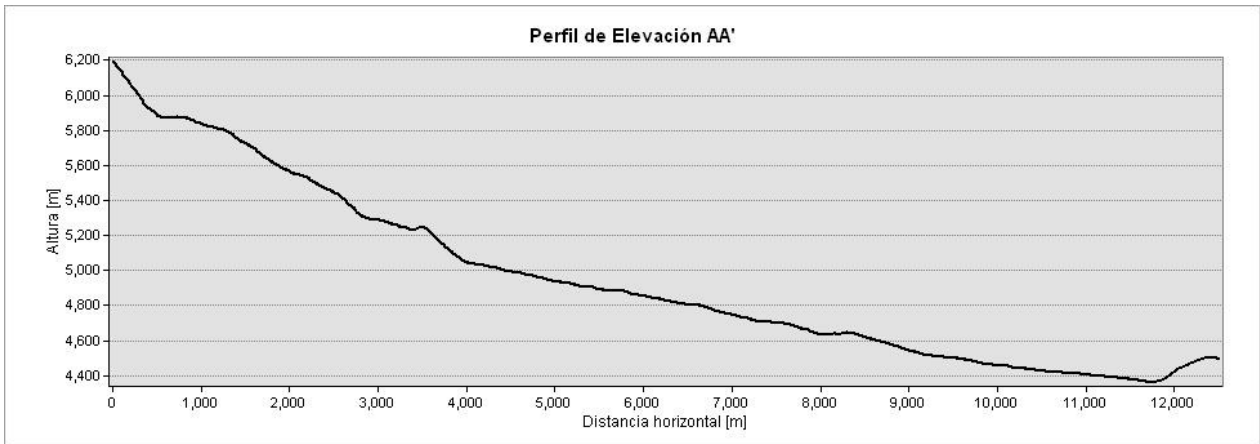


Figura 52 Perfil de elevación AA', correspondiente al lóbulo norte del depósito

- Distancia total recorrida (L) = 12500 m
- Altura total descendida (H) = 1829 m
- Altura total ascendida (h) = 128 m

### 4.3.1.2 Perfil BB'

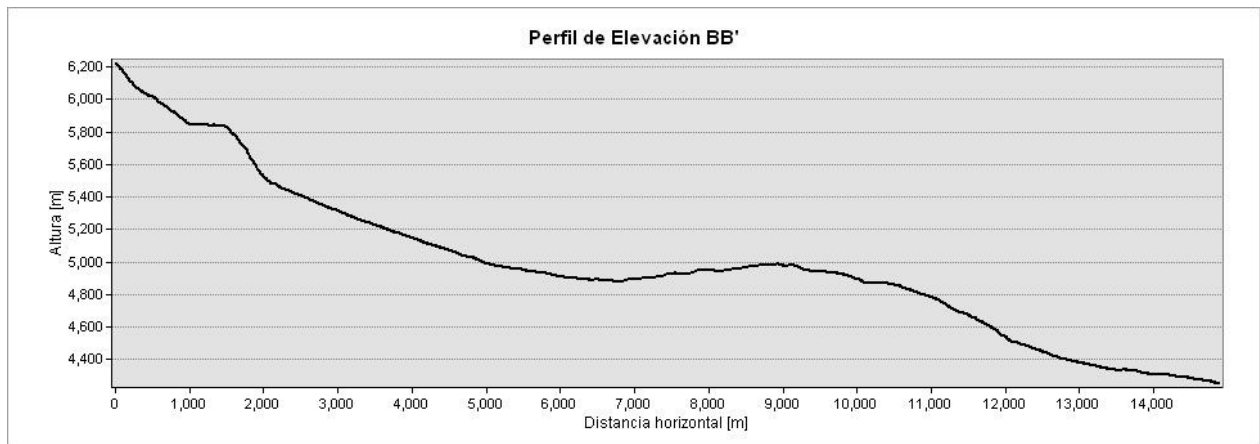


Figura 53 Perfil de elevación BB', correspondiente al lóbulo central del depósito

- Distancia total recorrida (L) = 14800 m
- Altura total descendida (H) = 1938 m



### 4.3.1.3 Perfil CC'

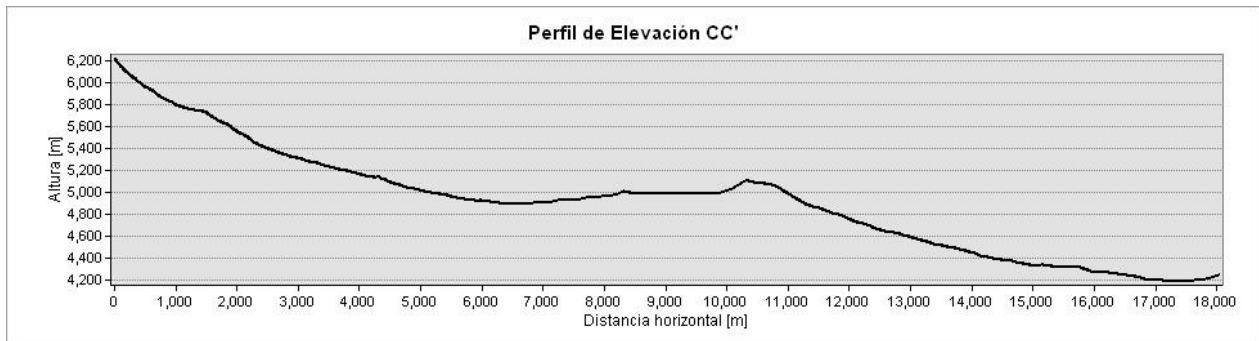


Figura 54 Perfil de elevación CC', correspondiente al lóbulo sur del depósito

- Distancia total recorrida (L) = 18000 m
- Altura total descendida (H) = 2042 m
- Altura total ascendida (h) = 53 m

### 4.3.2 Velocidad mínima

La velocidad mínima ( $v_{\min}$ ) se calculó con la ecuación (1) para los lóbulos norte y sur, y el resultado entrega un valor para el punto en que fue determinada. Con los datos de altura ascendida obtenidos, los resultados son:

- Perfil AA':

$$v_{\min} = \sqrt{2 * 9.8 * 128} = 50.09 \text{ m/s} = 180.32 \text{ km/h}$$

- Perfil BB':

$$v_{\min} = \sqrt{2 * 9.8 * 53} = 32.23 \text{ m/s} = 116.03 \text{ km/h}$$

### 4.3.3 Velocidad máxima

La velocidad ( $v_{\max}$ ) mínima se calculó con las ecuaciones (1) y (3), que al igual que la velocidad mínima, indica valores de velocidad para el punto en que se calcula. Con los datos de altura ascendida y altura total descendida obtenidos, los resultados son:

- Perfil AA':

$$F = 100 \left( 1 - \sqrt{\frac{128}{1829}} \right) = 73.55$$

$$v_{max} = 10 \sqrt{\frac{2 * 9.8 * 128}{100 - 73.55}} = 97.39 \text{ m/s} = 350.6 \text{ km/h}$$

- Perfil BB':

$$F = 100 \left( 1 - \sqrt{\frac{53}{2042}} \right) = 83.89$$

$$v_{max} = 10 \sqrt{\frac{2 * 9.8 * 53}{100 - 83.89}} = 80.3 \text{ m/s} = 289.08 \text{ km/h}$$

#### 4.3.4 Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción se calculó con la ecuación (1), y con los datos de altura total descendida y distancia total recorrida obtenidos, los resultados son:

- Perfil AA':

$$\sigma = \frac{H}{L} = \frac{1829}{12500} = 0.146$$

- Perfil BB':

$$\sigma = \frac{H}{L} = \frac{1938}{14800} = 0.130$$

- Perfil CC':

$$\sigma = \frac{H}{L} = \frac{2042}{18000} = 0.113$$

### 4.3.5 Distancia de viaje excesiva

La distancia de viaje excesiva ( $L_e$ ) se calculó con la ecuación (1), y con los datos de altura total descendida y distancia total recorrida obtenidos, los resultados son:

- Perfil AA':

$$L_e = 12500 - \frac{1829}{0.62} = 9550 \text{ m}$$

- Perfil BB':

$$L_e = 14800 - \frac{1938}{0.62} = 11674.19 \text{ m}$$

- Perfil CC':

$$L_e = 18000 - \frac{2042}{0.62} = 14706.45 \text{ m}$$

### 4.3.6 Ratio $A/V^{2/3}$

El ratio  $A/V^{2/3}$  se calculó para el depósito completo, y con los datos de área y volumen total obtenidos, el resultado es:

$$\frac{A}{V^{2/3}} = \frac{31.5}{0.5^{2/3}} = 50$$

# CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN

## 5.1 Depósito de la avalancha

### 5.1.1 Límites del depósito

Los depósitos de avalanchas volcánicas poseen características típicas, tales como morfologías lobulares, presencia de *hummocks*, *ridges* y *levées*, bloques de grandes dimensiones, entre otros (van Wyk de Vries y Davies, 2015). La definición de los límites de la avalancha al SW del volcán Llullaillaco se realizó siguiendo dichos parámetros.

El depósito consta de tres lóbulos principales que provienen de una zona a mayor altura hacia el este. Dentro del depósito de avalancha, no se consideró la zona ubicada justo al oeste del volcán Llullaillaco (ZN), ya que sus depósitos poseen características diferentes al resto de la zona de estudio, con una matriz compuesta por un alto contenido de granos subredondeados a redondeados, desde subesféricos a esféricos, y ausencia de estructuras de avalanchas volcánicas, por lo que se determinó que se trata de un depósito diferente, posiblemente producto de procesos aluviales o laháricos. Tampoco fue considerado el sector al norte de la zona en altura, en la ladera sur del volcán, basado en la descripción de Richards y Villeneuve en 2004, quienes lo catalogaron como afloramientos de lavas andesíticas y traqui-dacíticas del cuaternario, descartando la presencia de bloques toeva, como los describieron Gardeweg et al., 1993.

Se propone que el lóbulo sur proviene desde el volcán Llullaillaco, en lugar de los cerros del León o el Cordón de los Ásperos, debido a la presencia de estructuras de avalancha volcánica con características similares a las encontradas en la zona en altura, como largos *ridges* longitudinales y oblicuos a la elongación del lóbulo, y *hummocks* de base circular y ovalada. También, se encontraron los mismos componentes en ambos sectores, tales como dacitas porfíricas de anfíbol y de biotita de colores grises y rojizos, y matriz con clastos volcánicos rojizos y grises, subangulosos; a diferencia de la ladera norte de los cerros del León los cuales presentan andesitas y dacitas, porfíricas y afaníticas, de biotita, mientras que la matriz, además de componentes similares a las de la avalancha, contiene granos redondeados esféricos, probablemente asociados a eventos aluviales; así como un mucho menor porcentaje de granos tamaño gránulo (17% contra 31-35% de estos sectores del lóbulo) y un alto porcentaje de arena fina y muy fina (18% y 7%, respectivamente). Un último antecedente es la edad determinada por Gardeweg et al., en 1993, en biotitas de un bloque encontrado en la zona frontal del lóbulo sur, con el método K/Ar, la cual indica una edad de  $0.4 \pm 0.3$  Ma, lo que no se podría asociar a ninguno de los volcanes Miocenos del lugar, pero sí a los depósitos volcánicos del mismo volcán Llullaillaco, que en su ladera sur se ha determinado una edad de  $0.401 \pm 0.006$  Ma (Richards y Villeneuve, 2004) Esto último indicaría que el bloque datado proviene directamente desde el material colapsado del volcán Llullaillaco y arrastrado hasta ese punto por la avalancha de detritos.

Un caso diferente se presenta en la ladera este de los cerros Altos de Tocomar, justo frente al lóbulo central, donde se presenta un depósito clástico con componentes similares a los del lóbulo principal, tales como dacitas porfíricas de biotita y de anfíbol, de colores

gris y rojizo, subredondeados y subangulosos, con algunos grises con formas prismáticas. Esto puede deberse a uno de dos posibles casos: los cerros Altos de Tocomar corresponden a la zona más distal del lóbulo norte de la avalancha, que se desvió hacia el sur en su trayectoria; o el lóbulo central, inicialmente, colisionó con los cerros Altos de Tocomar, pero parte del depósito de avalancha fue erosionado posteriormente. En terreno no se encontraron evidencias de erosión en esta zona, por lo que la segunda opción perdería fuerza, sin embargo, no se cuenta con los datos suficientes como para asegurar una continuidad desde el lóbulo norte hasta este punto.

Por todo lo anterior, se propone que el depósito delimitado en este trabajo, se asociaría a un único evento de avalancha volcánica de detritos y provendría del colapso del volcán Lullailaco.

### **5.1.2 Distribución y orientación de estructuras**

Dentro de las estructuras típicas que se pueden encontrar en los depósitos de avalancha, están los *hummocks* y *ridges*, formados por extensión y compresión del material de la avalancha, durante su transporte (Paguican et al., 2014a).

Las estructuras identificadas se concentran en las zonas de menor pendiente, inferiores a 20°. Los sectores de mayor pendiente, ubicados principalmente en la transición entre la Zona de Altura y los tres lóbulos principales, presentan un depósito con menor espesor, y carente de estructuras. Se propone que esto podría deberse a que, al aumentar la pendiente, sólo se depositaría el material basal de la avalancha (ver capítulo 5.5), mientras que el resto del material, en el que se generarían las estructuras, continúa su transporte para depositarse en zonas con pendientes.

En general, las estructuras en este depósito poseen una base circular u ovalada, con superficies suaves y dirección, preferentemente, similar a la del flujo, aunque en la Zona de Altura hay un gran porcentaje de ellos que se presentan oblicuos. Los *hummocks* y *ridges* con orientación similar a la del flujo se generarían por el cizalle del material (Clavero et al., 2002), mientras que la presencia de estructuras oblicuas al flujo se deberían a la presencia de obstáculos en la paleotopografía y cambios a regímenes de compresión (Paguican et al., 2014a).

Existe una baja concentración de estructuras en zonas cercanas a la ladera sur del volcán Lullailaco, es decir, de donde proviene la avalancha, lo cual podría indicar una probable alta fragmentación del material en etapas iniciales de la avalancha, al cambiar la pendiente tras descender por la ladera del volcán (Clavero et al., 2004).

### **5.1.3 Textura, distribución y litología de los bloques**

En general, el material presente en este tipo de depósitos se encuentra altamente brechizado, con predominancia de bloques subangulosos y con una pobre selección, aunque sí siguen ciertos parámetros de distribución a lo largo del depósito (van Wyk de Vries y Delcamp, 2015).

Los bloques de mayor tamaño encontrados en el área de estudio, se concentran en las cimas y alrededores de *hummocks* y *ridges*. Lo anterior podría tener relación con la brechización del material competente proveniente directamente del volcán, el cual finalmente generaría dichas estructuras (Dufresne y Davies, 2009), así como con el mecanismo de formación de hummocks longitudinales propuesto por algunos autores (Clavero et al., 2002; Paguican et al., 2014a), debido al cizalle generado durante el transporte, lo cual provocaría una mayor brechización del material en las zonas entre las estructuras, con una disminución del tamaño máximo de grano. También, predominan los grandes bloques en superficies de menor pendiente, en general, bajo los 20°. Esto se explicaría, al igual que en el caso de las estructuras, con la depositación del material basal de la avalancha en zonas de alta pendiente (ver capítulo 5.5), y la continuación del transporte del material más superficial del flujo.

La presencia de marcas de impacto en grandes bloques de los lóbulos central y sur, evidencian la vibración y colisión durante el transporte y cómo interactuaban entre ellos, sin una gran componente de cizalle y con, al menos, un pequeño movimiento diferencial dentro del flujo, como proponen Clavero et al., 2002, para la avalancha del volcán Parinacota. Las marcas de impacto encontradas son un antecedente más para asociar los depósitos a una avalancha volcánica, ya que además de su presencia en otras avalanchas volcánicas, difieren de las marcas de abrasión y de fricción que aparecen en los depósitos de flujos piroclásticos, y que indican un movimiento deslizante de los bloques (Grunewald et al., 2000).

