

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y
PETRÓLEOS**

**CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL LAHAR
DEL VALLE DE LOS CHILLOS (CVL) EN EL FLANCO NORTE
DEL VOLCÁN COTOPAXI**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO**

OPCIÓN: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

JUAN PABLO REA VÁSQUEZ

jpabloreav@gmail.com

DIRECTORA: MSC. PATRICIA ANN MOTHES

pmothes@igepn.edu.ec

CO-DIRECTOR: MSC. JORGE ARTURO AGUILAR JARAMILLO

jaguilar@igepn.edu.ec

Quito, mayo 2023

© Escuela Politécnica Nacional, 2023

Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Juan Pablo Rea Vásquez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado previamente para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



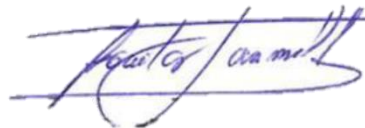
Juan Pablo Rea Vásquez

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Pablo Rea Vásquez, bajo nuestra supervisión.



MSc. Patricia Ann Mothes
DIRECTORA



MSc. Jorge Arturo Aguilar Jaramillo
CODIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

*A mis padres, Pablo y Yolanda,
por su amor y apoyo incondicional en todo tiempo; y a mi querido hermano
Álvaro.*

*A la MSc. Patricia Mothes,
por haber auspiciado este trabajo de titulación y por su valioso tiempo, sabiduría
y dirección impartida.*

*Al MSc. Jorge Aguilar,
por compartir sus conocimientos en SIG y su colaboración en este trabajo de
investigación.*

*A la Escuela Politécnica Nacional e Instituto Geofísico;
sus autoridades, profesores e investigadores.*

*A todas las personas con quienes compartí durante mi formación
académica y llegaron a convertirse en mis amigos.*

DEDICATORIA

*A Dios, Hacedor de todo el Universo,
quien me permite ser partícipe de su maravillosa creación.*

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN	III
CERTIFICACIÓN.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
DEDICATORIA.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
ÍNDICE DE ANEXOS	XV
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT	XVII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	3
1.3.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	4
1.3.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	4
1.4 ALCANCE.....	5
1.5 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	6
CAPÍTULO 2	8
2. MARCO TEÓRICO	8

2.1	CONTEXTO GEODINÁMICO.....	8
2.2	GEOLOGÍA DEL VOLCÁN COTOPAXI	11
2.2.1	GENERALIDADES	11
2.2.2	HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI	13
2.2.3	FASE RIOLÍTICA DEL COTOPAXI I	13
2.2.4	FASE ANDESÍTICA DEL COTOPAXI I	15
2.2.5	UNIDADES CANGAHUA Y CHALUPAS	15
2.2.5.1	UNIDAD CANGAHUA	16
2.2.5.2	UNIDAD IGNIMBRITA DE CHALUPAS.....	16
2.2.6	COTOPAXI II-A	16
2.2.7	COTOPAXI II-B.....	17
2.2.8	PERIODO HISTÓRICO.....	19
2.2.8.1	ERUPCIÓN DE 1877.....	19
2.2.9	ERUPCIÓN DE 2015	20
2.2.10	ACTIVIDAD DE 2022 – 2023	21
2.3	LAHARES	22
2.3.1	CLASIFICACIÓN DE LOS LAHARES SEGÚN SU ORIGEN	23
2.3.1.1	LAHARES PRIMARIOS.....	24
2.3.1.2	LAHARES SECUNDARIOS	25
2.4	CHILLOS VALLEY LAHAR	27
2.5	CARACTERÍSTICAS DEL CHILLOS VALLEY LAHAR	28
	CAPÍTULO 3	30
3.	METODOLOGÍA.....	30
3.1	RECONOCIMIENTO DE CAMPO	30
3.2	OBTENCIÓN DE DATOS GRANULOMÉTRICOS	32
3.2.1	CARGA DE IMÁGENES EN EL SOFTWARE.....	32

3.2.2	CALIBRACIÓN DE LOS EJES.....	32
3.2.3	ADQUISICIÓN DE DATOS.....	33
3.2.4	MANEJO Y TRATAMIENTO DE DATOS DIGITALIZADOS.....	34
3.3	PARÁMETROS PARA ESTUDIOS GRANULOMÉTRICOS.....	34
3.3.1	MEDIANA (Md).....	35
3.3.2	MEDIA (Mz).....	35
3.3.3	DESVIACIÓN ESTÁNDAR GRÁFICA INCLUSIVA (σ_I).....	36
3.3.4	ASIMETRÍA GRÁFICA INCLUSIVA (Sk_I).....	36
3.3.5	CURTOSIS GRÁFICA (K_G).....	37
3.4	ELABORACION DE UN STORYMAP.....	38
CAPÍTULO 4.....		39
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
4.1	GRANULOMETRÍA.....	39
4.1.1	FACIES PROXIMALES.....	39
4.1.2	FACIES MEDIAS.....	42
4.1.3	FACIES DISTALES.....	45
4.1.4	COMPARACIONES GRANULOMÉTRICAS.....	47
4.2	PETROGRAFÍA DEL DEPÓSITO Y OTROS ELEMENTOS ENCONTRADOS.....	52
4.3	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL.....	54
4.4	PUBLICACIÓN DEL STORYMAP.....	56
CAPÍTULO 5.....		57
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
5.1	CONCLUSIONES.....	57
5.2	RECOMENDACIONES.....	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de ubicación de la zona de estudio, donde se señala la ubicación de las muestras, poblados, volcanes, zonas urbanas y red hidrográfica.	7
Figura 2.1. Contexto geodinámico del Ecuador. La placa de Nazca junto con el Ridge de Carnegie subduce en latitudes ecuatoriales a una tasa de 56 mm/año. El Bloque Nor-Andino (NAB) se está moviendo hacia el NNE a una tasa de 9 mm/año a lo largo del sistema de fallas CCPP que continúa en Colombia como la falla de Algeciras (línea gruesa roja). (a) Perfil topográfico A-B que muestra el relieve de los Andes ecuatorianos centrales. (b) Ubicación en América del Sur. Tomado de Yepes et al. (2016).....	8
Figura 2.2. Volcanes del Ecuador en [A] el continente, y [B] en las Islas Galápagos. Los volcanes extintos se muestran en verde, los activos en amarillo y los que están en erupción (2021), en rojo. Las letras blancas en recuadros negros representan los diferentes tipos de monitoreo que se llevan a cabo en los volcanes: S: Sísmico (sísmica e/o infrasonido), D: Geodesia (GPS e/o inclinómetro), Q: Geoquímica (gas, fluidos), T: Térmica/visual (aérea y/o fija). Tomado de Ramon et al. (2021).	10
Figura 2.3. Vista aérea de la cara norte del volcán Cotopaxi cubierto por una importante capa de hielo glaciar cuyo volumen se estima en aprox. 520 millones de m ³ . El cono volcánico casi simétrico tiene una base de 16 x 19 km, un relieve pronunciado que alcanza de 2000 a 3000 metros desde su base hasta la cima y pendientes de hasta 30°. (Fotografía de Jorge Anhalzer).....	12
Figura 2.4. Mapa geológico simplificado de los depósitos riolíticos y andesíticos del Cotopaxi I. También se muestra el área aproximada del depósito de la ignimbrita de Chalupas. Modificado de Hall y Mothes (2008).	14
Figura 2.5. Mapa geológico simplificado de los depósitos asociados a la erupción riolítica, colapso de flanco (avalancha de escombros) y el lahar del Valle de Los Chillos ocurridos hace aprox. 4500 años AP en el “Cotopaxi II-A”. Se muestra también los depósitos de las coladas de lava que ocurrieron entre 4100 años AP y 1200 años AP., cuando comenzó a construirse el “Cotopaxi II-B”. Modificado de Hall y Mothes (2008).....	18