Los bloques piroclásticos encontrados en zonas distales de los lóbulos Norte y Sur, así como su ausencia en el resto del depósito, podría indicar que la avalancha incorporó este material desde el sustrato durante su transporte. En el lóbulo Norte puede asociarse a la presencia de ignimbritas datadas en  $9,88 \pm 0,12$  Ma en los Cerros Altos de Tocomar, al oeste del lóbulo (Villa et al., (en preparación)), mientras que en el lóbulo Sur, pueden haber sido clastos de tobas pertenecientes al sustrato.

#### **5.1.4 Variaciones en la granulometría**

No se poseen datos suficientes para conocer completamente el comportamiento de la matriz de la avalancha, sin embargo, pareciera presentar un ordenamiento longitudinal con respecto a la granulometría de su matriz, para cada uno de los lóbulos que la conforman.

Los lóbulos norte y sur presentan, conforme al sentido de su avance, una disminución notoria del porcentaje en peso de los granos de mayor tamaño (desde guijarros hasta arena gruesa), y un aumento de los más pequeños (desde arena media hasta arena muy fina). Se propone que lo anterior podría ser provocado por el mayor grado de fracturamiento mecánico producto del transporte del material, sin embargo, esto no se cumple para los granos más finos (limos y arcillas) los cuales aumentan su concentración hacia el frente del lóbulo norte, y se mantienen constantes a lo largo del lóbulo sur. Además, la colisión del material contra los cerros preexistentes, generaría un régimen compresivo, el que aportaría aún más en el fracturamiento mecánico en las zonas distales.

En el lóbulo central se observa un ligero aumento de la proporción de granos de mayor tamaño desde sectores medios a distales, mientras que los clastos más finos disminuyen. Esto podría explicarse con un mayor grado de deformación en niveles medios del depósito, en comparación con sectores distales, asociado a que en zonas medias hay mayor compresión, al haber fuertes cambios de pendiente, mientras que en zonas distales el material se detiene sólo por pérdida de energía y bajo un régimen extensivo, durante la dispersión de la avalancha en zonas de baja pendiente.

## **5.2 Parámetros Físicos**

Es importante mencionar que los parámetros físicos calculados en este trabajo, contienen variadas fuentes de error, tanto teóricas como metodológicas, por los que los valores entregados son sólo aproximaciones y sirven para comparar con otros depósitos de grandes remociones en masa.

Como a se mencionó, uno de los limitantes de las ecuaciones utilizadas es el lugar desde el que se mide la distancia máxima alcanzada (L), así como la altura máxima descendida (H). Teóricamente, ambas deberían medirse desde el centro de masa del material colapsado (en el edificio volcánico), hasta el centro de masa del depósito (Hayashi y Self, 1992). En este estudio, se midió L desde un punto medio de la ladera del volcán hasta el punto más alejado a éste, alcanzado por la avalancha; mientras que H se midió desde el mismo punto medio de la ladera, hasta el punto más bajo alcanzado por el depósito. Esto influye directamente en el cálculo del coeficiente de fricción, el cual se vería subestimado, lo que convierte al valor calculado en un límite inferior.

Otro supuesto en las fórmulas utilizadas, es que se considera a todo el material como un único objeto puntual, lo cual no toma en cuenta la turbulencia, los cizalles internos, las colisiones, entre otros efectos que pueden modificar la dinámica de la avalancha (Hayashi y Self, 1992; Ui, 1983; Francis y Baker, 1977)

Finalmente, el método utilizado para el cálculo de los distintos espesores del depósito, conlleva necesariamente a errores, ya que se ignoran las irregularidades que podrían estar presentes en la paleotopografía, bajo la avalancha, además, no se consideran las variaciones laterales que pueden haber en los espesores. Todo esto, influye en el resultado final del volumen total que abarca el depósito.

## **5.3 Comparación con depósitos de avalancha de detritos volcánicos en sector argentino**

El depósito de avalancha volcánica ubicado al este del volcán Lullailaco, se compone por dos lóbulos principales, separados por el cerro Rosado. La distancia máxima que alcanzó es de 25 km, un poco mayores a los 18 km alcanzados por la avalancha estudiada en este trabajo. El área y volumen cubiertos por esta avalancha son de 165 km<sup>2</sup> y 1 a 2 km<sup>3</sup> (Richards y Villeneuve, 2004), respectivamente, lo que supera ampliamente a los 31.5 km<sup>2</sup> y 0.5 km<sup>3</sup> del depósito SW.

Las velocidades máximas calculadas para ambas avalanchas son ligeramente inferiores para la avalancha en sector argentino, con 324 km/h (Richards y Villeneuve, 2004), y 350.6 km/h para el suroccidental, aunque esto puede deberse a la proximidad al volcán en que fue calculada la velocidad. El coeficiente de fricción de la avalancha en Argentina es menor, con un rango entre 0.9 y 0.12 (Richards y Villeneuve, 2004; Rodríguez, 2010), contra 0.113 a 0.146, sin embargo, ambas se encuentran dentro de los valores típicos estimados para otras avalanchas (ver capítulo 5.4). Por otra parte, la distancia excesiva alcanzada en el lado argentino, está entre 18.5 km y 20.5 km (Richards y Villeneuve, 2004; Rodríguez, 2010), superior a los 9,5 km a 14,7 km estimados en este estudio. Esto último, concuerda con la diferencia en la fricción, lo que indica una mayor movilidad de la avalancha este.

Las estructuras presentes en los lóbulos del depósito oriental son, mayormente, *hummocks* y *ridges* longitudinales alargados (Rodríguez, 2010; imágenes satelitales), a diferencia de la predominancia de estructuras de base circular y ovalada en los depósitos del SW. Basados en modelos análogos (Paguican et al., 2014a), esta simetría de las estructuras podría indicar que el material que componía la ladera colapsada durante la avalancha oriental poseía una mayor cohesión que la del depósito en el SW, al momento del colapso del volcán. Sin embargo, para el volcán Ollagüe (Clavero et al., 2004) se propuso que la reología del material original previo al colapso está más relacionada con el ángulo de las laderas de las estructuras: mientras mayor la pendiente, más competente es el material. Para esto último, no se cuenta con información en la avalancha oriental para realizar comparaciones.

Los depósitos al este del volcán presentan bloques con tamaños máximos similares a los de la avalancha SW, de hasta 6 m de diámetro (Rodríguez, 2010). La textura de rompecabezas observada en los clastos del este, indicaría que éstos, al momento de su emplazamiento, se encontraban calientes, y la diferencia de temperaturas generó la expansión de los bloques y su posterior fractura. Esto implica que un probable gatillante de la avalancha del este fue la actividad volcánica, lo que explicaría la inclusión de material a altas temperaturas. Esta textura no fue observada en los bloques de los depósitos en el SW. Por otro lado, en este estudio, se encontraron marcas de impacto, las que no se presentan en los depósitos del este, y que podrían asociar a la avalancha estudiada en este trabajo, un comportamiento, al menos superficial, de flujo granular (ver capítulo 5.5).

Debido a la diferencia entre las estructuras y los bloques presentes en ambos depósitos, se propone que, si bien ambos se asocian a eventos catastróficos de colapsos parciales del mismo volcán, corresponden a diferentes avalanchas de detritos, generadas durante el desarrollo del volcán Lullaillaco.

## **5.4 Comparación de los parámetros físicos con otros depósitos**

El depósito estudiado alcanza un área de 31.5 km<sup>2</sup> y un volumen de 0.5 km<sup>3</sup>. Estas medidas la convierten en una avalancha de dimensiones medias, comparada con otros depósitos de este tipo en los Andes Centrales (Tabla 4). Existen unas mucho mayores, como es el caso de la avalancha del volcán Socompa, con una superficie de 490 km<sup>2</sup> y un volumen de 25 km<sup>3</sup> (Francis et al., 1985; Wadge et al., 1995; Kelfoun y Druitt, 2005); y otra menores como la del volcán Lastarria con un área y volumen de 10.76 km<sup>2</sup> y 0.091



km<sup>3</sup>, respectivamente (Naranjo y Francis, 1987; Rodríguez et al., 2015). El depósito asociado al volcán Ollagüe se asemeja mucho, en cuanto a sus dimensiones, a la de este estudio: posee un área de 50 km<sup>2</sup> y un volumen total de 1km<sup>3</sup> (Clavero et al., 2004).

Las velocidades mínima y máxima calculadas para el lóbulo norte son 180.32 km/h y 350.6 km/h, mientras que para el lóbulo sur son 116.03 km/h y 289.08 km/h. En este trabajo se consideran más representativas las velocidades máximas, ya que ésta considera la energía que pierde el material al ascender un obstáculo. Por otra parte, la diferencia entre las velocidades calculadas para el lóbulo norte y el lóbulo sur, estando este último más alejado del volcán, podría explicarse con la pérdida de energía cinética, principalmente por la fricción con el sustrato, del material durante el transporte de la avalancha volcánica.

Las velocidades también alcanzan valores típicos para otras avalanchas de los Andes Centrales. La velocidad máxima se asemeja a los 360 km/h calculados para el volcán Socompa (Kelfoun y Druitt, 2005), mientras que la mínima se acerca a los de los volcanes Parinacota y Ollagüe (Clavero et al., 2002; Clavero et al., 2004), todas calculadas con el mismo método (Tabla 4).

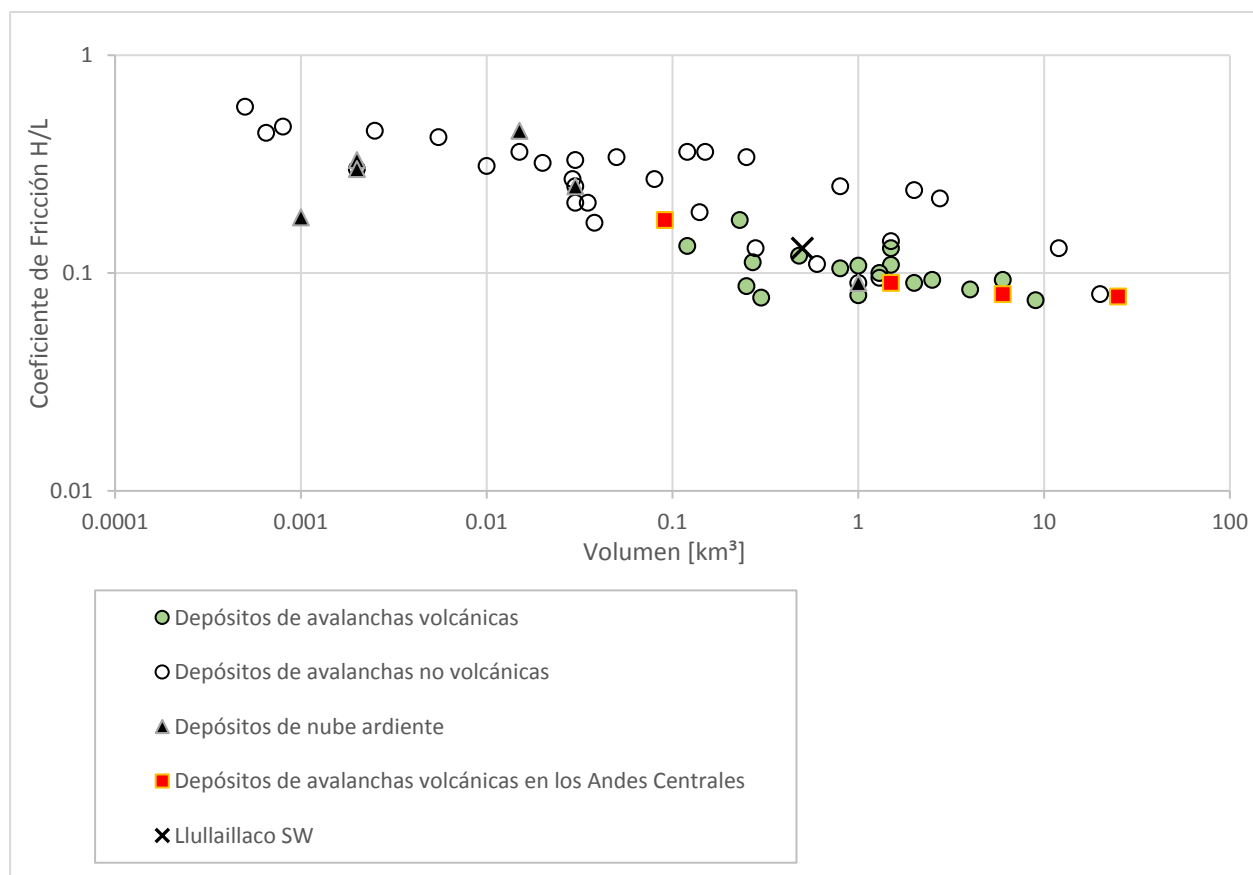


Figura 55 Gráfico de Coeficiente de Fricción (H/L) versus Volumen (V) para avalanchas volcánicas, no volcánicas y depósitos de nubes ardientes (datos de Ui, 1983). Además se incluyen datos de los depósitos de avalancha de los volcanes Socompa (Wadge et al., 1995), Parinacota (Clavero et al., 2002), Lastarria (Naranjo y Francis, 1987) y del Lullillaico, en sector argentino (Richards y Villeneuve, 2004), además de la avalancha volcánica estudiada en este trabajo.

El coeficiente de fricción promedio calculado es de 0.13. Este valor se encuentra dentro de los parámetros normales para avalanchas volcánicas, que según Ui en 1983, poseen coeficientes entre 0.06 y 0.18 (Figura 55), y mientras mayor es, menor movilidad poseería la avalancha. Además, posee un coeficiente de fricción menor al de la mayoría de los casos de avalanchas no volcánicas y de nubes ardientes o flujos piroclásticos (Figura 55), lo que Ui, 1983 asoció al alto contenido de material fracturado, roca alterada hidrotermalmente y rocas piroclásticas que componen al edificio volcánico. El valor calculado se encuentra dentro del rango típico de otras avalanchas de los Andes Centrales, superior a la de los volcanes Socompa (Wadge et al., 1995) de 0,078 y Parinacota (Clavero et al., 2002) de 0,08; e inferior a la del volcán Lastarria (Naranjo y Francis, 1987) de 0,175 (Tabla 4); es decir, posee una menor movilidad que los primeros, pero mayor que el último.

El otro indicador de movimiento considerado es la distancia excesiva, la cual entregó valores de 9,5 km, 11,7 km y 14,7 km, para los lóbulos norte, central y sur, respectivamente. Esto significa que es en ese valor en que superan la distancia alcanzada por un flujo con un coeficiente de fricción típico de 0.62. Son valores medios a altos comparados con otros depósitos, superando a la avalancha del volcán Lastarria (Naranjo

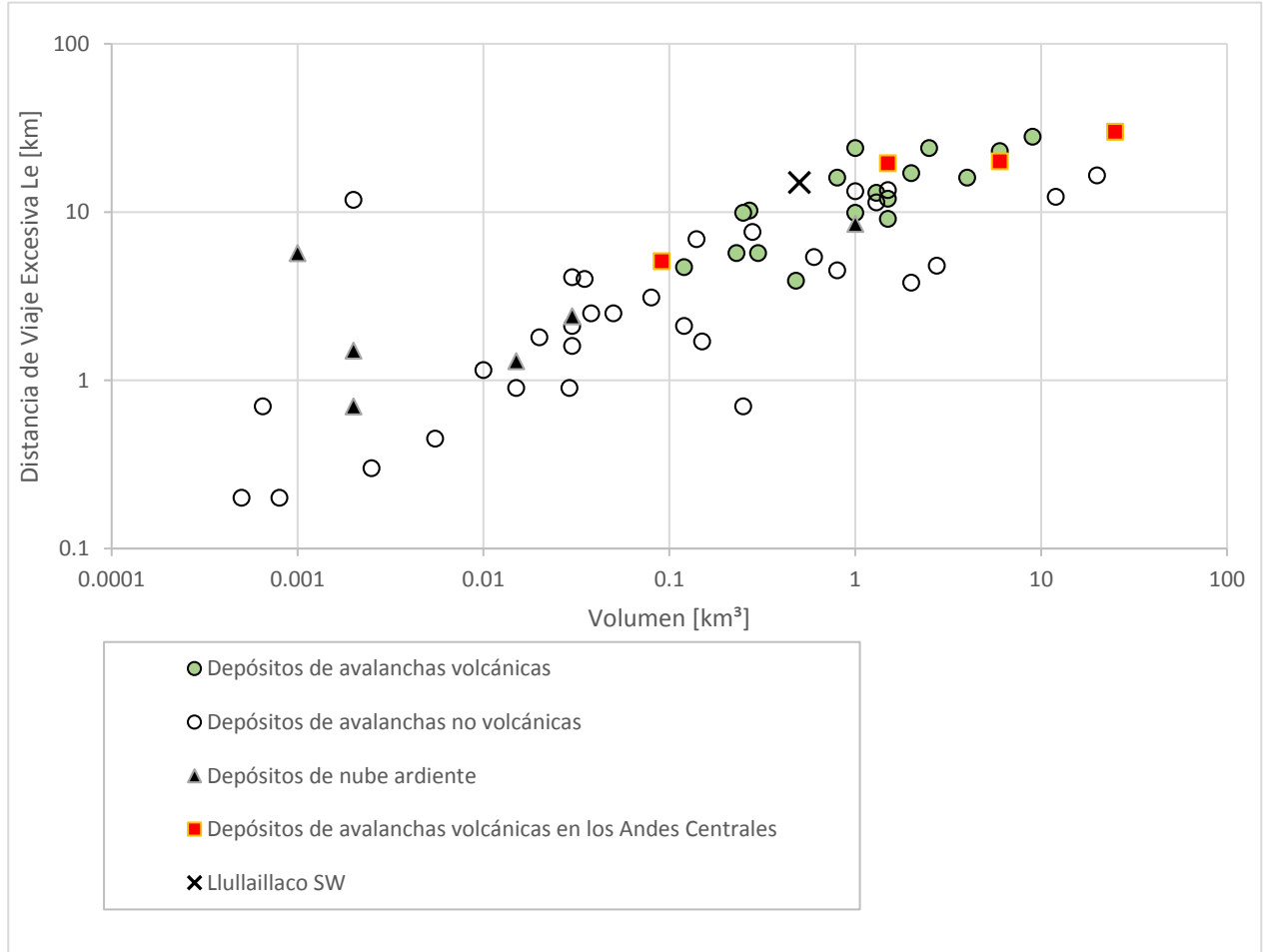


Figura 56 Gráfico de Distancia de Viaje Excesiva (km) versus Volumen (V) para avalanchas volcánicas, no volcánicas y depósitos de nubes ardientes (datos de Ui, 1983). Además se incluyen datos de los depósitos de avalancha de los volcanes Socompa (Wadge et al., 1995), Parinacota (Clavero et al., 2002), Lastarria (Naranjo y Francis, 1987) y del Llullaillaco, en sector argentino (Richards y Villeneuve, 2004), además de la avalancha volcánica estudiada en este trabajo.

y Francis, 1987) con 5,1 km, pero inferior a la del volcán Parinacota (Clavero et al., 2002) con 20 km (Tabla 4); mientras que es superior a la mayoría de las avalanchas no volcánicas y nubes ardientes (flujos piroclásticos), con volúmenes comparables, estudiadas por Ui, 1983 (Figura 56). Esto se corresponde a los valores obtenidos para el coeficiente de fricción, ya que mientras mayor es la distancia excesiva, mayor sería su movilidad.

El último parámetro calculado es la relación entre el área y el volumen del depósito  $A/V^{2/3}$ , la cual entregó un valor de 50. Este resultado se encuentra dentro de rangos normales para este tipo de remociones, ya que es muy similar a los asociados a los volcanes Parinacota (Clavero et al., 2002), Socompa (Kelfoun y Druitt, 2005), y Lastarria (Naranjo y Francis, 1987; Rodríguez et al., 2015), con valores de 50, 57 y 53, respectivamente (Tabla 4).

Avalancha Volcánica	Distancia [km]	Área [km <sup>2</sup> ]	Volumen [km <sup>3</sup> ]	Velocidad Mínima [km/h]	Velocidad Máxima [km/h]	Coef. de Fricción	Distancia de Viaje Excesiva [km]	$\frac{A}{V^{2/3}}$
Socompa	35	490	25	360	-	0.078	30	57,3
Parinacota	22	140	6	216	-	0.08	20	50
Lastarria	7	10,76	0,091	94,28	270,42	0,175	5,1	53,2
Ollagüe	-	50	1	120	-	-	-	50
Llullaillaco sector E	25	165	1 a 2	162 - 324	-	0,09 a 0,12	18,5 a 20,5	104
<b>Llullaillaco SW</b>	<b>18</b>	<b>31,5</b>	<b>0,5</b>	<b>116 - 180</b>	<b>289 - 350</b>	<b>0,13</b>	<b>9,5 - 15</b>	<b>50</b>

Tabla 4 Resumen de las propiedades físicas calculadas por diferentes autores en avalanchas volcánicas de los Andes Centrales

## 5.5 Origen y mecanismos de transporte de la avalancha

La edad K/Ar estimada por Gardeweg et al. (1993) en un bloque ubicado en la Facies Lóbulo Sur, con un valor de  $0,4 \pm 0,3$  Ma, podría indicar una edad máxima para la avalancha volcánica de 700 ka, incluyendo el error máximo asociado a dicha datación. Por otra parte, (Villa et al., en preparación) calcularon una edad de  $0.417 \pm 0.078$  Ma en depósitos clásticos en la ladera sur del volcán Llullaillaco, los cuales sobreyacen a los depósitos de la avalancha estudiada en este trabajo. Entonces, la edad indicada por et al. (en preparación) correspondería a una edad mínima para la generación de la avalancha volcánica.

La forma y orientación de los *hummocks* puede ayudar a determinar las características del material que componía la ladera colapsada del edificio volcánico, basado en los modelos análogos generados por Paguican et al. (2014), los cuales permiten establecer que un depósito con largos *runout*, con extensión longitudinal, y con presencia de *hummock* pequeños y con base redondeada, como es el caso de la avalancha estudiada, proviene del colapso de material con una baja cohesión y que la superficie de deslizamiento se encontraba lubricada.

Con respecto al factor o factores condicionantes para esta avalancha volcánica, es poco probable la existencia de glaciares en el volcán al momento del colapso, ya que no se encontraron texturas de abrasión, como estrías o acanaladuras, o morfologías típicas de glaciares en el depósito, como morrenas, rocas aborregadas, *drumlins*, entre otras (Gutiérrez, 2008). Por otra parte, el alto contenido de fragmentos silicificados encontrados en la matriz de todo el depósito, podría indicar que, al menos, la avalancha alcanzó una zona de alteración hidrotermal en el edificio volcánico, la cual pudo haber conformado una zona de debilidad que facilitara el colapso, tal como fue propuesto para el Mt. Rainier (López y Williams, 1993).

Si bien, no se cuenta con los datos suficientes para dar con un efecto gatillante de la remoción que produjo este depósito, la ausencia de bloques prismáticamente fracturados, al menos en la superficie del depósito, y que puedan asociarse a fragmentos juveniles, indica que, probablemente la avalancha no fue generada por actividad volcánica. Un factor que pudo haber influido en la generación de esta avalancha volcánica, es la intrusión de un cuerpo magmático bajo el volcán, aprovechando estructuras preexistentes, basado en las estructuras N-S y NW propuestas por variados autores, las cuales atraviesan al edificio volcánico y que, al igual que con otros lineamientos regionales, como el Calama-Olacapato-El Toro, se ha propuesto que han servido como conducto para el volcanismo desde el Mioceno hasta el Cuaternario Tardío (Salfity, 1985; Richards y Villeneuve, 2002; Petrinovic et al., 2005; Arancibia et al., 2009).

Hay algunos datos que proporcionan evidencias sobre cómo pudo ser el comportamiento del flujo. En la zona de estudio no hay evidencias de presencia de agua ni en el edificio volcánico, ni en el sustrato, por lo que es poco probable que el mecanismo de transporte se relacione a los que se han propuesto por inclusión de agua (base acuosa: Shaller, 1991; incorporación de arcillas ricas en agua: Stoope y Sheridan, 1992; Vallance y Scott, 1997; Capra y Macías, 2000). Por otra parte, los bloques con presencia de marcas de impacto en la superficie de la avalancha podrían asociarse a la región colisional en la superficie de los flujos granulares propuesto tras estudios modelos análogos (Drake, 1990), en la que se generan colisiones por vibración entre los granos, sin embargo, la falta de datos en profundidad, como marcas de fricción en la base o bloques con texturas de abrasión en zonas medias, no permite concluir si efectivamente corresponde a este tipo de flujos, completamente. Por otra parte, la ausencia de bloques con marcas de impacto y de estructuras, además de la menor dimensión de los clastos en las zonas de mayor pendiente, sugiere que en estos sectores se depositó sólo el material correspondiente a las zonas más basales de la avalancha, y debido a estos mismos factores, esta capa estaría compuesta de material más cohesivo que la superficie, la cual acomodaría la mayor parte del cizalle durante el transporte. Un mecanismo similar se propone para la avalancha del volcán Parinacota, con un comportamiento granular en superficie y una capa basal más cohesiva y que abarcaría el cizalle del flujo (Clavero et al., 2002).

La detención del flujo se produjo por la colisión contra la paleotopografía y posterior ascenso por la ladera de los cerros Altos de Tocomar en el lóbulo norte y del cerro Punta Negrillo en el sur. El lóbulo central pudo detenerse por pérdida de energía cinética al expandirse por la planicie al este de los cerros Altos de Tocomar, ayudado también por posibles obstáculos en la paleotopografía.

Finalmente, el contacto observado en el flanco SE del edificio volcánico, que corta los depósitos más antiguos del volcán, y que los cubre con lavas del Lullailaco II, podría

corresponder al escarpe generado tras el colapso del edificio. Sin embargo, es muy difícil asociar este evento a este posible escarpe, debido a la falta de datos, por lo que podría tratarse de cualquier otro tipo de erosión.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIÓN

Las características morfológicas, estructurales y granulométricas de los depósitos clásticos emplazados hacia el suroeste del volcán Llullaillaco, indican que corresponden a una avalancha de detritos producto del colapso de uno de los flancos del edificio volcánico. Se extienden por una superficie total de 31.5 km<sup>2</sup>, y abarcan un volumen aproximado de 0.5 km<sup>3</sup>. Se caracterizan por estar compuestos por tres lóbulos que caen hacia el oeste desde una zona a mayor altura, justo al sur del volcán Llullaillaco.

El depósito fue dividido en 4 facies bajo parámetros que pueden ayudar a determinar posibles procesos por los que pasó la avalancha durante su transporte. Estos parámetros son: geometría, estructuras presentes, litología de los clastos y la matriz, y granulometría. Las facies que se definieron son: Facies Zona en Altura (ZA), Facies Lóbulo Norte (LN), Facies Lóbulo Central (LC), y Facies Lóbulo Sur (LS).

No se consideró la zona al oeste del volcán dentro de la avalancha, ya que posee características que la asocian más a depósitos aluviales o laháricos.

Consta de una gran cantidad de *hummocks* y *ridges*, tanto longitudinales como transversales a la dirección del flujo, los que se formarían por cizalle, fracturamiento mecánico de material original del volcán y cambios en los regímenes de compresión.

El depósito completo se compone de material muy brechizado y mal seleccionado. Los bloques se concentran en las zonas de mayor altura en las estructuras, lo que se podría relacionarse a la brechización del material competente, proveniente del volcán, que da forma a las estructuras, así como al cizalle que se genera entre éstas, con el consecuente fracturamiento mecánico del material en estos sectores. Los bloques presentan marcas de impacto que indicarían su vibración durante el transporte.

Con respecto a la matriz, los lóbulos norte y sur del depósito presentan una disminución del tamaño de grano conforme se alejan del edificio volcánico, lo que se asociaría a un aumento del fracturamiento mecánico del material conforme este avanza, además de la compresión que se generaría en la zona de colisión contra la paleotopografía. El lóbulo central posee un aumento del tamaño de grano, lo que se podría explicarse por una mayor compresión y fracturamiento en zonas medias, en que se observa un cambio de pendiente.

La avalancha volcánica habría alcanzado velocidades mínimas entre 116 km/h y 180.3 km/h, calculados en el lóbulo proximal y en el distal, respectivamente. La velocidad máxima calculada, sin tomar en cuenta los efectos de la fricción al remontar obstáculos, es de 350.6 km/h. Por otra parte, el coeficiente de fricción calculado para esta avalancha es, en promedio, de 0.13, mientras que la distancia de viaje excesiva alcanza valores de 9550 m, 11674 m y 14706 m para cada lóbulo. La razón  $A/V^{2/3}$ , entregó un resultado de 50.

Las características de esta avalancha la clasifican como uno de los típicos depósitos de este tipo encontrados en los Andes Centrales. Con respecto a sus dimensiones, se asemeja al depósito de avalancha del volcán Ollagüe, que cubre un área de 50 km<sup>2</sup> y un volumen total de 1 km<sup>3</sup>. En cuanto a su dinámica, se obtuvieron características similares a otros eventos, con una mayor movilidad que la avalancha del volcán Lastarria, pero

menor a la de los volcanes Socompa y Parinacota. Por otra parte, la avalancha se habría comportado como un flujo granular en zonas superiores, por la presencia de marcas de impacto y la brechización del material, y como un material más cohesivo en zonas basales.

La presencia de estructuras más alargadas y de bloques juveniles con texturas de rompecabezas o prismáticamente fracturados en los depósitos de la avalancha en el lado argentino, sumado a la ausencia de marcas de impacto en sus bloques, indicaría que ésta y la avalancha estudiada en este trabajo corresponden a dos eventos diferentes, producto de más de un colapso del volcán Llullaillaco.

La edad máxima en que pudo provocarse el colapso del edificio volcánico es de 0,7 Ma, mientras que la mínima es de  $0.417 \pm 0.078$  Ma, calculada en depósitos volcánicos que se ubican sobre la avalancha, estratigráficamente.

La ausencia de bloques prismáticamente fracturados, al menos en los puntos de control en terreno, indican que es poco probable el efecto de la actividad volcánica como gatillante de la avalancha, lo que deja distintas opciones como posible respuesta, siendo una de ellas la actividad de las grandes estructuras NW y NS que cruzan el volcán.

## CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

- Allmendinger, R. (1986). Tectonic development, southeastern border of the Puna Plateau, northwestern Argentine Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 97, 1070-1082.
- Allmendinger, R., Jordan, T., Kay, S., & Isacks, B. (1997). The Evolution of the Altiplano-Puna Plateau of the Central Andes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25, 139-174.
- Andrade, S. D., & van Wyk de Vries, B. (2010). Structural analysis of the early stages of catastrophic stratovolcano flank-collapse using analogue models. *Bulletin of Volcanology*, 72, 771-789.
- Arancibia, G., Rojas, C., Clavero, J., & Godoy, E. (2009, Noviembre). Análisis estructural del depósito de avalancha de detritos del volcán Lullaillaco (24°43'S), Andes Centrales. *Congreso Geológico Chileno*, 12, S2-001.
- Bahlburg, H., & Breitzkreuz, C. (1991). Paleozoic evolution of active margin basins in the southern Central Andes (northwestern Argentina and northern Chile). *Journal of South American Earth Sciences*, 4, 171-188.
- Campbell, C. S. (1989). Self-Lubrication for Long Runout Landslides. *The Journal of Geology*, 97, 653-665.
- Campbell, C. S., Cleary, P., & Hopkins, M. (1995). Large-scale landslide simulations: Global deformation, velocities and basal friction. *Journal of Geophysical Research*, 100, 8267-8283.
- Capra, L., & Macías, J. L. (2000). Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano, central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102, 149-167.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In T. Moreno, & W. Gibbons, *Geology of Chile* (pp. 21-114). Londres: The Geological Society.
- Clavero, J., Polanco, E., Godoy, E., Aguilar, G., Sparks, S., van Wyk de Vries, B., . . . Matthews, S. (2004). Substrata influence in the transport and emplacement mechanism on the Ollagüe debris avalanche (Northern Chile). *Acta Vulcanologica*, 16, 59-76.
- Clavero, J., Sparks, R. S., Huppert, H., & Dade, W. B. (2002). Geological constraints on the emplacement mechanism of the Parinacota debris avalanche, Northern Chile. *Bulletin of Volcanology*, 40-54.
- Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C., & Ramos, V. (1982). Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth Science Reviews*, 18, 303-332.
- Dade, W., & Huppert, H. (1998). Long-runout rockfalls. *Geology*, 26, 803-806.
- Davies, T., McSaveney, M. J., & Hodgson, K. (1999). A fragmentation-spreading model for long-runout rock avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 1096-1110.