Figura 2.6. Actividad volcánica del volcán Cotopaxi en agosto de 2015. Se observa una columna eruptiva con contenido moderado de ceniza en dirección hacia el occidente-suroccidente. (Fotografía de P. Mothes, IGEPN).....	20
Figura 2.7. (a) Emisión de ceniza del volcán Cotopaxi en febrero de 2023. Se observa una columna eruptiva con en dirección hacia el oriente. (Fotografía de Roberto Valdez). (b) Caída de ceniza en diciembre de 2022 en el valle de los Chillos.	21
Figura 2.8. Vista aérea de los restos del pueblo de Armero, Colombia, devastado por un lahar asociado con la erupción del Nevado del Ruiz en noviembre de 1985. (Fotografía de R.J. Janda, Servicio Geológico de los Estados Unidos).	23
Figura 2.9. Esquema de la formación de un lahar primario durante una erupción lo suficientemente fuerte para producir fusión de la capa glaciar. Tomado de Andrade et al. (2005).	24
Figura 2.10. Lago del cráter Ruapehu después de la erupción freatomagmática de septiembre de 2007 y el lahar formado. (Fotografía de Karoly Nemeth).....	25
Figura 2.11. Esquema de la formación de un lahar secundario durante un periodo de lluvias intensas, estas remobilizan el material piroclástico suelto depositado previamente. Tomado de Andrade et al. (2005).	26
Figura 2.12. Mapa representativo que muestra los límites del CVL y secciones transversales de flujo, así como los hummocks de avalancha y el depósito de cenizas del Cañón Colorado. Tomado de Mothes et al. (1998).	28
Figura 2.13. (a) Afloramiento localizado a 200 m. del parque de Conocoto, con dirección NE-SO, se observan tres unidades estratigráficas desde la base hacia el techo: Fm. Cangahua, Paleosuelo y el depósito del CVL. (b) Bolas de Cangahua (<i>Coprinisphaera Ecuadoriensis</i>).	29
Figura 3.1. Mapa de ubicación de las muestras utilizadas en este estudio (P: Proximales, M: Medias, D: Distales) y las rutas de observación realizadas con el fin de identificar el depósito CVL en la zona Norte del volcán Cotopaxi.	31
Figura 3.2. Imagen cargada en el software WebPlotDigitizer donde se han calibrado los ejes.	33

Figura 3.3. Imagen cargada en el software WebPlotDigitizer que muestra los puntos con información que va a ser extraída.....	33
Figura 3.4. Ilustración esquemática que muestra el valor de la mediana (Φ_{50}) en una curva de frecuencia acumulada. Modificado de Cheel (2021).....	35
Figura 3.5. Ilustración esquemática que muestra una distribución simétrica en una curva de frecuencia. Mz: media. Md: mediana (Φ_{50}). Mo: moda. Sk: asimetría. Modificado de Cheel (2021).	36
Figura 3.6. Interfaz de usuario gráfica que muestra la estructura de un StoryMap.....	38
Figura 4.1. Curvas granulométricas de las facies proximales en el CVL. Porcentaje de material que atraviesa cada tamiz (wt. %) vs. abertura del tamiz (mm) representado en formato “log-normal”.....	40
Figura 4.2. Histogramas de distribución para las facies proximales del CVL. wt. %: porcentaje en peso. Phi (Φ): escala del tamaño de grano.....	41
Figura 4.3. Curvas granulométricas de las facies medias en el CVL. Porcentaje de material que atraviesa cada tamiz vs. abertura del tamiz (mm) representado en formato “log-normal”.....	43
Figura 4.4. Histogramas de distribución para las facies medias del CVL. wt. %: porcentaje en peso. Phi (Φ): escala del tamaño de grano.....	44
Figura 4.5. Curvas granulométricas de las facies medias en el CVL. Porcentaje de material que atraviesa cada tamiz vs. abertura del tamiz (mm) representado en formato “log-normal”.....	46
Figura 4.6. Histogramas de distribución para las facies distales del CVL. wt. %: porcentaje en peso. Phi (Φ): escala de tamaño de grano.....	47
Figura 4.7. Distribución del tamaño de grano de los depósitos laháricos (a) CVL, Cotopaxi; (b) Lahar Osceola, Mt. Rainier vs. la distancia (km) río abajo desde la fuente del lahar que muestra el porcentaje en peso de grava, arena y finos. Datos de lahar Osceola, Mt. Rainier tomados de Vallance y Scott (1997).	48
Figura 4.7 (Continuación). Distribución del tamaño de grano de los depósitos laháricos (c) Lahar de 1877, Cotopaxi vs. la distancia (km) río abajo desde la fuente del lahar que	

muestra el porcentaje en peso de grava, arena y finos. Datos de lahar 1877, Cotopaxi tomados de Mothes et al. (2004).	49
Figura 4.8. Método de clasificación de flujos propuesto por Pierson y Scott (1999). En (a) muestras de las facies proximales, medias y distales del depósito CVL. En (b) para el lahar Osceola, Mt. Rainier (azul) y lahar de 1877, Cotopaxi (gris). Datos de lahar Osceola, Mt. Rainier tomados de Vallance y Scott (1997). Datos de lahar 1877, Cotopaxi tomados de Mothes et al. (2004).	50
Figura 4.9. Afloramientos de dos depósitos laháricos del volcán Cotopaxi. (a) Chillos Valley Lahar a 100 m. del parque de Conocoto. (b) Lahar histórico de 1877 en las inmediaciones del Parque Nacional Cotopaxi.	51
Figura 4.10. Principales componentes líticos del depósito CVL. (a) Riolita. (b) Vitrófiro riolítico. (c) Andesita. (d) Dacita. (e) Obsidiana. (f) Pómez. (g) Escoria negra. (h) Escoria rojiza.	53
Figura 4.11. Otros elementos encontrados en el depósito CVL. (a) Restos de cerámica. (b) Restos de troncos carbonizados. (c) Coágulos de suelo.	54
Figura 4.12. Mapa de distribución espacial del depósito CVL en la ruta norte de flujo, donde se señala la ubicación de las muestras utilizadas en este estudio. Modificado de Mothes et al. (1998), Andrade et al. (2005), Hall y Mothes (2008).	55
Figura 4.13. Imagen captura del StoryMap publicado online.	56
Figura A1. Procedimiento para realizar el análisis granulométrico por tamizado. (a) Introducción de la muestra en la columna de tamices. (b) Pesaje de la porción de muestra retenida en cada tamiz.	70
Figura A2. Afloramiento del CVL en la vía a Machachi, punto de muestreo M-5.	96
Figura A3. Afloramiento del CVL en Gütig Alto, punto de muestreo M-6.	96
Figura A4. Afloramiento del CVL en Conocoto, punto de muestreo M-7, M-8 y M-9.	97
Figura A5. Afloramiento del CVL en la quebrada Punhuaycu – Conocoto.	97
Figura A6. Afloramiento del CVL en La Balvina, punto de muestreo M-10.	98
Figura A7. Afloramiento del CVL y series del Cañon Colorado al oeste de Ingaloma. (Fotografía: P. Mothes).	98