- Davies, T., Mcsaveney, M., & Kelfoun, K. (2010). Runout of the Socompa volcanic debris avalanche, Chile: A mechanical explanation for low basal shear resistance. *Bulletin of Volcanology*, 72, 933-944.
- Drake, T. (1990). Structural Features in Granular Flows. *Journal of Geophysical Research*, 8681-8696.
- Dufresne, A., & Davies, T. (2009). Longitudinal Ridges in mass movement deposits. *Geomorphology*, 171-181.
- Francis, P. W., & Baker, M. (1977). Mobility of pyroclastic flows. *Nature*, 270, 164-165.
- Francis, P. W., & Wells, G. (1988). Landsat Thematic Mapper observations of debris avalanche deposits in the Central Andes. *Bulletin of Volcanology*, 50, 258-278.
- Francis, P. W., Gardeweg, M., Ramírez, C. F., & Rothery, D. (1985). Catastrophic debris avalanche deposit of Socompa volcano, northern Chile. *Geology*, 13, 600-603.
- Gardeweg, M., & Ramírez, C. (1987). La Pacana caldera and the Atana Ignimbrite - a major ash-flow and resurgent caldera complex in the Andes of northern Chile. *Bulletin of Volcanology*, 49, 547-566.
- Gardeweg, M., Cornejo, P., & Davidson, J. (1984). Geología del volcán Llullaillaco, Altiplano de Antofagasta, Chile (Andes Centrales). *Revista Geológica de Chile*, 23, 21-37.
- Gardeweg, M., Ramírez, C. F., & Davidson, J. (1993). Mapa geológico del área del Salar de Punta Negra y del volcán Llullaillaco, Región de Antofagasta (1:100.000). *Documento 5*. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Glicken, H. (1996). Rockslide-debris avalanche of may 18, 1980, Mount St. Helens volcano, Washington. *USGS Open-File Report 96-677*, 98.
- González, E., Clavero, J., Rojas, C., Arancibia, G., & Godoy, E. (2009, Noviembre). Caracterización preliminar de las variaciones granulométricas del depósito de avalancha del volcán Llullaillaco, Andes Centrales. *Congreso Geológico Chileno*, 12, S2-006.
- Grunewald, U., Sparks, R., Kearns, S., & Komorowski, J.-C. (2000). Friction marks on blocks from pyroclastic flows at the Soufriere Hills volcano, Monserrat: Implications for flow mechanisms. *Geology*, 28, 827-830.
- Gutiérrez, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- Hayashi, J. N., & Self, S. (1992). A Comparison of Pyroclastic Flow and Debris Avalanche Mobility. *Journal of Geophysical Research*, 97, 9063-9071.
- Hsü, K. (1975). Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86, 129-140.
- Jaeger, H., Nagel, S., & Behringer, R. (1996). Granular solids, liquids and gases. *Reviews of Modern Physics*, 1259-1273.

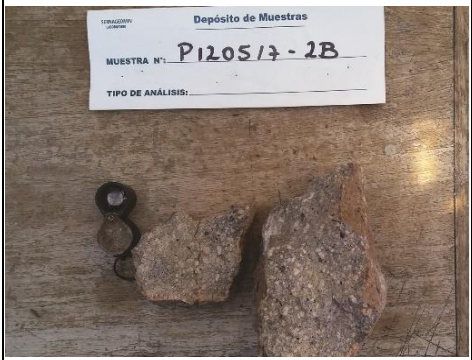


- Jordan, T., & Alonso, R. (1987). Cenozoic Stratigraphy and Basin Tectonics of the Andes Mountains, 20°-28° South Latitude. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71, 49-64.
- Kelfoun, K., & Druitt, T. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 110, 88-100.
- Lahsen, A. (1982). Upper Cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of northern Chile. *Earth Science Reviews*, 285-302.
- Lahsen, A. (1982). Upper Cenozoic Volcanism and Tectonism in the Andes of Northern Chile. *Earth Science Reviews*, 18, 285-302.
- López, D., & Williams, S. (1993). Catastrophic Volcanic Collapse: Relation to Hydrothermal Processes. *Science*, 1794-1796.
- Marinovic, N., Smoje, I., Maksaev, V., Hervé, M., & Mpodozis, C. (1995). *Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta: Servicio Nacional de Geología y Minería* (Vol. 70). Santiago: Carta Geológica de Chile.
- Naranjo, J. A., & Francis, P. (1987). High velocity debris avalanche al Lastarria volcano in the north Chilean Andes. *Bulletin of Vulcanology*, 49, 509-514.
- Niemeyer, H., Urzúa, F., & Rubinstein, C. (1997). Nuevos antecedentes estratigráficos y sedimentológicos de la Formación Zorritas, Devónico-Carbonífero de la Sierra Almeida, Región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 24, 25-43.
- Paguican, E. M.-r., van Wyk de Vries, B., & Lagmay, A. M. (2014a). Hummocks: how they form and how they evolve in rockslide-debris avalanches. *Landslides*, 67-80.
- Petrinovic, I., Arnosio, J., Alvarado, G., & Guzmán, S. (2005). Erupciones freáticas sintectónicas en el campo geotérmico de Tocomar, Salta. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 132-141.
- Richards, J., & Villeneuve, M. (2002). Characteristics of late Cenozoic volcanism along the Archibarca lineament from Cerro Llullaillaco to Corrida de Cori, northwest Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161-200.
- Richards, J., & Villeneuve, M. (2004). The Llullaillaco volcano, northwest Argentina: construction by Pleistocene volcanism and destruction by sector collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 132, 337-365.
- Richards, J., Boyce, A., & Pringle, M. (2000). Geologic Evolution of the Escondida Area, Northern Chile: A Model for Spatial and Temporal Localization of Porphyry Cu Mineralization. *Economic Geology*, 96, 271-305.
- Rodríguez, I. M. (2010). *Estudio de facies y análisis de parámetros físicos del depósito de avalancha de detritos del volcán Llullaillaco, Andes Centrales*. Memoria de Título, Universidad de Chile.
- Rodríguez, I., Paez, J., & Campos, E. (2015). Análisis de la avalancha de detritos del volcán Lastarria, Andes Centrales: facies, parámetros físicos y dinámica. *XIV Congreso Geológico de Chile*. La Serena.


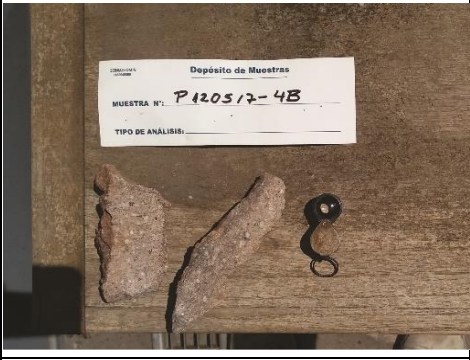


- Salfity, J. A. (1985). Lineamiento transversales al rumbo andino en el noroeste argentino. *IV Congreso Geológico Chileno*, 2-17.
- Salfity, J. A. (1985). Lineamientos transversales al rumbo andino en el noroeste Argentino. *IV Congreso Geológico Chileno, Antofagaste, Part 2*, 119-137.
- Shaller, P. J. (1991). *Analysis and implications of large Martian and terrestrial landslides (Ph.D. Thesis)*. California Institute of Technology.
- Shreve, R. L. (1967). Sherman landslide, Alaska. *Science*, 154, 1639-1643.
- Siebert, L. (1984, Octubre). Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanic and Geothermal Research*, 22, 163-197.
- Stern, C., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J., Lara, L., Naranjo, J. A., . . . Skewes, A. (2007). Chilean Volcanoes. In T. Moreno, & W. Gibbons, *The Geology of Chile* (pp. 149-180). Londres, Inglaterra: Geological Society of London.
- Stoopes, G. R., & Sheridan, M. F. (1992). Giant debris avalanches from the Colima Volcanic Complex, Mexico: Implications for long-runout landslides (>100 km) and hazard assessment. *Geology*, 20, 299-302.
- Ui, T. (1983). Volcanic dry avalanche deposits - Identification and comparison with non volcanic debris stream deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18, 135-150.
- Vallance, J. W., & Scott, K. M. (1997). The Osceola Mudflow from Mount Rainer: Sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow. *Geological Society of America Bulletin*, 109, 143-163.
- van Wyk de Vries, B., & Davies, T. (2015). Landslides, Debris Avalanches, and Volcanic Gravitational Deformation. In H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, *The Encyclopedia of Volcanoes* (2 ed., pp. 665-685). Academic Press.
- van Wyk de Vries, B., & Delcamp, A. (2015). Volcanic Debris Avalanches. In T. Davies, & J. Shroder, *Landslide Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 131-157). Elsevier.
- Villa, V., Ramírez, C., Ferrando, R., & Montecinos, D. ((en preparación)). Geología de las áreas Salar de Punta Negra y Cerro Aguas Calientes, Región de Antofagasta, Escala 1:100.000. *SERNAGEOMIN*.
- Wadge, G., Francis, P., & Ramírez, C. F. (1995). The Socompa collapse and avalanche event. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66, 309-336.
- Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 30, 377-392.
- Zappettini, E., Blasco, G., & Godeas, M. (1997). El Volcanismo Paleógeno de la Puna Occidental, República de Argentina. *VIII Congreso Geológico Chileno, Universidad Católica del Norte, Chile*, 291-295.


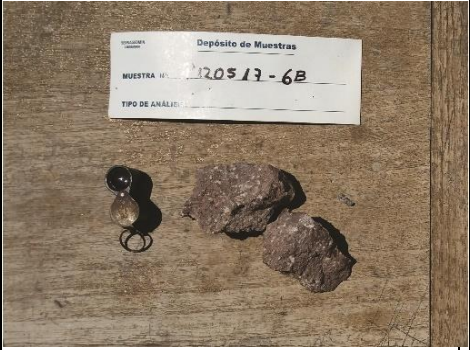


# ANEXOS





## ANEXO A

Muestra	Roca	Descripción	Fotografía
P120517-1B	Brecha hidrotermal	<p>Bloque de brecha hidrotermal con matriz silicificada, blanquecina, con oquedades de hasta 2 mm. Presenta clastos angulosos a subangulosos de lavas afaníticas y porfíricas de distintos tonos de gris, y que presentan cristales distinguibles de plagioclasa.</p>	
	Dacita porfírica de biotita	<p>Roca volcánica muy alterada, hipocristalina, porfírica, con un tamaño de cristales de fino a medio, los cristales se muestran alotromórficos y presenta oquedades. La mineralogía observada incluye plagioclasas de hasta 3 mm, cuarzo y biotita de hasta 1 mm, y minerales de alteración amarillentos, además de arcillas. La matriz es vítrea con presencia de prequeños cristales.</p>	
	Brecha volcánica dacítica	<p>Roca volcánica brechizada, hipocristalina, porfírica, tamaño de grano fino a medio, los cistales se muestran hipidiomórficos, presenta stockwork. La mineralogía consiste en plagioclasas de hasta 4 mm, cuarzo de hasta 3 mm y biotita y anfíbol menores a 2 mm, con minerales de alteración entre los clastos de la brecha.</p>	



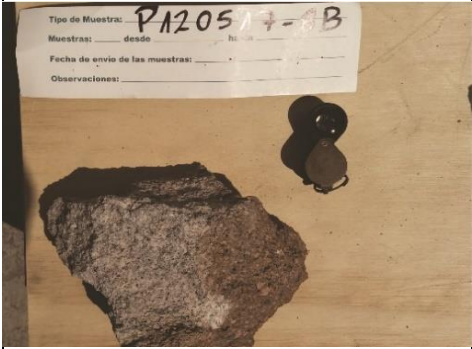
P120517-2B	Dacita porfírica de anfíbol	<p>Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio, con algunas plagioclasas y anfíboles de tamaño grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 6 mm, cuarzo de hasta 3 mm, anfíboles menores a 10 mm y biotita menores a 2 mm. Los anfíboles se presentan en una alta proporción relativa a otras muestras descritas (aprox. 10%). La matriz presenta vidrio y alto contenido de cristales de anfíbol.</p>	
	Dacita porfírica de anfíbol	<p>Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, cuarzo de hasta 3 mm, anfíboles y biotitas menores a 2 mm. La matriz es de color rojizo y presenta vidrio y cristales alterados.</p>	
P120517-2B	Dacita porfírica de anfíbol	<p>Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, cuarzo de hasta 3 mm, anfíboles y biotitas menores a 1 mm. La matriz es de color gris oscuro y presenta vidrio y cristales.</p>	

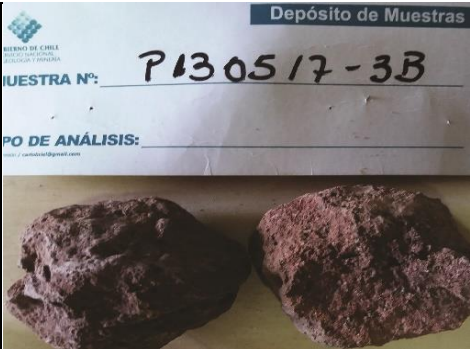



P120517-4B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 4 mm, cuarzo de hasta 4 mm, anfíboles menores a 2 mm y biotitas y piroxenos menores a 1 mm. La matriz es de color gris rosácea y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio y presencia de oquedades. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa y cuarzo de hasta 3 mm, anfíboles de hasta 2 mm y biotitas menores a 1 mm. La matriz es de color rosácea y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, cuarzo de hasta 2 mm, anfíboles de hasta 8 mm y baja proporción de cristales verdes en amígdalas, probablemente epidota. La matriz es de color gris claro y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, cuarzo de hasta 3 mm, anfíboles de hasta 4 mm y biotitas menores a 2 mm. La matriz es de color rosácea, oquerosa, y presenta vidrio y cristales alterados.	


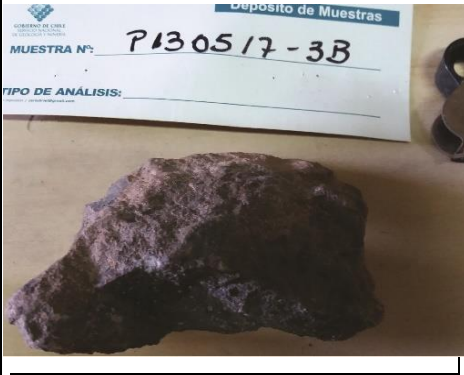
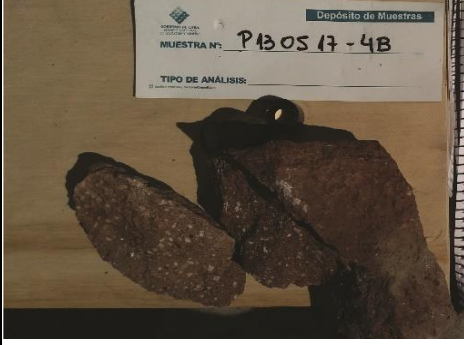
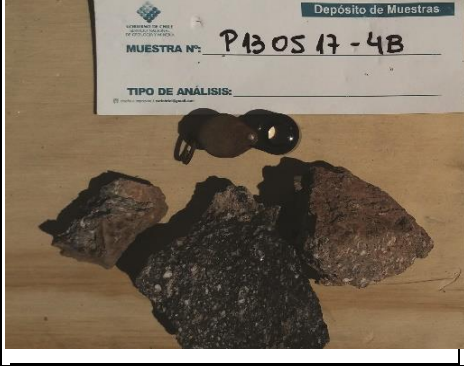
P120517-6B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, cuarzo de hasta 3 mm, anfíboles menores a 1 mm y biotitas menores a 2 mm. La matriz es de color gris claro y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 4 mm, cuarzo de hasta 2 mm, anfíboles menores a 3 mm y biotitas menores a 1 mm. La matriz es de color rojiza y presenta vidrio y cristales alterados.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, cuarzo de hasta 3 mm, anfíboles y biotitas menores a 1 mm. La matriz es de color gris claro y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, afanítica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa y cuarzo de hasta 2 mm (difícil diferenciarlos por su tamaño), anfíboles menores a 2 mm y biotitas menores a 1 mm. La matriz es de color gris claro y presenta vidrio y cristales alterados.	