Figura A8. Afloramiento del CVL en Aloag, punto de muestreo M-15.	99
Figura A9. Afloramiento del CVL en Cumbayá, punto de muestreo D-16.	99
Figura A10. Afloramiento del CVL en Tumbaco, cercano al punto de muestreo D-17. .	100
Figura A11. Afloramiento del CVL en Cashapamba, punto de muestreo M-19 y M-20.	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Fórmulas de los parámetros estadísticos gráficos comunes para estudios granulométricos. Φ_n es el percentil n de la distribución de tamaño en la curva de frecuencia acumulada. Tomado de Folk y Ward (1957).....	34
Tabla 3.2. Descripción del grado de selección granulométrica según el valor de σ_I . Tomado de Folk y Ward (1957).	36
Tabla 3.3. Descripción del coeficiente de asimetría según el valor de Sk_I . Tomado de Folk y Ward (1957).....	37
Tabla 3.4. Descripción del coeficiente de curtosis según el valor de K_G . Tomado de Folk y Ward (1957).....	37
Tabla 4.1. Parámetros estadísticos de (Folk y Ward, 1957) y contenido (wt. %) en las facies proximales del CVL. Mz: media. Md: mediana (Φ_{50}). σ_I : desviación estándar gráfica inclusiva (sorteo). Sk_I : asimetría inclusiva gráfica. K_G : curtosis gráfica.	40
Tabla 4.2. Parámetros estadísticos de (Folk y Ward, 1957) y contenido (wt. %) en las facies proximales del CVL. Mz: media. Md: mediana (Φ_{50}). σ_I : desviación estándar gráfica inclusiva (sorteo). Sk_I : asimetría inclusiva gráfica. K_G : curtosis gráfica.	42
Tabla 4.3. Parámetros estadísticos gráficos de (Folk y Ward, 1957) en las facies distales del CVL. Mz: media. Md: mediana (Φ_{50}). σ_I : desviación estándar gráfica inclusiva (sorteo). Sk_I : asimetría inclusiva gráfica. K_G : curtosis gráfica.	46

Tabla 4.4. Principales componentes líticos del depósito CVL. (a) Riolita. (b) Vitrófiro riolítico. (c) Andesita. (d) Dacita. (e) Obsidiana. (f) Pómez. (g) Escoria negra. (h) Escoria rojiza.	53
---	----

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I. SÍNTESIS DE LA HISTORIA ESTRATIGRÁFICA DEL VOLCÁN COTOPAXI (Hall y Mothes, 2008).	69
ANEXO II. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO.....	70
ANEXO III. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS PROPORCIONADOS.....	71
ANEXO IV. TABLA DE COORDENADAS DE LAS MUESTRAS	94
ANEXO V. HISTOGRAMAS DE DISTRIBUCIÓN PARA LAS MUESTRAS DEL LAHAR OSCEOLA (Vallance y Scott, 1997).....	95
ANEXO VI. MUESTRAS DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS PARA EL LAHAR DE 1877 EN EL VALLE DE CHILLOS (Mothes et al., 2004).....	95
ANEXO VII. AFLORAMIENTOS DEL CVL	96

RESUMEN

El Cotopaxi es un gran estratovolcán activo que se ubica en la cordillera oriental de los Andes ecuatorianos, entre las provincias de Pichincha y Cotopaxi, a 60 km al sureste de Quito y a 45 km al norte de Latacunga. El edificio actual, aproximadamente cónico, es el resultado de innumerables erupciones que ocurrieron en el pasado. Debido a su cobertura glaciaria, los lahares primarios han sido fenómenos muy comunes registrados en todos los ciclos eruptivos de los últimos 2000 años; por lo que no se descarta que puedan volver a ocurrir.

Hace aproximadamente 4500 años AP ocurrió la última erupción riolítica de carácter catastrófico, la cual ocasionó el colapso sectorial del flanco norte y noreste del volcán, dando lugar a una enorme avalancha de escombros y seguido de un gigantesco lahar denominado "The Chillos Valley Lahar" (CVL), el cual descendió por su sistema fluvial norte hasta el Océano Pacífico. Esta investigación busca estudiar el lahar mediante la caracterización granulométrica de su depósito y la cartografía geológica. Los ensayos granulométricos y datos proporcionados para este estudio fueron analizados en base a parámetros estadísticos que describen con mayor precisión la distribución del tamaño de grano de los componentes.

La granulometría global del depósito CVL evidencia que los granos de tamaño de arena son la fracción dominante con el 49.4 wt. %. Las muestras del depósito CVL se sitúan en la categoría de "flujos de escombros no cohesivos", que se caracterizan por tener un mal sorteo, son masivos y generalmente matriz-soportados. Las rutas de observación, así como las campañas de campo permitieron corroborar que el depósito es homogéneo y que carece de gradación interna. En la zona de estudio, el depósito ocupa un área aproximada de 388 km²; por lo que se estima un volumen seco de aprox. 0.77 km³.

PALABRAS CLAVE: COTOPAXI, LAHAR, VALLE DE LOS CHILLOS, GRANULOMETRÍA

ABSTRACT

Cotopaxi is a large active stratovolcano located in the eastern cordillera of the Ecuadorian Andes, between the provinces of Pichincha and Cotopaxi, 60 km southeast of Quito and 45 km north of Latacunga. The current edifice, approximately conical, is the result of innumerable eruptions that occurred in the past. Due to its glacial cover, primary lahars have been very common phenomena recorded in all the eruptive cycles of the last 2000 years; so, it is not ruled out that they can happen again.

Approximately 4500 years BP, the last catastrophic rhyolitic eruption occurred, which caused the sectoral collapse of the north and northeast flank of the volcano, generating to a huge avalanche of debris and followed by a gigantic lahar called "The Chillos Valley Lahar" (CVL), which descended through its northern fluvial system to the Pacific Ocean. This research seeks to study the lahar through the granulometric characterization of its deposit and geological mapping. The granulometric tests and data provided for this study were analyzed based on statistical parameters that more accurately describe the grain size distribution of the components.

The global granulometry of the CVL deposit shows that the sand size grains are the dominant fraction with 49.4 wt. %. Samples from the CVL deposit fall into the category of "non-cohesive debris flows", which are characterized by poor draw, massive, and generally matrix supported. The observation routes, as well as the field campaigns, allowed us to confirm that the deposit is homogeneous and that it lacks internal gradation. In the study area, the deposit occupies an approximate area of 388 km²; therefore, a dry volume of approx. 0.77 km³.

KEYWORDS: COTOPAXI, LAHAR, CHILLOS VALLEY, GRANULOMETRY

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El estudio acerca de los peligros volcánicos es importante para entender mejor los procesos que los caracterizan con el fin de reducir las pérdidas tanto humanas como económicas debidas a la acción de dichos peligros. Esto permite una mejora en técnicas de construcción, planificación del uso de tierras y contribuye al desarrollo de mejores planes de evacuación y mitigación de desastres (Vera, 2000). El Ecuador, por su ubicación en un margen de convergencia (zona de subducción), se encuentra en una zona de alta actividad sísmica y volcánica.

El peligro relacionado con la inestabilidad de un edificio volcánico comprende dos fenómenos importantes: 1) el colapso del edificio con generación de avalanchas de escombros y, 2) la transformación de estas avalanchas en lahares primarios (Scott et al., 1995). En el volcán Cotopaxi, debido a su cubierta glaciaria, los lahares primarios han sido fenómenos muy comunes registrados en todos los ciclos eruptivos de los últimos 2000 años (Mothes et al., 2002).

Hace 4500 años antes del presente (A.P.), ocurrió un gigantesco flujo de escombros no cohesivo generado por el Cotopaxi en una fase eruptiva riolítica catalogado como uno de los mayores flujos de escombros del Holoceno en área y volumen hasta ahora reconocido en los Andes del norte (Mothes et al., 1998). Esta erupción ocasionó el colapso sectorial del flanco norte y noreste del volcán, dando lugar a una enorme avalancha de escombros y seguido de un gigantesco lahar (espesor promedio de 2 m, área de $\sim 440 \text{ km}^2$ y volumen $\sim 3.8 \text{ km}^3$) denominado "*The Chilllos Valley Lahar*" (CVL), el cual descendió por su sistema fluvial norte hasta el Océano Pacífico (Hall y Mothes, 2008).

En el presente trabajo de titulación se utilizarán análisis granulométricos realizados para el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la EPN de 23 muestras recolectadas por los investigadores Dr. Minard L. Hall y MSc. Patricia A. Mothes durante 2012 – 2013 con el fin de evaluar y caracterizar el depósito del CVL. Además, se determinarán las similitudes granulométricas del CVL con otros depósitos de lahares similares y se comparará la granulometría del CVL con la del lahar histórico de 1877 del volcán Cotopaxi; estos resultados serán presentados en un StoryMap elaborado en *ArcGIS*.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el Lahar del Valle de los Chillos (CVL) mediante la caracterización granulométrica de su depósito y la cartografía geológica.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las características granulométricas del depósito del CVL.
- Determinar las similitudes granulométricas del CVL con otro depósito de lahar de este tipo.
- Comparar la granulometría del CVL con un lahar histórico del volcán Cotopaxi.

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Los lahares se definen como una mezcla saturada de escombros volcánicos y agua que se desplazan a altas velocidades y recorren grandes distancias arrastrando todo el material que se encuentra a su paso, por lo que pueden llegar a ser muy destructivos (Ettinger et al., 2014). Para caracterizar un depósito lahárico, los análisis granulométricos constituyen una herramienta bastante necesaria para obtener información importante acerca de su origen, composición, comportamiento y propiedades mecánicas (Scott et al., 1995). Los resultados de los análisis permiten conocer el tamaño de grano de las diferentes partículas que componen el depósito con lo cual se define el tipo de flujo y clasificar en las siguientes categorías reológicas:

- Flujos de escombros (debris flows): cuando el flujo contiene más del 60% vol. u 80% w. de sedimentos. Los depósitos tienen un mal sorteo, son masivos y generalmente son matriz-soportados con tamaño de grano predominante mayor a 2 mm (Smith, 1986).
- Flujos hiperconcentrados (hyperconcentrated flows): aquellos con 20 - 60% vol. de sedimentos. Los depósitos son moderadamente sorteados, masivos y clasto-soportados con tamaño de grano entre 0.5 – 2 mm (Pierson y Costa, 1987).
- Flujos de corriente (streamflows): aquellos con menos del 20% vol. de sedimentos. Los depósitos son bien sorteados y clasto-soportados con una matriz más fina de arena y tamaño de grano predominante entre 0.125 – 0.5 mm (Jones, 2016).
- Flujos de lodo (mudflows): como una clase distinta de flujos cohesivos con 20 - 40% vol. de sedimentos. Los depósitos muestran una mejora progresiva aguas abajo en la clasificación, aumento de arena, grava y disminución de arcilla (Vallance y Scott, 1997).

Al identificar un depósito lahárico y realizar los respectivos análisis se intenta entender la dinámica de los lahares que afectaron en el pasado, determinar

periodos de recurrencia y desarrollar mejores planes de evacuación y mitigación de desastres frente a estos fenómenos.

1.3.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

Los flujos de lodo y escombros (lahares) se caracterizan por estar conformados de material pétreo de diferentes granulometrías y tipos de rocas, por lo que son muy irregulares en cuanto a la estructura del depósito y pueden mostrar variaciones en cuanto a la clasificación del tamaño de grano relacionado con la distancia. Los análisis granulométricos constituyen herramientas valiosas para caracterizar estos depósitos, ya que permite clasificarlos según su composición: flujos de escombros o flujos hiperconcentrados (Cronin et al., 1997).

Además, la distinción entre lahar cohesivo, lahar no cohesivo y avalancha de escombros es importante en la evaluación de peligros ya que los lahares cohesivos se esparcen más ampliamente que los lahares no cohesivos que viajan distancias similares y más lejos que las avalanchas de escombros de volumen similar (Vallance y Scott, 1997). Las campañas de campo también aportan información para el cartografiado geológico, dado que al dimensionar su potencia se puede realizar una aproximación del volumen del depósito a lo largo de toda su extensión.

1.3.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Comprender la naturaleza de los volcanes permite mejorar la capacidad de respuesta para la mitigación, planificación y ordenamiento territorial ante los peligros volcánicos. Debido a que los lahares están saturados de fluidos y forman una matriz densa, los fragmentos de roca de diferentes tamaños se transportan y contribuyen al grado de destructividad de este fenómeno (Pierson y Major, 2014).