P120517-7B	Dacita porfírica de anfíbol	<p>Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio, con algunos cristales de plagioclasa de tamaño grueso.</p> <p>Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 7 mm, cuarzo y anfíboles de hasta 3 mm y biotitas menores a 2 mm. La matriz es de color gris y presenta vidrio y cristales, con un bajo grado de alteración.</p>	
P120517-7B	Dacita porfírica de anfíbol	<p>Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, cuarzo y anfíboles de hasta 4 mm y biotitas menores a 2 mm. La matriz se encuentra completamente alterada, de color anaranjado, oquerosa y con presencia de vidrio y cristales.</p>	
	Dacita porfírica de anfíbol	<p>Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, cuarzo de hasta 4 mm, anfíboles menores a 3 mm y biotitas menores a 2 mm. La matriz es de color gris claro y presenta vidrio y cristales.</p>	
	Brecha volcánica dacítica	<p>Roca brechizada con clastos de lava porfírica. La matriz es de color rosáceo con cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíboles, además de presentar arcillas. Los clastos muestran una matriz grisácea, con cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíboles.</p>	


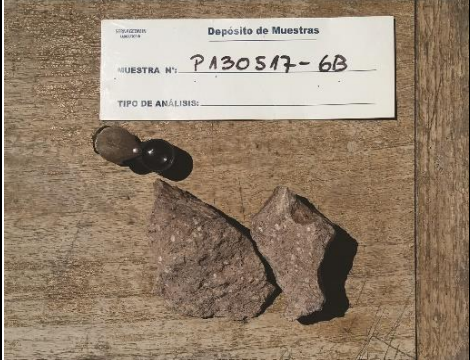




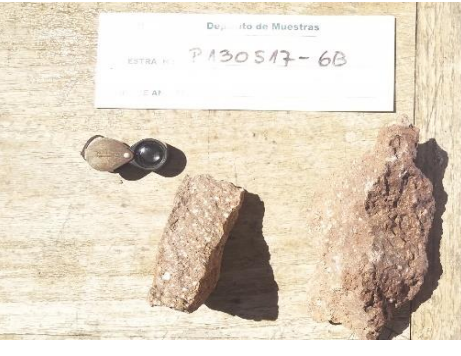


P120517-8B	Dacita porfírica de anfíbol	<p>Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio, con algunos cristales de anfíbol con tamaño grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, cuarzo de hasta 3 mm, anfíboles menores a 6 mm y biotitas menores a 2 mm, estas últimas en muy baja proporción. La matriz es de color rosado y presenta vidrio y cristales.</p>	
	Dacita porfírica de anfíbol	<p>Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 5 mm, cuarzo de hasta 3 mm, anfíboles menores a 3 mm y biotitas menores a 2 mm, estas últimas en muy baja proporción. La matriz es de color grisácea y presenta vidrio y cristales.</p>	
P120517-8B	Dacita porfírica de anfíbol	<p>Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 4 mm, y cuarzo, anfíbol y biotita de hasta 2 mm.</p>	

P130517-3B	Dacita de biotita	Roca volcánica afanítica con cristales de plagioclasa y cuarzo menores a 1 mm y de biotita de hasta 2 mm de diámetro. La matriz es de color rojo, muy oxidada.	
	Dacita de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 2 mm, cuarzo y biotita menores a 1 mm. La matriz es de color gris oscuro y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven alotromórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 4 mm, cuarzo y biotita menores a 1 mm. La matriz es de color gris claro y presenta vidrio y cristales.	
	Andesita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven alotromórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 3 mm, cuarzo y biotita menores a 1 mm. La matriz es de color rojizo, muy alterada, presenta vidrio y cristales.	


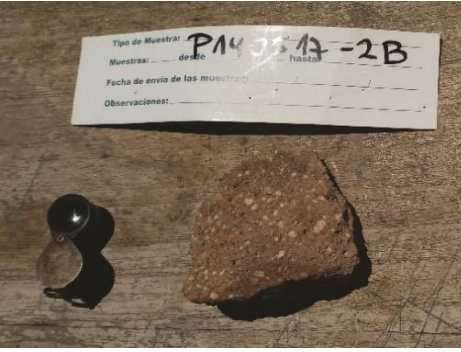
P130517-3B	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 3 mm, cuarzo y biotita menores a 1 mm. La matriz es grisácea y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 2 mm, cuarzo y biotita menores a 1 mm. La matriz es de color gris muy oscuro y presenta vidrio y cristales.	
P130517-4B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa en dos familias, una con un tamaño de hasta 10 mm y otra de hasta 2 mm; cuarzo de hasta 5 mm de diámetro, biotita menores a 2 mm y anfíboles menores a 1 mm. Además, presenta algunas amígdalas rellenas de cuarzo rodeado de epidota. La matriz es de color rojizo a pardo, muy alterada, y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa de hasta 4 mm, cuarzo de hasta 3 mm y biotitas menores a 1 mm. La matriz es de color gris oscuro y presenta vidrio y cristales.	

P130517-5B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, y cuarzo, biotita y anfíbol de hasta 2 mm. La matriz presenta vidrio y cristales.	
P130517-5B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, biotita de hasta 4 mm, y cuarzo y anfíbol de hasta 2 mm. La matriz se presenta muy alterada con vidrio y cristales, y algunas oquedades por alteración.	
P130517-5B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, y cuarzo, biotita y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz presenta vidrio y cristales.	

P130517-6B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo y biotita hasta 3 mm y anfíbol de hasta 2 mm. La matriz es de color gris y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo hasta 3 mm, anfíbol y biotita de hasta 2 mm, y epidota de hasta 1 mm en amígdalas con cuarzo. La matriz es de color rosácea y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo hasta 5 mm, biotita hasta 4 mm y anfíbol de hasta 2 mm. La matriz es de color rojizo y presenta vidrio y cristales, además de oquedades debido a la alteración.	




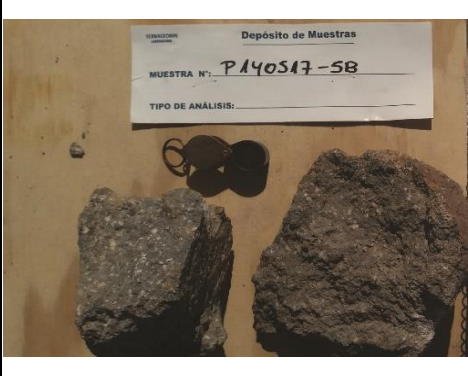
P130517-6B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo y biotita hasta 4 mm y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz es de color gris claro y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo hasta 5 mm y anfíbol y biotita de hasta 2 mm. La matriz es de color pardo y presenta vidrio y cristales, además de oquedades por alteración.	
P140517-1B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo hasta 3 mm, biotita y anfíbol de hasta 2 mm. La matriz es de color gris claro, con variaciones a pardo en algunos clastos más alterados, y la matriz presenta vidrio y cristales.	
	Dacita de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, afanítica, con tamaño de grano fino. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 2 mm de diámetro, y cuarzo, biotita y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz es de color rojizo y presenta vidrio y cristales alterados. Pareciera presentar una textura de autobrecha, con sus clastos de un color gris oscuro.	




P140517-1B	Dacita de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, afanítica, con tamaño de grano fino. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 2 mm de diámetro, y cuarzo, biotita y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz es de color gris oscuro y presenta vidrio y cristales.	
	Toba cristalina dacítica	Fragmentos líticos piroclásticos de colores rojizos, grises oscuro y pardos. La matriz es vítrea, muy porosa. Presenta cristales de plagioclasa, cuarzo y una baja proporción de máficos, como biotita.	
P140517-2B	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo y biotita hasta 2 mm, anfíbol de hasta 1 mm, y epidota de hasta 1 mm en amígdalas junto con cuarzo. La matriz presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 3 mm de diámetro, cuarzo hasta 2 mm, anfíbol y biotita de hasta 1 mm, y epidota de hasta 1 mm en amígdalas junto con cuarzo. La matriz presenta vidrio y cristales.	


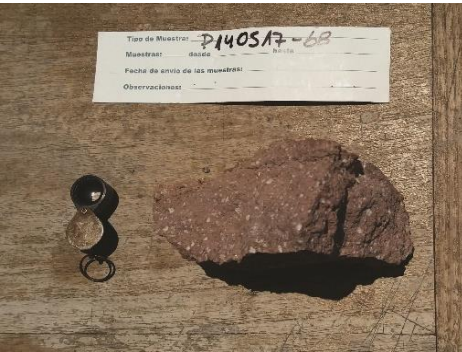

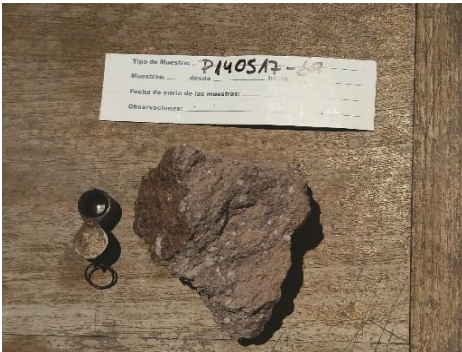
P140517-2B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo hasta 2 mm y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz es rojiza, alterada, y presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo y anfíbol hasta 3 mm y biotita de hasta 2 m. La matriz es parda amarillenta y presenta vidrio y cristales, además de oquedades por alteración.	
P140517-3B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo hasta 3 mm y biotita y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo hasta 2 mm y biotita y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz presenta vidrio y cristales. Hay clastos con las mismas características, pero con variaciones en su color: rojizos, pardos, lilas.	

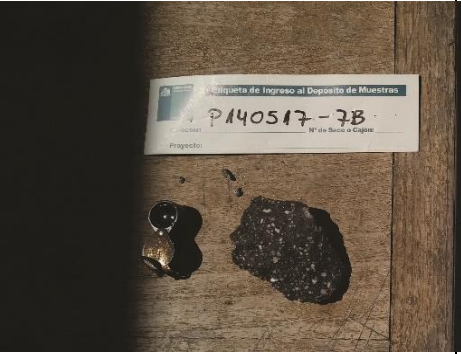


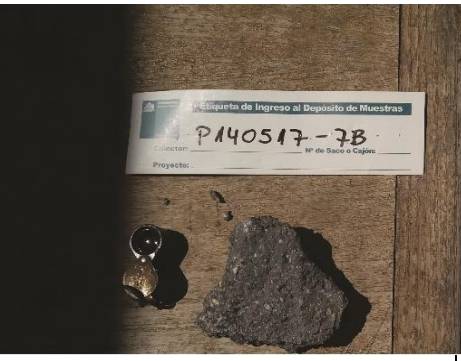
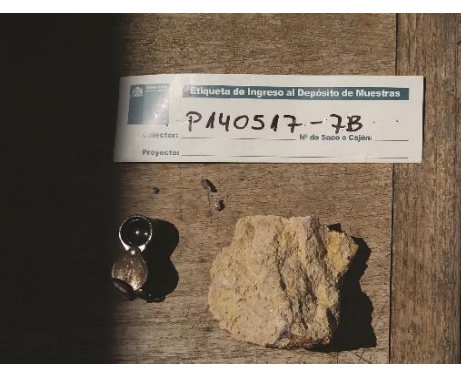

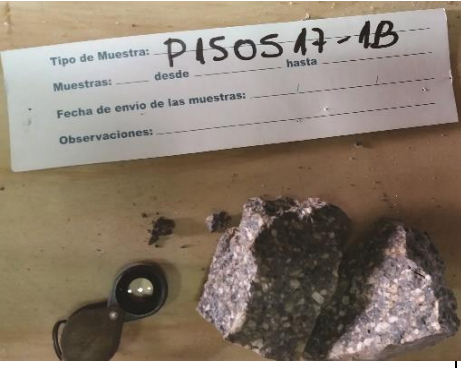
P140517-3B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo hasta 2 mm y biotita y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz es de color anaranjado y presenta vidrio y cristales, además de oquedades por alteración.	
P140517-4B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 7 mm de diámetro, cuarzo hasta 4 mm y biotita y anfíbol de hasta 2 mm, además de epidota de menos de 1 mm en amígdalas junto con cuarzo. La matriz es gris y presenta vidrio y cristales.	
P140517-4B	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo hasta 4 mm, biotita menores a 3 mm y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz es rosácea y presenta vidrio y cristales. Algunos fragmentos incluyen minerales de alteración amarillos, como jarosita y rojos (óxidos de hierro).	



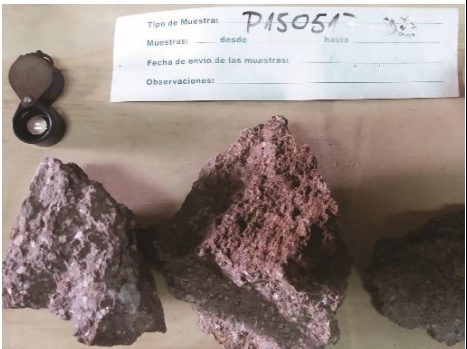

P140517-4B	Dacita porfírica de biotita	Fragmentos líticos volcánicos porfíricos con matriz muy alterada, con cristales de plagioclasa de hasta 4 mm, cuarzo hasta 5 mm, biotita muy bien preservada de hasta 4 mm y anfíboles menores a 1 mm. Alto contenido de arcilla y presencia de oquedades por alteración.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 8 mm de diámetro, cuarzo hasta 6 mm y biotita y anfíbol de hasta 2 mm. La matriz es de color gris claro presenta vidrio y cristales con un bajo grado de alteración.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo hasta 3 mm y biotita y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz es de color gris oscuro presenta vidrio y cristales.	
P140517-5B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 7 mm de diámetro, cuarzo hasta 5 mm y biotita y anfíbol de hasta 3 mm. La matriz es de color gris claro y presenta vidrio y cristales con bajo grado de alteración.	

P140517-5B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa y cuarzo con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, biotita de menos de 1 mm y anfíbol de hasta 3 mm, además de cristales de epidota de menos de 1 mm en amígdalas con cuarzo. La matriz es de color rojo y presenta vidrio y cristales alterados.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa y cuarzo con un tamaño de hasta 3 mm de diámetro, y biotita y anfíbol de hasta 2 mm. La matriz es de color anaranjado rojizo, oquerosa y presenta vidrio y cristales alterados.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Fragmentos líticos volcánicos porfíricos muy alterados, de color anaranjado, oquerosos y con alta presencia de minerales de alteración amarillos (jarosita?)	
P140517-5C	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo y anfíbol de hasta 3 mm y biotitas menores a 2 mm. La matriz es de color gris claro y presenta vidrio y cristales.	

P140517-5C	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo y anfíbol de hasta 3 mm y biotitas menores a 2 mm, además de presentarse algunos máficos cloritizados. La matriz es de color rosácea-rojiza y presenta vidrio y cristales., con bajo grado de alteración. algunos bloques oquerosos.	
P140517-6B	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 6 mm de diámetro, cuarzo hasta 5 mm, anfíbol de hasta 2 mm y biotitas menores a 1 mm. La biotita y anfíbol se presentan muy alterados. La matriz se ve muy alterada de color rojizo, con vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo hasta 7 mm, anfíbol de hasta 1 mm y biotitas menores a 2 mm. La matriz es de color gris claro, con vidrio y cristales, con bajo contenido de arcillas.	
	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 7 mm de diámetro, cuarzo hasta 4 mm, anfíbol de hasta 2 mm y biotitas menores a 1 mm. La matriz es de color rosáceo, con vidrio y cristales alterados.	