El presente trabajo sobre la caracterización granulométrica del depósito del CVL del volcán Cotopaxi, aportará con información importante acerca de su comportamiento y características reológicas para un mejor entendimiento de la dinámica de este lahar.

Adicionalmente, el estudio será un aporte para el conocimiento geológico presentando las similitudes granulométricas del depósito lahárico con otros depósitos de lahar cohesivos y de manera similar correlacionando la granulometría del CVL con la del lahar histórico de 1877 del volcán Cotopaxi; presentando estos resultados en un StoryMap elaborado bajo ArcGIS.

1.4 ALCANCE

En este trabajo se estudió el depósito del Lahar del Valle de los Chillos, para determinar sus características granulométricas y similitudes con otros depósitos de lahar de este tipo. Además, se realizó una comparación con la granulometría de un lahar pobre en matriz, el lahar histórico de 1877, uno de los depósitos lahárnicos más recientes del volcán Cotopaxi.

Se consideraron los análisis granulométricos realizados para el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de 23 muestras recolectadas por los investigadores Minard L. Hall y Patricia A. Mothes durante 2012 – 2013 para las evaluaciones de las características granulométricas del CVL.

Se realizaron varias campañas de campo para la identificación del depósito lahárnico, descripción de afloramientos y su correlación estratigráfica.

Se recolectaron varias muestras representativas con las cuales se realizaron descripciones petrográficas (macroscópicas) de los clastos y matriz del depósito.

1.5 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El presente proyecto se realizó en la zona del drenaje norte del volcán Cotopaxi (Fig. 1.1); en los cantones Mejía, Rumiñahui y Quito de la provincia de Pichincha, donde se depositó mayormente el CVL y se encuentran los depósitos de avalancha de escombros del Cotopaxi. Esta región de clima templado se encuentra ubicada en el callejón interandino, al suroriente de la capital, rodeado por los estratovolcanes Rumiñahui, Sincholagua y Pasochoa.

El drenaje norte se compone de los sistemas fluviales representados por los ríos Pita y El Salto, en las proximidades al volcán; y por los ríos Santa Clara y San Pedro, ubicados a media y larga distancia del volcán, respectivamente (Toapaxi et al., 2019). Estos ríos juntamente con sus quebradas presentan patrones de drenaje dendríticos, sub paralelos y paralelos.

El río Pita desciende por el flanco nororiental del volcán y tiene su curso entre el Volcán Sincholagua, que aporta con gran cantidad de agua freática, y la planicie lahárica que desciende del Cotopaxi. Más adelante se juntan las quebradas Chilcahuaycu y Pucará, ambas provenientes del flanco norte del volcán.

El río Salto drena por el lado noroccidental del volcán, descendiendo por el gran Cañón Colorado al oeste del Refugio. En varios sectores, las corrientes se han segmentado, formando trayectos paralelos debido a que el cauce del Río Salto es poco profundo (Vilaña, 2017).

El Río Santa Clara nace de la vertiente oriental del volcán Pasochoa, en la zona de “La Caldera” y recorre la zona centro oriental del cantón Rumiñahui. Presenta una topografía irregular con pendientes bajas (alrededor de 5%). Este río es una subcuenca del río San Pedro, en cuya unión la pendiente tiende a disminuir caracterizándose por tener secciones muy anchas.

En el valle de los Chillos, la altitud varía entre los 2400 a 2800 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), presenta una topografía mayormente plana con pequeñas colinas. Limita de norte a sur con el volcán Ilaló y el Pasochoa y de este a oeste con la parroquia de Pintag y las Lomas de Puengasí que separan

a Quito del valle. La zona se ubica en la subcuenca del río Guayllabamba, cuenca del río Esmeraldas.

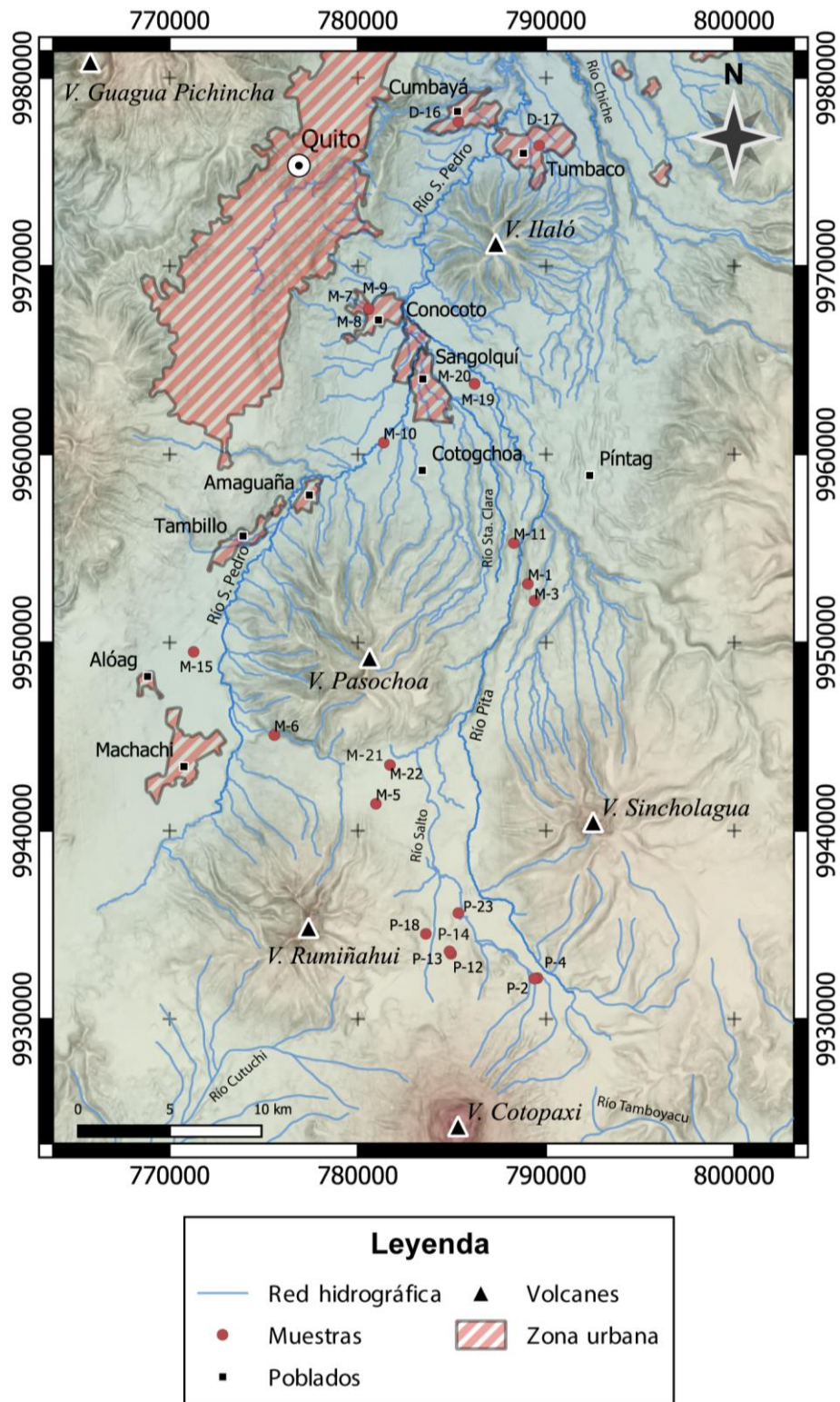


Figura 1.1. Mapa de ubicación de la zona de estudio, donde se señala la ubicación de las muestras, poblados, volcanes, zonas urbanas y red hidrográfica.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CONTEXTO GEODINÁMICO

El territorio ecuatoriano continental corresponde a un margen convergente activo, donde la placa oceánica de Nazca subduce bajo la placa continental Sudamericana a una tasa de 58 ± 2 mm/año (Fig. 2.1) (Trenkamp et al., 2002), en dirección N83°E (Kendrick et al., 2003; Nocquet et al., 2014), con un ángulo que varía entre los 25°–35° y es continua hasta una profundidad de aproximadamente 200 km (Guillier et al., 2001).

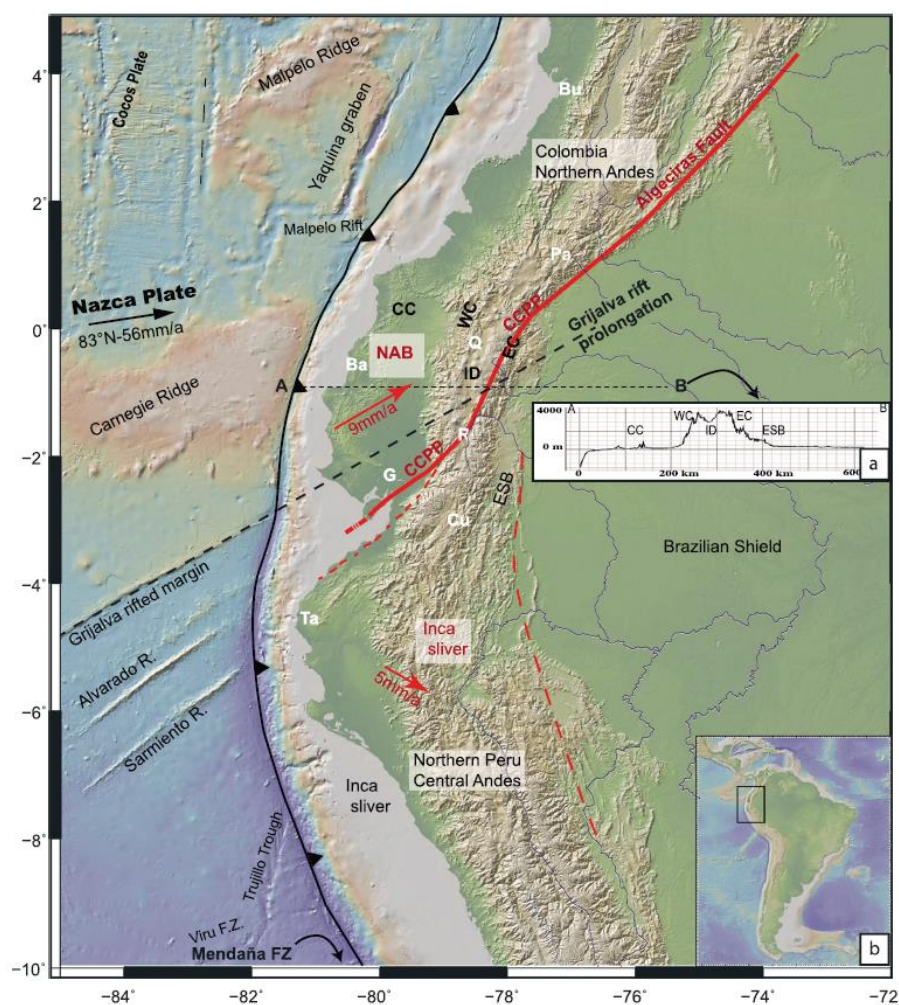


Figura 2.1. Contexto geodinámico del Ecuador. La placa de Nazca junto con el Ridge de Carnegie subduce en latitudes ecuatoriales a una tasa de 56 mm/año. El Bloque Nor-Andino

(NAB) se está moviendo hacia el NNE a una tasa de 9 mm/año a lo largo del sistema de fallas CCPP que continúa en Colombia como la falla de Algeciras (línea gruesa roja). (a) Perfil topográfico A-B que muestra el relieve de los Andes ecuatorianos centrales. (b) Ubicación en América del Sur. Tomado de Yepes et al. (2016).

La placa oceánica de Nazca que alberga al Carnegie Ridge, la cual es una cordillera asísmica que muestra la huella de la interacción del punto caliente de Galápagos (Sallarès et al., 2005), subduce frente a las costas ecuatorianas entre las latitudes 1°N y 2°S ocasionando el levantamiento de la superficie costera, la actividad sísmica y el volcanismo en el Ecuador (Gutscher et al., 1999).

El Bloque Nor-Andino, que está constituido por el ante-arco submarino, la cordillera de la costa, la planicie ante-arco y parte de la cordillera andina, se encuentra deformado y se mueve a una tasa de 7.5–9.5 mm/año en dirección NNE con respecto al escudo brasileño (Collot et al., 2009; Nocquet et al., 2014). Este bloque continental limita al este con un sistema de fallas laterales transpresivas denominado Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP), que forma el límite occidental de la placa Sudamericana estable (Alvarado et al., 2016; Ego et al., 1996).

El volcanismo en el Ecuador continental se concentra en la Zona Volcánica Andina del Norte, donde se han identificado 76 centros volcánicos (Fig. 2.2) (52 de ellos están extintos, 24 son activos y 2 de ellos están actualmente en erupción) (Ramon et al., 2021), agrupados en cuatro franjas o lineamientos volcánicos, cada una con una morfología característica, un estilo eruptivo y una diversidad química y petrográfica: Frente volcánico o Cordillera Occidental; Arco Principal, que abarca los volcanes de la Cordillera Real y Valle Interandino; y TrasArco o Zona Subandina (Hall et al., 2008; Hidalgo et al., 2012).