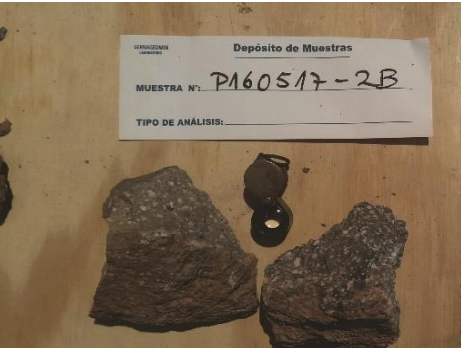
P140517-6B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo hasta 3 mm, anfíbol de hasta 2 mm y biotitas menores a 1 mm, además de presentar minerales amarillos de alteración, como jarosita. La matriz se ve muy alterada de color blanquecino amarillento, con vidrio y cristales muy alterados.	
P140517-7B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 3 mm de diámetro, cuarzo hasta 2 mm y anfíbol y biotitas menores a 1 mm. La matriz es de color gris claro a blanquecino, con vidrio, cristales alterados y arcillas alterando la matriz.	
P140517-7B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo hasta 4 mm, anfíbol de hasta 3 mm y biotitas menores a 2 mm, además de epidota menor a 1 mm en amígdalas junto con cuarzo. La matriz es de color gris oscuro, con vidrio y cristales.	

	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo hasta 3 mm y anfíbol de hasta 1 mm. La matriz es de color gris claro, con vidrio y cristales.	
P140517-7B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa y cuarzo con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, y anfíbol y biotitas menores a 1 mm. La matriz es de color rosado, con vidrio y cristales muy alterados, presencia de arcillas y minerales d alteración amarillos.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo y biotita de hasta 3 mm, anfíbol de hasta 2 mm, además de cristales de epidota menores a 1 mm en amígdalas, junto con cuarzo. La matriz es de color rojizo, variando el tono de rojo en variados bloques encontrados, con vidrio y cristales.	
P150517-1B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 6 mm de diámetro, cuarzo hasta 3 mm, anfíbol hasta 1 mm y biotitas menores a 2 mm. La matriz es de color gris oscuro, con vidrio y cristales.	



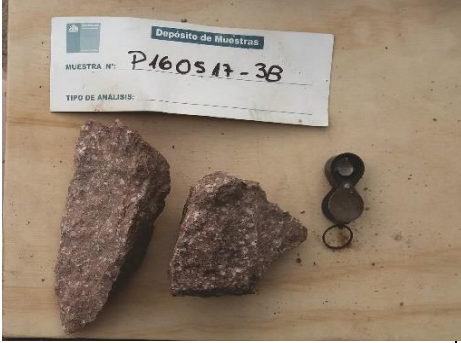

P150517-1B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo hasta 4 mm, anfíbol hasta 1 mm y biotitas menores a 2 mm. La matriz es de color gris muy oscuro, con vidrio y cristales alterados.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo hasta 3 mm, anfíbol y biotita menores a 1 mm. La matriz es de color rojiza, con vidrio y cristales alterados.	
P150517-3B	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo y biotitas hasta 2 mm y anfíbol menor a 1 mm. Hay muchos clastos con misma composición, pero diferentes tonos de matriz, con colores como el gris claro, gris oscuro y rosado.	
	Dacita porfírica de biotita	Bloques de lavas porfíricas muy alteradas, de color amarillento, silicificadas. Con cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol, todas con un tamaño máximo de 3 mm. Presencia de oquedades y arcilla por alteración.	

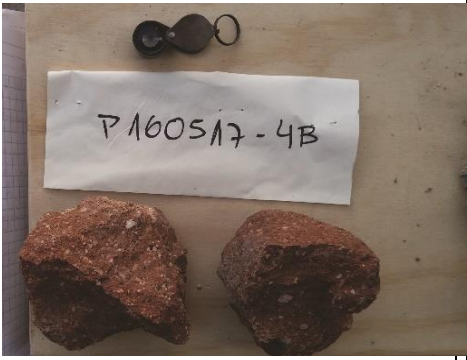
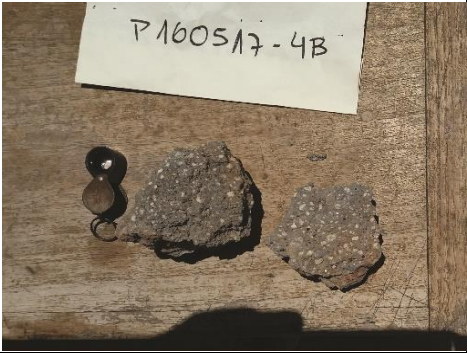

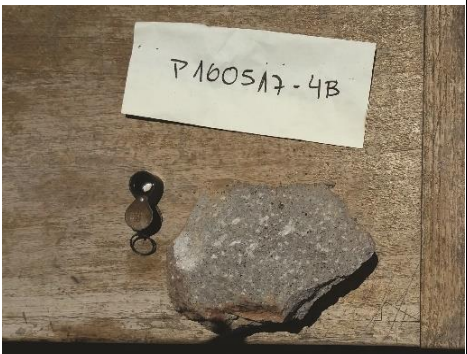
P150517-3B	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo y biotitas hasta 2 mm y anfíbol menor a 1 mm. La matriz es de color rojizo, totalmente alterada por óxidos de hierro.	
P160517-1B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 6 mm de diámetro, cuarzo hasta 5 mm, biotitas hasta 3 mm y anfíbol menor a 4 mm, además de epidota menor a 1 mm en amígdalas junto con cuarzo. La matriz es de color gris claro, con vidrio y cristales.	
	Toba cristalina dacítica	Bloques piroclásticos, de muy baja densidad, vesiculares. Presentan fragmentos líticos, que corresponden a lavas porfíricas oscuras; y cristales de biotita, cuarzo y plagioclasa de hasta 3 mm y anfíbol menor a 2 mm.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo hasta 4 mm, biotitas hasta 3 mm y anfíbol menor a 2 mm. La matriz se presenta oquerosa y de color rosáceo por la alteración, con vidrio y cristales alterados.	






P160517-1B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 6 mm de diámetro, cuarzo hasta 5 mm, biotitas hasta 3 mm y anfíbol menor a 4 mm, además de epidota menor a 1 mm en amígdalas junto con cuarzo. La matriz es de color gris claro alterada y oquerosa, con vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo hasta 3 mm, biotitas hasta 2 mm y anfíbol menor a 4 mm, además de epidota menor a 1 mm en amígdalas junto a cuarzo. La matriz de color rosáceo por la alteración, con vidrio y cristales alterados.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Clastos de lava porfírica muy alterados. Matriz de color café claro, muy oquerosa. Las pequeñas zonas sin alterar se asemejan a (I). Presencia de cuarzo, anfíbol, plagioclasa y biotita.	
P160517-2B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo y biotitas hasta 4 mm y anfíbol menor a 2 mm. La matriz de color gris claro, con vidrio y cristales.	




P160517-2B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo, biotitas y anfíbol hasta 4 mm. La matriz de color gris claro, con vidrio y cristales con bajo grado de alteración.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 7 mm de diámetro, cuarzo de hasta 4 mm, biotitas hasta 3 mm y anfíbol menor a 2 mm. La matriz de color gris rosáceo, con vidrio y cristales alterados.	
	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 7 mm de diámetro, cuarzo de hasta 5 mm, biotitas hasta 2 mm y anfíbol menor a 1 mm. La matriz de color rojiza a rosácea, con vidrio y cristales alterados.	
	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo de hasta 3 mm, biotitas hasta 1 mm y anfíbol menor a 1 mm. La matriz de color rojiza, con vidrio y cristales alterados.	

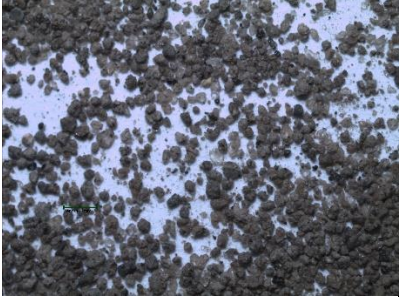
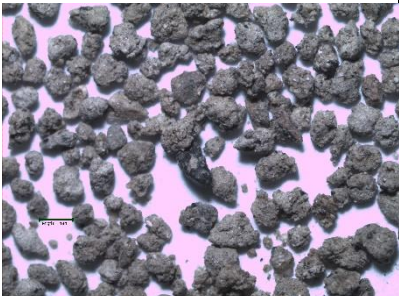

P160517-2B	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo de hasta 4 mm, biotitas hasta 3 mm y anfíbol menor a 2 mm. La matriz de color amarillento y rosáceo, con vidrio y cristales muy alterados. Oquerosos y arcillosos, por alto nivel de alteración.	
P160517-3B	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 8 mm de diámetro, cuarzo de hasta 4 mm, biotitas y anfíbol menores a 2 mm. La matriz de color rojiza, con vidrio y cristales alterados.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa y cuarzo con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, y biotitas y anfíbol menores a 2 mm. La matriz de color negro, con vidrio y cristales alterados. Presencia de arcillas por alteración.	
	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo de hasta 3 mm y biotitas menores a 2 mm. La matriz de color gris oscuro, con vidrio y cristales alterados.	

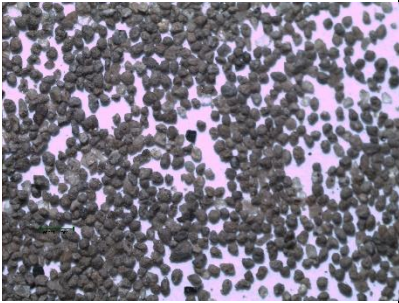
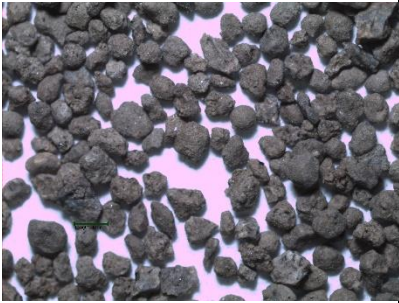

P160517-4B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a grueso. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 10 mm de diámetro, cuarzo de hasta 4 mm, biotitas hasta 2 mm y anfíbol menores a 3 mm. La matriz de color rojiza, con vidrio y cristales alterados.	
	Toba cristalina dacítica	Bloques piroclásticos de muy baja densidad y vesiculares. La matriz es de color gris claro. Presencia de cristales de plagioclasa de hasta 3 mm de diámetro, cuarzo de hasta 3 mm y biotita y anfíbol menores a 2 mm.	
	Dacita porfírica de biotita	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 4 mm de diámetro, cuarzo de hasta 3 mm y biotitas menores a 1 mm. La matriz de color gris oscuro, con vidrio y cristales.	
	Toba cristalina dacítica	Bloques piroclásticos de baja densidad y matriz gris claro, vesicular. Presencia de cristales de plagioclasa de hasta 5 mm de diámetro, cuarzo hasta 3 mm, biotita hasta 4 mm y anfíbol menor a 2 mm.	

P160517-5B	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 3 mm de diámetro, cuarzo de hasta 2 mm, biotitas y anfíbol menores a 1 mm. La matriz presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 3 mm de diámetro, cuarzo de hasta 2 mm, biotitas y anfíbol menores a 1 mm. La matriz presenta vidrio y cristales.	
	Dacita porfírica de anfíbol	Roca volcánica hipocristalina, porfírica, con tamaño de grano de fino a medio. Los cristales se ven hipidiomórficos. La mineralogía incluye cristales de plagioclasa con un tamaño de hasta 3 mm de diámetro, cuarzo de hasta 2 mm, biotitas y anfíbol menores a 1 mm. La matriz es de color rojiza y oquerosa, y presenta vidrio y cristales muy alterados.	



ANEXO B



Muestra	Tamaño	Descripción	Fotografía
P120517-1A	Arena Media	<p>Bajo contenido de fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, con cristales negros y translúcidos. Baja proporción de cristales de cuarzo translúcidos, y muy bajo contenido de cristales de biotita y anfíbol.</p> <p>Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subangulosos y sunredondeados. Fragmentos líticos grises, pardos y anaranjados, subangulosos y subredondeados, con cristales pequeños de color negros y translúcidos.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Gran cantidad de líticos subredondeados y subangulosos, de colores grises, rojizos, anaranjados, con cristales translúcidos, de biotita y anfíbol. Muy bajo contenido de cristales de cuarzo translúcidos.</p> <p>Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subangulosos y subredondeados.</p>	
	Gránulos	<p>Alto contenido de fragmentos líticos silicificados, amorfos y subangulosos de color blanco lechoso a amarillento.</p> <p>Fragmentos líticos de color rojizo, subangulosos, con pequeños cristales de color blanco y muy pocos de color negro. Bajo contenido de fragmentos líticos de color gris claro, rosáceos y pardos, subangulosos a angulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol, estos últimos a veces se presentan en forma de fenocristales.</p>	




P120517-2A	Arena Media	<p>Cristales separados de cuarzo translúcidos en alta proporción, además de anfíbol y biotita negros. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, con cristales negros pequeños. Fragmentos líticos agregados de cristales con cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita, subangulosos y subredondeados. Fragmentos líticos negros subredondeados con cristales negros y translúcidos (cuarzo). Muy baja proporción de fragmentos líticos silicificados, subredondeados, de color lechosos.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Muy bajo porcentaje de cristales de cuarzo translúcidos. Muy baja proporción de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechosos. Fragmentos líticos negros, subredondeados, con cristales pequeños translúcidos. Fragmentos líticos agregados de cristales (subangulosos y subredondeados) con cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita, en muy alta proporción</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos silicificados, amorfos, de color blanco lechoso, con pequeños cristales negros, algunos con fenocristales de anfíbol. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, con fenocristales de anfíbol. Fragmentos líticos subangulosos, de color gris claro y negro con fenocristales de plagioclasa y con cristales de biotita, cuarzo y anfíbol. Fragmentos líticos subredondeados y esféricos (pero en menor proporción que en 12-4A), de color pardo, con cristales pequeños decuarzo, biotita, anfíbol y plagioclasa.</p>	


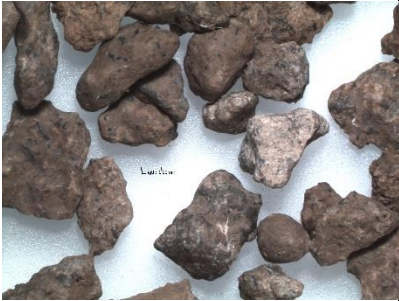
P120517-4A	Arena Media	<p>Cristales separados de cuarzo en alta proporción, además de biotitas negras y cobrizas, anfíboles negros y tabulares. Fragmentos líticos subredondeados y esféricos de color pardo con cristales negros, translúcidos y blanquecinos, en muy alta proporción. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos, "lajosos", granulares, con cristales blancos y translúcidos. Baja proporción de Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subredondeados.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Cristales translúcidos de cuarzo separados. Fragmentos líticos de color blanco lechoso, silicificados y subredondeados, en baja proporción. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos (tipo laja), con cristales negros y translúcidos, en muy baja proporción. Fragmentos líticos de color pardo, subredondeados, algunos redondeados esféricos, con cristales de cuarzo, biotita, plagioclasa y anfíbol (estos últimos de grandes medidas en algunos casos), muy alta proporción. Muy baja proporción de cristales de yeso amarillentos translúcidos. Fragmentos líticos de color pardo, como agregados de variados cristales muy pequeños de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos de color gris oscuro, subangulosos, con pequeños cristales negros. Fragmentos líticos subangulosos (como lajas) de color gris claro, con cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol. Fragmentos líticos de color pardo, subredondeados, con cristales de biotita, anfíbol, cuarzo y plagioclasa (estos último doa, a veces se presentan como fenocristales). Fragmentos líticos de color pardo y blanco lechoso, silicificados, subredondeados.</p>	

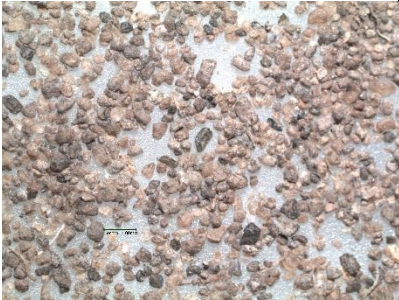






P120517-6A	Arena Media	<p>Cristales separados de cuarzo translúcidos en muy alta proporción, cristales de anfíbol y biotita, además de muy baja proporción de cristales verde oscuro, translúcidos y prismáticos de... Baja proporción de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subredondeados. Fragmentos líticos anaranjados y rojizos, subredondeados, con pequeños cristales negros. Fragmentos líticos de color gris claro y gris oscuro, subangulosos a angulosos, granulares, con cristales translúcidos y negros, algunos con fenocristales de anfíbol. Fragmentos líticos de color pardo, subangulosos y subredondeados, rodeados de un agregado cristalino con cuarzo, biotita, anfíbol y plagioclasa.</p>	
P120517-6A	Arena Gruesa	<p>Cristales de cuarzo translúcidos separados, muy baja proporción de cristales de anfíbol. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos, afaníticos, con pequeños cristales negros y translúcidos. Baja concentración de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subangulosos. Fragmentos líticos de color rojizo y anaranjado, afanítico, subangulosos, con cristales translúcidos y negros. Fragmentos líticos de color pardo, subangulosos y subredondeados, con pequeños cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol, algunos con fenocristales de anfíbol, otros cubiertos con un agregado de cristales con los minerales ya mencionados.</p>	


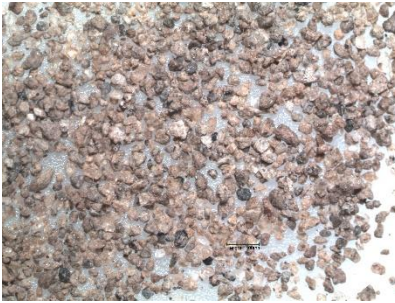
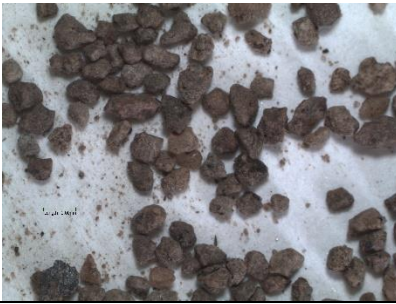
P120517-6A	Gránulos	<p>Muy baja concentración de fragmentos líticos rojizos, subangulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita.</p> <p>Fragmentos líticos de color gris claro y blanquecinos, subangulosos a angulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita.</p> <p>Fragmentos líticos pardos y café oscuro, subredondeados a redondeados, con alto contenido de cristales de anfíbol. Fragmentos líticos de color café lechosos, silicificados, subredondeados y subangulosos, con pequeños cristales de cuarzo, anfíbol, biotita y plagioclasa.</p>	
P120517-7A	Arena Media	<p>Alto contenido de cristales separados de cuarzo translúcidos, cristales de biotita (negros y cobrizos) y anfíboles, así como muy bajo porcentaje de cristales verdes, translúcidos y prismáticos de epidota. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, con cristales translúcidos y negros. Fragmentos líticos subredondeados, rojizos, con cristales negros (anfíbol). Bajo contenido de Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subredondeados. Fragmentos líticos pardos, subredondeados y subangulosos, granulares, algunos con cristales de anfíbol reconocibles.</p>	


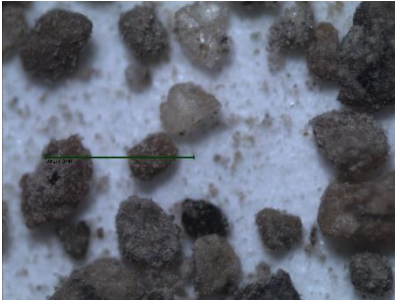


	<p>Arena Gruesa</p>	<p>Cristales translúcidos de cuarzo separados. Bajo contenido de fragmentos líticos rojizos, subredondeados, con cristales negros (anfíbol). Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, granulares, con cristales translúcidos y negros. Muy baja proporción de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, algunos con cristales de anfíbol. Fragmentos líticos de color gris oscuro, angulosos, granulares, con cristales translúcidos muy pequeños.</p>	
<p>P120517-7A</p>	<p>Gránulos</p>	<p>Fragmentos líticos rosáceos a pardos, subangulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita. Fragmentos líticos de color gris claro, subredondeados, granulares, con cristales translúcidos, blanquecinos y negros, y algunos granos con grandes cristales de biotita y cuarzo. Muy baja concentración de fragmentos líticos café lechosos, silicificados, con cristales de anfíbol y cuarzo. Fragmentos líticos rojizos, subredondeados, granulares, con pequeños cristales blanquecinos, translúcidos y negros.</p>	
<p>P120517-8A</p>	<p>Arena Media</p>	<p>Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subangulosos y subredondeados. Cristales separados de cuarzo translúcidos en alta proporción, cristales de biotita negros y cobrizos y anfíbol negros. Fragmentos líticos de color pardo y gris claro, subredondeados y redondeados, esféricos. Fragmentos líticos de color pardo y gris claro angulosos a subangulosos, granulares, con pequeños cristales negros y translúcidos.</p>	

P120517-8A	Arena Gruesa	<p>Fragmentos líticos de color pardo muy redondeados y esféricos con pequeños cristales translúcidos y negros. Muy baja concentración de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso y café lechoso, subredondeados y subangulosos. Cristales separados de cuarzo translúcidos. Fragmentos líticos de colores pardo y gris claro, subangulosos a subredondeados, algunos "lajosos", con pequeños cristales negros y translúcidos. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, granulares, con cristales negros y translúcidos.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos, algunos "lajosos", granulares, con cristales translúcidos y negros. Fragmentos líticos de color pardo, subredondeados a redondeados, algunos esféricos, con pequeños cristales negros. Fragmentos líticos de color pardo, angulosos a subangulosos ("lajosos"), con cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol, algunos con fenocristales de anfíbol.</p>	




P130517-3A	Arena Media	<p>Bajo contenido de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subredondeados. Cristales de cuarzo translúcidos en muy alta proporción, además de cristales de biotita y anfíbol negros, y en muy baja proporción, cristales de epidota de color verde oscuro, translúcidos y prismáticos. Fragmentos líticos de color rojizo, en baja proporción, subangulosos y subredondeados, granulares, con pequeños cristales translúcidos y negros. Fragmentos líticos de color pardo, subredondeados a redondeados esféricos, con pequeños cristales translúcidos y negros. Fragmentos líticos de color pardo y gris, subangulosos y subredondeados, granulares, con pequeños cristales translúcidos y negros.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Bajo contenido de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subredondeados a redondeados subsféricos. Cristales separados de cuarzo translúcido, y bajo contenido de cristales de anfíbol y biotita. Bajo contenido de fragmentos líticos de color rojizo, subangulosos y subredondeados, algunos vesiculares, con cristales translúcidos y negros muy pequeños. Fragmentos líticos grises y pardos, subangulosos y subredondeados, con cristales pequeños de cuarzo, anfíbol, plagioclasa y biotita, algunos con fenocristales de anfíbol.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos de color rojizo, en baja proporción, vesiculares, subredondeados, con cristales reconocibles de cuarzo, plagioclasa, y unos negros más pequeños. Fragmentos líticos pardos grises y rosáceos, subangulosos y subredondeados, granulares, con pequeños cristales de cuarzo, anfíbol, biotita y plagioclasa.</p>	




P130517-4A	Arena Media	<p>Alto contenido de cristales de cuarzo separados. Cristales de biotita, bajo contenido de anfíboles y muy bajo de cristales de epidota verdes, translúcidos y prismáticos. Fragmentos líticos pardos subredondeados (algunos esféricos), rodeados de agregados cristalinos con minerales blancos, negros y translúcidos. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, granulares, con cristales negros y translúcidos. Bajo contenido de fragmentos líticos rojizos, granulares, algunos con cristales grandes de anfíbol. Bajo contenido de fragmentos líticos subredondeados a redondeados, silicificados, de color blanco lechoso. Fragmentos líticos pardos y grises, subredondeados y subangulosos, granulares, algunos con cristales mayores de anfíbol.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Cristales de cuarzo translúcido separados y muy bajo contenido de cristales de biotita negros. Bajo contenido de fragmentos líticos café lechosos y blanco lechosos, subredondeados, silicificados. Bajo contenido de fragmentos líticos rojizos, granulares, con pequeños cristales translúcidos y negros. Fragmentos líticos pardos, subredondeados a redondeados y esféricos, rodeados de un agregado de cristales de cuarzo, anfíbol y biotita. Fragmentos líticos pardos y grises, granulares, subredondeados y subangulosos, algunos con grandes cristales de anfíbol.</p>	

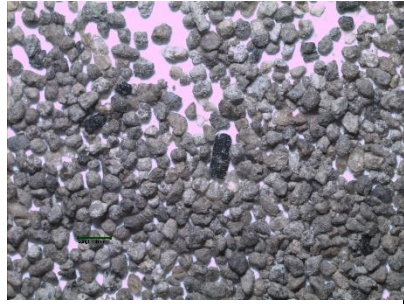
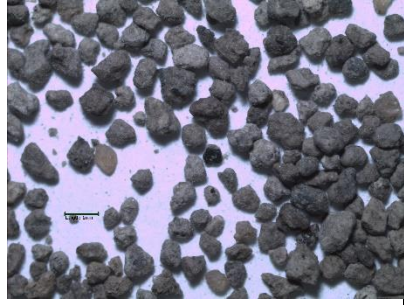

P130517-4A	Gránulos	<p>Fragmentos líticos subredondeados y subangulosos, silicificados, café lechosos, con cristales de anfíbol, biotita, plagioclasa y cuarzo.</p> <p>Fragmentos líticos rosáceos-grises, granulares, con cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol. Bajo porcentaje de fragmentos líticos rojizos, subredondeados, silicificados.</p> <p>Fragmentos líticos subredondeados y subangulosos, pardos, granulares, con cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol.</p>	
P130517-5A	Arena Media	<p>Bajo contenido de fragmentos líticos silicificados, blanco lechosos, subredondeados. Alto contenido de cristales de cuarzo separados, cristales de biotita negros, bajo contenido de anfíbol y muy bajo de cristales de epidota de color verde oscuro, translúcidos, prismáticos. Bajo contenido de fragmentos líticos rojizos, subangulosos, con pequeños cristales blancos. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos, granulares, con cristales pequeños translúcidos y blancos, y muy pocos cristales negros. Alto contenido en fragmentos líticos pardos rosáceos, subangulosos y subredondeados, con cristales translúcidos, blancos y algunos con cristales negros más grandes.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Cristales de cuarzo translúcidos separados. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, granulares, con cristales pequeños negros y blancos. Bajo contenido de fragmentos líticos de color café lechoso, silicificados, subredondeados. Bajo contenido de fragmentos líticos rojizos, afaníticos, con cristales negros muy pequeños. Alto contenido de fragmentos líticos pardos, subangulosos y subredondeados, con pequeños cristales negros, blancos y translúcidos.</p>	

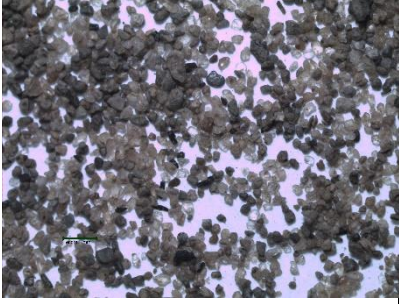
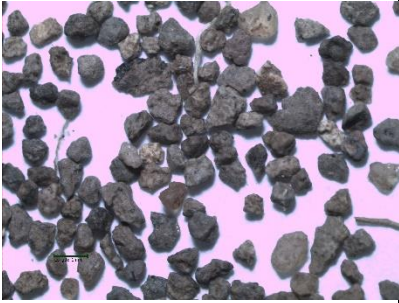
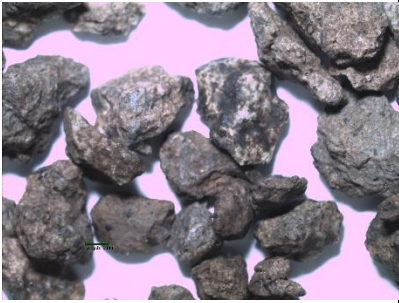
P130517-5A	Gránulos	<p>Muy bajo contenido de fragmentos líticos rojizos, subangulosos, granulares, con cristales negros (anfíbol) y blancos y translúcidos (cuarzo y plagioclasa). Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita. Alto contenido de fragmentos líticos pardos a café oscuro, subredondeados y subangulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y muy baja concentración de biotita.</p>	
P130517-6A	Arena Media	<p>Cristales translúcidos y translúcidos anaranjados de cuarzo, negros y cobrizos de biotita, tabulares, translúcidos de plagioclasa, y tabulares negro verdosos de anfíbol en muy baja proporción. Líticos subredondeados similares a los vistos en los tamaños mayores (de colores pardos, grises, rojizos y anaranjados).</p>	
	Arena Gruesa	<p>Fragmentos líticos subredondeados pardos y anaranjados (predominan) con cristales negros de biotita y anfíbol, y translúcidos y blancos de cuarzo y plagioclasa. Fragmentos líticos de color gris, granulares, con cristales negros y translúcidos de muy pequeño tamaño (casi irreconocibles). Cristales de cuarzo translúcidos separados.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos rojizos, subangulosos, con cristales negros tabulares de anfíbol. Baja proporción de fragmentos líticos granulares de color gris, con cristales translúcidos y negros. Cristales de cuarzo translúcido separados, en muy baja proporción.</p>	

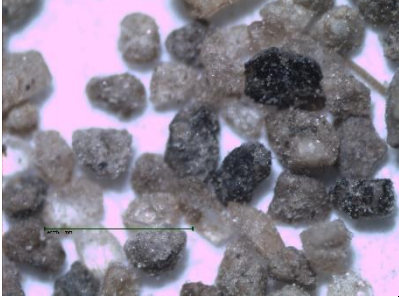





P140517-1A	Arena Media	<p>Cristales de cuarzo translúcidos separados, en muy alta proporción, cristales de biotita y anfíbol negros, y en muy baja proporción, cristales translúcidos de epidota.</p> <p>Fragmentos líticos grises y pardos, granulares, subredondeados.</p> <p>Fragmentos líticos rosáceos, subredondeados, con cristales negros y tabulares de mayor tamaño (anfíbol).</p>	
	Arena Gruesa	<p>Fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso, amorfos, en baja proporción. Cristales separados de cuarzo translúcido y biotitas negras laminares. Fragmentos líticos de color gris oscuro, vesiculares. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, con cristales negros de anfíbol y biotita. Fragmentos líticos rosáceos y pardos, subredondeados y subangulosos, con cristales de biotita, anfíbol, plagioclasa y cuarzo.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos subangulosos, pardos y grises, con cristales negros tabulares de anfíbol y biotita, y translúcidos y blancos de plagioclasa y cuarzo. Fragmentos líticos rosáceos con cxs de anfíbol, biotita, cuarzo y plagioclasa, con estos dos últimos muy bien conservados. Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, amorfos. Fragmentos líticos de color gris oscuro, subredondeados, vesiculares, con pequeños cristales de plagioclasa, cuarzo y anfíbol, además de incluir líticos silicificados lechosos.</p>	

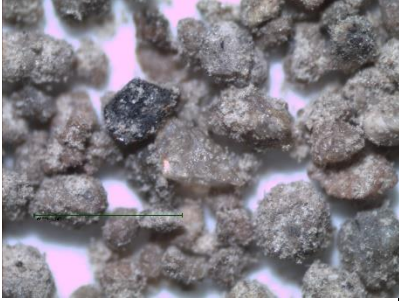


P140517-2A	Arena Media	<p>Alto contenido de cristales de cuarzo translúcidos separados, y menor cantidad de cristales de biotita y anfíbol. Muy baja concentración de cristales verdes prismáticos y translúcidos de epidota. Fragmentos líticos rojizos, subredondeados, granulares, afaníticos. Fragmentos líticos subangulosos, de color gris claro, con cristales translúcidos. Fragmentos líticos de color gris oscuro-negros, subredondeados, granulares. Baja concentración de fragmentos líticos de color blanco lechoso, silicificados y subredondeados.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Cristales translúcidos anranjados de cuarzo separados, y en muy baja proporción, cristales negros de biotita. Bajo contenido de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso y pardos, subangulosos. Fragmentos líticos rojizos, subangulosos, granulares y afaníticos. Fragmentos líticos de color gris claro, subredondeados, granulares, algunos con fenocristales negros de biotita y anfíbol.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos de color rojizo, subredondeados, granulares, con pequeños cristales negros de anfíbol y biotita, y translúcidos y blancos de cuarzo y plagioclasa. Fragmentos líticos silicificados café lechosos, subangulosos y subredondeados, algunos con cristales de anfíbol. Alto contenido de fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, con cristales de plagioclasa y cuarzo y fenocristales de anfíbol. Fragmentos líticos pardo-café oscuro, afaníticos, subredondeados, con cristales negros y blanquecinos muy pequeños. Bajo contenido de fragmentos líticos de color gris oscuro, subangulosos y porosos.</p>	




P140517-3A	Arena Media	Cristales de anfíbol negros y tabulares, biotitas negras laminares y cuarzo translúcido separados. Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso y amorfos, con cristales negros, en baja proporción. Fragmentos líticos grises, pardos, rojizos y blancos granulares con cristales negros y translúcidos	
	Arena Gruesa	Fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso, amorfos, en baja proporción. Cristales separados de cuarzo translúcidos y biotitas negras. Fragmentos líticos subredondeados y subangulosos, grises y distintos tonos de pardo con cristales de anfíbol, plagioclasa, cuarzo y biotita. Muy baja proporción de fragmentos líticos rojizos subangulosos.	
	Gránulos	Fragmentos líticos subredondeados y subangulosos, grises y distintos tonos de pardo con cristales de plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol. Muy baja proporción de fragmentos líticos rojizos, subangulosos, granulares, con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita. Fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso, con cristales de anfíbol tabulares y negros.	