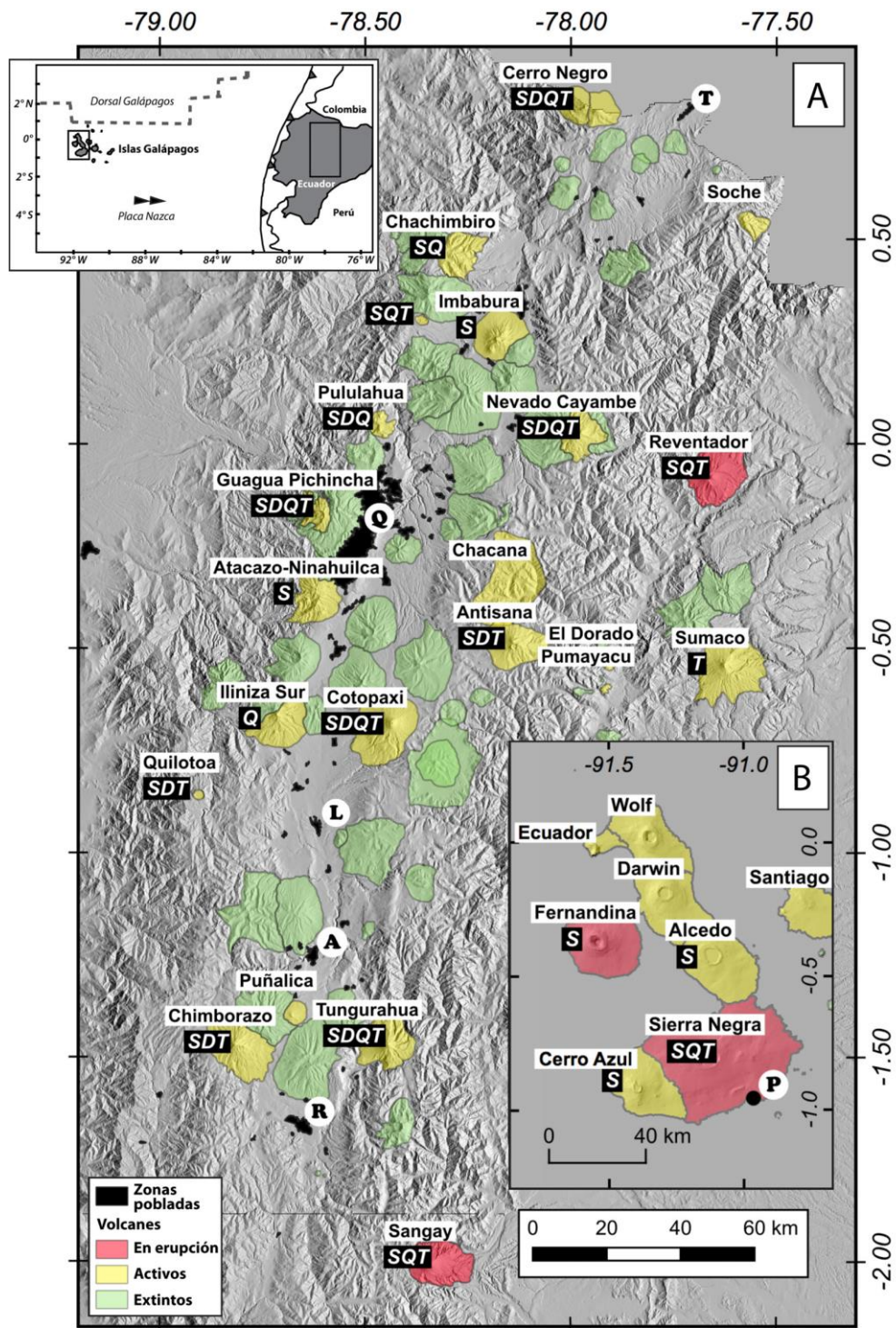


Figura 2.2. Volcanes del Ecuador en [A] el continente, y [B] en las Islas Galápagos. Los volcanes extintos se muestran en verde, los activos en amarillo y los que están en erupción (2021), en rojo. Las letras blancas en recuadros negros representan los diferentes tipos de monitoreo que se llevan a cabo en los volcanes: S: Sísmico (sísmica e/o infrasonido), D: Geodesia (GPS e/o inclinómetro), Q: Geoquímica (gas, fluidos), T: Térmica/visual (aérea y/o fija). Tomado de Ramon et al. (2021).

2.2 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN COTOPAXI

2.2.1 GENERALIDADES

El Cotopaxi (Lat. 0°38' S; Long. 78° 26' W) es un gran estratovolcán que se ubica en la cordillera oriental de los Andes ecuatorianos o arco principal. Tiene una elevación de 5897 m.s.n.m. y es el segundo volcán más alto del país, solo superado por el Chimborazo (6263 m.s.n.m.). Se localiza entre las provincias de Pichincha y Cotopaxi, a 60 km al sureste de Quito y a 45 km al norte de Latacunga y rodeado por antiguos estratovolcanes: Pasochoa (4200 m.s.n.m.) al N, Rumiñahui (4722 m.s.n.m.) al NW, Sincholhua (4873 m.s.n.m.) al NE, la caldera de Chalupas y el Quilindaña (4919 m.s.n.m.) hacia el SE.

El edificio volcánico de forma aproximadamente cónica tiene una base de 16x19 km, presenta un relieve pronunciado (2000–3000 m) desde su base hasta la cima y con pendientes de hasta 30° de inclinación (Fig. 2.3) (Andrade et al., 2005; Hall y Mothes, 2008). Su cráter de forma circular, donde casi siempre se observa una constante desgasificación manifestada por actividad fumarólica, tiene un diámetro de aproximadamente 800 metros y una profundidad superior a los ~100 metros. A causa del flujo de calor, este sector se encuentra permanentemente despojado de nieve (Andrade et al., 2005).

El Cotopaxi se encuentra cubierto por una importante capa de hielo glaciar que en el año de 1976 cubría 21.3 km², este ha ido decreciendo rápidamente alcanzando valores de 12.7 km² en el año 2006 y 10.5 km² para el año 2016, lo que significa una reducción del 51.83%. El volumen estimado en la actualidad es de ~0.52 km³ (aprox. 520 millones de m³) (Cáceres, 2016; Cáceres et al., 2010).

Los glaciares orientales del Cotopaxi descienden hasta la cota de ~4600 m.s.n.m., debido a los vientos que transportan humedad desde la llanura amazónica, mientras que en la zona occidental los glaciares alcanzan la cota de 5100 m.s.n.m. (Andrade et al., 2005) (Fig. 2.3).

Tres sistemas de drenaje principales se forman de los deshielos del Cotopaxi: 1) el sistema de los ríos Pita-Esmeraldas al norte; 2) el sistema de los ríos Cutuchi-Pastaza al suroeste; y, el sistema de los ríos Tambo-Tamboyacu-Napo al este (Mothes et al., 1998). Las morrenas, depósitos de flujo de escombros (lahares) y una escasa vegetación con apariencia desértica dominan el paisaje en áreas de elevación intermedia (4600–4300 m), mientras que las áreas por debajo de los 4300 m están cubiertas por una vegetación de tipo páramo (Ettinger et al., 2007).



Figura 2.3. Vista aérea de la cara norte del volcán Cotopaxi cubierto por una importante capa de hielo glaciar cuyo volumen se estima en aprox. 520 millones de m³. El cono volcánico casi simétrico tiene una base de 16 x 19 km, un relieve pronunciado que alcanza de 2000 a 3000 metros desde su base hasta la cima y pendientes de hasta 30°. (Fotografía de Jorge Anhalzer).