P140517-4A	Arena Media	<p>Cristales separados de cuarzo translúcidos en gran proporción, cristales de anfíbol negros y biotita cobrizos y negros. Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso y amorfos. Fragmentos líticos subredondeados de color gris oscuro y claro, con pequeños cristales blanquecinos. Fragmentos líticos pardos, subredondeados, con cristales negros, translúcidos y blancos.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso y amorfos en alta proporción (comparado a la baja en que aparecen en otras muestras), algunos con presencia de cristales negros. Cristales translúcidos de cuarzo separados, en alta proporción. Fragmentos líticos subangulosos, de color gris oscuro y claro, porfíricos, con cristales negros de anfíbol. Fragmentos líticos subredondeados, pardos y anaranjados, porfíricos, con cristales negros de anfíbol</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos de color gris claro y oscuro, subangulosos, porfíricos, con cristales de anfíbol (de gran tamaño), biotita y cristales translúcidos y blancos de cuarzo y plagioclasa. Fragmentos líticos subredondeados, pardos y rojizos, porfíricos, con pequeños cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita. Fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso y pardo oscuro, amorfos, con pequeños cristales negros.</p>	




P140517-5A	Arena Media	<p>Muy alta concentración de cristales separados de cuarzo translúcidos. Cristales de biotita negros, laminares y de anfíbol negros y tabulares, ambos en menor proporción que el cuarzo. Fragmentos líticos grises, pardos y blanquecinos, subredondeados, con cristales de anfíbol, biotita y cuarzo. Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, en baja proporción.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Fragmentos líticos grises, subangulosos, granulares, en alta proporción. Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso y pardos, en baja proporción. Cristales separados de cuarzo translúcidos anaranjados y de biotita negros, laminares. Fragmentos líticos pardos y rojizos, subredondeados, con cristales negros.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos grises, granulares, subangulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita. Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso y pardos, con cristales negros. Fragmentos líticos pardos y rojizos, subredondeados, con cristales negros de anfíbol de mayor tamaño que en los fragmentos grises, además de cristales biotita, cuarzo y plagioclasa.</p>	



P140517-6A	Arena Media	<p>Alto contenido de cristales separados de cuarzo translúcido, cristales de anfíbol y biotita negros, muy baja proporción de cristales de episota verdes, traslúcidos y prismáticos. Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subredondeados. Fragmentos líticos pardos, subredondeados y subangulosos, granulares, algunos con fenocristales de anfíbol. Fragmentos líticos de color gris claro, granulares, subangulosos, con cristales pequeños translúcidos y negros.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso, subredondeados. Cristales de cuarzo translúcidos anaranjados separados. Fragmentos líticos pardos, subangulosos, granulares, algunos con fenocristales de plagioclasa. Fragmentos líticos de color gris claro, granulares, subangulosos y subredondeados.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos rojizos, subredondeados, granulares, con cristales de cuarzo, plagioclasa y anfíbol reconocibles. Fragmentos líticos pardos, subredondeados, con cristales negros y translúcidos muy pequeños. Fragmentos líticos pardos y gris claro, tipo "lajas" con cristales de cuarzo, plagioclasa y pequeños de anfíbol y biotita. Fragmentos líticos rosáceos, subredondeados, con grandes cristales de cuarzo, plagioclasa y anfíbol. Muy baja proporción de fragmentos líticos de sílice translúcidos y botroidales.</p>	



P140517-7A	Arena Media	<p>Cristales de cuarzo, biotita y anfíbol (estos últimos en menor proporción). Fragmentos líticos subredondeados, grises, rojizos, anaranjados y pardos. Los grises son más granulares. No se logran identificar los cristales de los líticos, pero se observan unos negros y otros translúcidos. Muy baja proporción de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Fragmentos líticos rojizos y pardos, subredondeados con cristales de cuarzo, anfíbol, biotita y plagioclasa. Fragmentos líticos grises, subangulosos, granulares, con pequeños cristales de cuarzo, biotita, anfíbol y plagioclasa. Fragmentos líticos silicificados de color naranja, amorfos, relativa mayor proporción que en otras muestras estudiadas. Cristales separados de cuarzo translúcidos.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos rojizos y pardos, subredondeados con cristales de cuarzo, anfíbol, biotita y plagioclasa. Fragmentos líticos grises, subangulosos, granulares, con pequeños cristales de cuarzo, biotita, anfíbol y plagioclasa. Fragmentos líticos silicificados de color naranja, amorfos, relativa mayor proporción que en otras muestras estudiadas.</p>	



P150517-1A	Arena media	Fragmentos líticos rojizos y pardos, subredondeados y subangulosos, con pequeños cristales negros y translúcidos, algunos con fenocristales de anfíbol. Baja proporción de fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso, subredondeados. Alto contenido de cristales separados de cuarzo translúcidos, además de cristales de biotita y anfíbol. Bajo contenido de fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos, con pequeños cristales negros y translúcidos.	
	Arena gruesa	Fragmentos líticos pardos y rojizos, subangulosos y subredondeados, granulares, con cristales negros tabulares de anfíbol. Bajo contenido de cristales de color gris claro, subangulosos a angulosos, con pequeños cristales translúcidos y negros y algunos con fenocristales de anfíbol. Bajo contenido de fragmentos líticos silicificados, de color lechoso, subredondeados. Cristales separados de cuarzo translúcidos.	
	Gránulos	Fragmentos líticos en alta concentración de color pardo, anaranjado, rojizo y rosáceo, subangulosos y subredondeados, granulares, con pequeños cristales de cuarzo, biotita, plagioclasa y anfíbol, y algunos con fenocristales con los mismos minerales. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos, granulares, con pequeños cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita.	

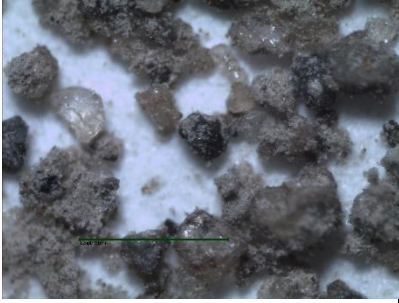







P150517-3A	Arena media	Fragmentos líticos grises, rojizos y pardos con cristales negros y translúcidos. Fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso, amorfos. Cristales separados de anfíbol y gran proporción de cuarzo traslúcido.	
	Arena gruesa	Cristales separados de cuarzo translúcidos. Fragmentos líticos de colores pardos y rojizos, con cristales de biotita (negros y cobrizos), anfíbol, plagioclasa y cuarzo. Fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso, amorfos, con cristales negros apenas reconocibles.	
	Gránulos	Fragmentos líticos rojizos con cristales de anfíbol tabulares y negros, y cristales de cuarzo, plagioclasa y biotitas negras y cobrizas. Fragmentos líticos de color pardo con cristales negros y blanquecinos muy pequeños. Menor proporción de fragmentos líticos blanquecinos de sílice amorfo con cristales negros de anfíbol.	



P160517-1A	Arena Media	<p>Alto contenido de cristales separados de cuarzo translúcidos, menor cantidad de cristales de biotita y anfíbol. Fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso y subredondeados. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, con cristales translúcidos y otros negros como biotita y anfíbol. Fragmentos líticos pardos, rosados y rojizos con cristales de anfíbol, biotita, cuarzo y plagioclasa, granulares, subredondeados y subangulosos. Fragmentos líticos negros, granulares, redondeados, no se le reconocen minerales por su tamaño inferior. En muy baja proporción, aparecen cristales de epidota de color verde translúcidos, prismáticos.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Alto contenido de cristales separados de cuarzo translúcidos. Fragmentos líticos subredondeados, silicificados, de color blanco lechoso. Fragmentos líticos grises, subangulosos, con mucho vidrio y cristales negros de anfíbol. Fragmentos líticos rojizos y pardos, subangulosos y subredondeados, granulares, algunos con cristales negros de biotita y anfíbol de mayor tamaño. Fragmentos líticos negros o gris oscuro, afaníticos, subangulosos con pequeños cristales blancos.</p>	

P160517-1A	Gránulos	<p>Fragmentos líticos rosados y grises, subangulosos, con grandes cristales de anfíbol, además de cuarzo, plagioclasa y biotita (esta última en pequeña proporción). Fragmentos líticos de color gris oscuro, subangulosos, granulares, con cuarzo y anfíbol reconocibles. Fragmentos líticos subredondeados, rojizos, con pequeños cristales de cuarzo, anfíbol, biotita y plagioclasa, en muy baja proporción. Fragmentos líticos subangulosos, silicificados, de color pardo lechoso, con alto contenido de anfíbol. Fragmentos líticos de color blanco rosáceo, subredondeados, vesiculares, con anfíbol, biotita y cuarzo.</p>	
P160517-2A	Arena Media	<p>Fragmentos líticos rojizos y negros, granulares, subredondeados, con cristales negros, blancos y translúcidos. Fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subredondeados. Alto contenido de cristales separados de cuarzo, cristales de biotita, y muy bajo contenido de cristales de anfíbol y de cristales de epidota verdes, translúcidos y prismáticos. Fragmentos líticos blanquecinos a gris claro, subangulosos, granulares, con cristales negros y blancos. Fragmentos líticos pardos y anaranjados, subredondeados y subangulosos, granulares, con pequeños cristales blancos.</p>	

P160517-2A	Arena Gruesa	<p>Muy bajo contenido de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subangulosos y subredondeados a redondeados. Cristales separados de cuarzo translúcidos. Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, algunos "lajosos", granulares, con cristales blancos y negros (anfíbol). Fragmentos líticos blanquecinos, subangulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa y anfíbol. Muy bajo contenido de fragmentos líticos de color rojo oscuro, subredondeados, con cristales negros de anfíbol. Fragmentos líticos de color crema, vesiculares, con cristales de cuarzo y anfíbol. Fragmentos líticos pardos, subredondeados y subangulosos, afaníticos y porfíricos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, con cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita. Muy baja concentración de fragmentos líticos subredondeados, de color café lechoso, con pequeños cristales negros. Fragmentos líticos rosáceos, subangulosos, vesiculares, con pequeños cristales negros y blancos. Fragmentos líticos pardos y grises-rojizos, subredondeados y subangulosos, granulares, con cristales de anfíbol, biotita, cuarzo y plagioclasa. Muy baja concentración de fragmentos líticos amarillentos, subredondeados, con cristales de cuarzo y plagioclasa, alterados.</p>	

P160517-3A	Arena Media	<p>Abundantes cristales separados de cuarzo translúcidos anaranjados o rosáceos. Cristales de plagioclasa translúcidas tabulares, y de anfíbol negros y tabulares, y de biotita negros y cobrizos. Presencia de cristales de epidota tabulares, negro-verdosos. Muy baja concentración de fragmentos líticos grises.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Fragmentos líticos subredondeados y redondeados rojizos, grises y pardos con cristales negros y translúcidos. Menor proporción de fragmentos líticos silicificados de color blanco lechoso y amorfos. Cristales separados de cuarzo translúcidos, biotitas cobrizas y negras laminares y anfíboles negros y tabulares.</p>	
	Gránulos	<p>Fragmentos líticos subredondeados, rojizos, pardos y grises verdosos (los cuales presentan mayor proporción de cristales que de matriz), con cristales translúcidos de cuarzo y plagioclasa, y negros tabulares de anfíbol. Otros fragmentos líticos en menor concentración, silicificados con cristales rojizos (fantasmas de plagioclasa).</p>	

P160517-4A	Arena Media	<p>Alto contenido de cristales de cuarzo, además de cristales de anfíbol y biotita. Alto contenido de fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos, granulares, con pequeños cristales negros y translúcidos, además de fenocristales de anfíbol.</p> <p>Fragmentos líticos rojizos, anaranjados y pardos, subangulosos y subredondeados, granulares, con pequeños cristales translúcidos y negros, y algunos con fenocristales de anfíbol. Muy bajo contenido de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, subredondeados a redondeados.</p>	
	Arena Gruesa	<p>Cristales separados del cuarzo translúcidos y muy bajo contenido de cristales de biotita. Muy alto contenido de fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos, granulares, con cristales pequeños translúcidos y negros, y fenocristales de anfíbol. Fragmentos líticos rojizos y anaranjados, subredondeados, granulares, con cristales pequeños de color negro y translúcidos.</p>	
	Gránulos	<p>Muy alto contenido de fragmentos líticos de color gris claro y oscuro, subangulosos y angulosos, porfíricos, con fenocristales de cuarzo, anfíbol y plagioclasa, y pequeños cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíbol y biotita. Bajo contenido de fragmentos líticos rojizos subangulosos y subredondeados, con cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol.</p>	

P160517-5A	Arena Media	Muy bajo contenido de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso, redondeados. Alto contenido de cristales separados de cuarzo translúcido, cristales de anfíbol y biotita (negros y cobre), muy bajo contenido de cristales de epidota verdes translúcidos. Fragmentos líticos de color gris claro, granulares, con pequeños cristales translúcidos y negros, algunos con fenocristales de anfíbol. Fragmentos líticos rojizos y negros con cristales rojos y negros, granulares. Fragmentos líticos pardos, subredondeados, granulares, con pequeños cristales translúcidos y negros.	
	Arena Gruesa	Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos a angulosos, granulares, con pequeños cristales translúcidos y negros. Baja proporción de fragmentos líticos rojizos a negros, subredondeados a redondeados, con cristales negros y rojos. Cristales separados de biotita y cuarzo. Fragmentos líticos de colores pardos y crema, subredondeados, granulares, algunos con fenocristales de anfíbol. Baja proporción de fragmentos líticos silicificados, de color blanco lechoso y pardos, algunos con cristales de anfíbol.	
	Gránulos	Fragmentos líticos de color gris claro, subangulosos, con cristales de anfíbol (algunos de gran tamaño), cuarzo, plagioclasa y biotita. Fragmentos líticos redondeados y subredondeados de sílice blanquecino. Fragmentos líticos pardos y blanco lechosos, silicificados, con pequeños cristales de anfíbol. Fragmentos líticos grises, subangulosos, afaníticos, con pequeños cristales negros.	