2.2.2 HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI

El edificio volcánico se encuentra construido sobre basamento metamórfico de la Cordillera Real, formado principalmente por secuencias de rocas Paleozoicas, Triásicas y Jurásicas (Litherland et al., 1994) La actividad volcánica se caracterizó inicialmente por grandes erupciones explosivas durante las cuales se depositaron caídas plinianas riolíticas y flujos de ceniza. Fragmentos de obsidiana fueron datados por trazas de fisión, arrojando edades de ~500 mil años. Después de la fuerte fase explosiva temprana, se produjo una actividad efusiva andesítica que construyó el cono actual (Barberi et al., 1995).

Estos datos geológicos demuestran claramente el carácter eruptivo bimodal del volcán, con erupciones andesíticas (56–62% SiO) de intensidad moderada, y erupciones riolíticas (70–75% SiO₂) muy grandes. Desde el año de 1532 se han reconocido trece erupciones mayores, según tefroestratigrafía y relatos históricos, correspondientes a cinco ciclos principales en los años 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877-1880. Estas erupciones históricas fueron de carácter andesítico y produjeron flujos piroclásticos de escoria, caídas de ceniza y lapilli, flujos de lava y flujos de lodo y escombros de gran alcance (Andrade et al., 2005; Hall y Mothes, 2008).

2.2.3 FASE RIOLÍTICA DEL COTOPAXI I

Una serie gruesa de depósitos antiguos compuestos por flujos de ceniza riolítica, flujos de bloques, caídas de tefra y unidades volcanoclásticas asociadas que alcanzan un espesor de >150 m y un volumen de aprox. 32 km³, que se exponen a lo largo de los flancos inferiores S y SO del actual edificio del Cotopaxi en las profundas quebradas de los ríos Barrancas (Simarrones), Burrohuaicu, Saquimala y San Lorenzo (Fig. 2.4). Ocasionalmente se encuentran fragmentos de pizarra negra del basamento metamórfico. La edad de esta serie varía entre 420 a 560 ka (edades por trazas de fisión) (Bigazzi et al., 1997). La serie es más antigua que la Ignimbrita de Chalupas de 216 ka y más joven que la clástica Fm. Latacunga, datada entre

1,4 y 1,7 Ma (Bablon et al., 2020; Hall y Mothes, 2008; Hammersley et al., 2001; Lavenu et al., 1992).

En esta fase el volcán estaba formado por una serie de domos y diques de riolita, altamente fracturados y localmente alterados asociados con brechas de domo y flujos de obsidiana, alineados sobre una fractura arqueada de ~8 km de largo; interpretada como un antiguo borde de caldera al SO del edificio actual que está mayormente enterrada bajo depósitos más jóvenes. Importantes flujos piroclásticos se generaron debido a las erupciones explosivas cubriendo zonas ubicadas a más de 30 km al sur del cono (Garrison et al., 2011; Hall y Mothes, 2008).

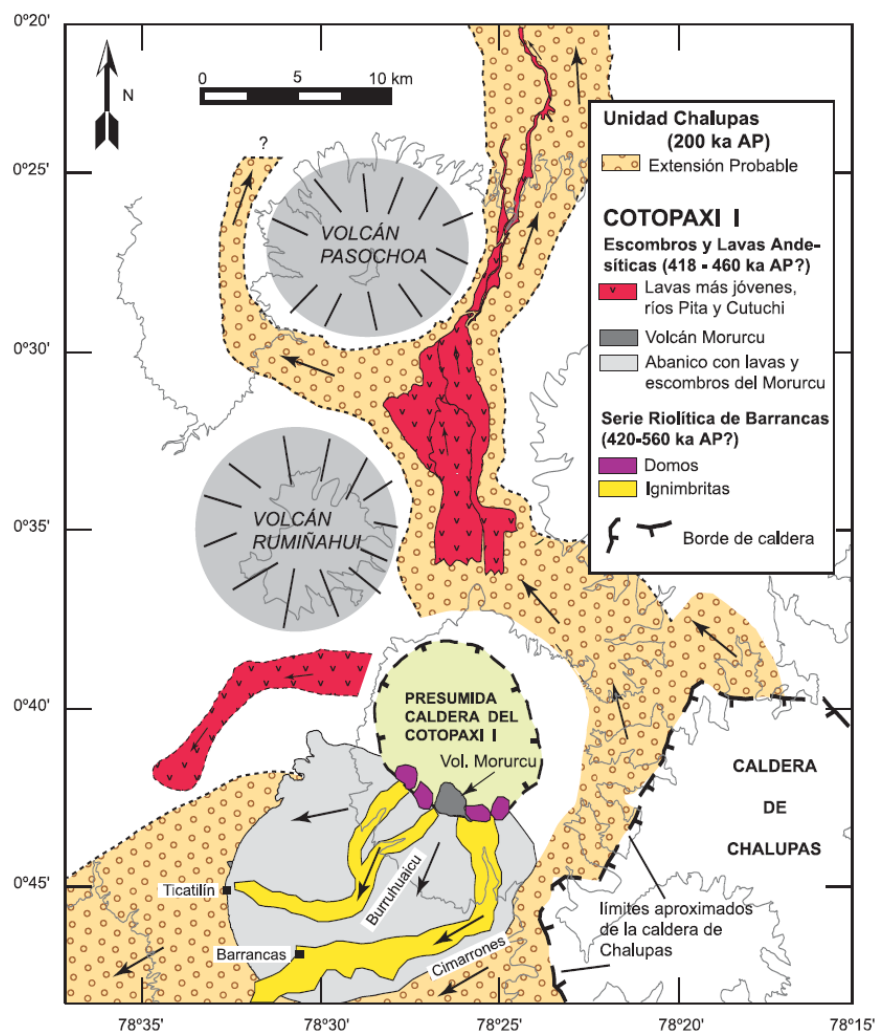


Figura 2.4. Mapa geológico simplificado de los depósitos riolíticos y andesíticos del Cotopaxi I. También se muestra el área aproximada del depósito de la ignimbrita de Chalupas. Modificado de Hall y Mothes (2008).

2.2.4 FASE ANDESÍTICA DEL COTOPAXI I

Posterior a la fase riolítica de la serie Barrancas (460 ka), se dio lugar un periodo de erosión que resultó en un paquete detrítico de 300–400 m de potencia compuesto por depósitos fluviales, glaciales y de flujo de detritos al SO de Cotopaxi. Ocasionalmente ocurrieron manifestaciones volcánicas del tipo andesítico, menos explosivas definidas principalmente por la presencia de grandes flujos de lava, brechas de colapso, caídas de escoria y ceniza volcánica. Varios bloques son andesitas grises del pico Morurcu (4850 m), remanente de cuello volcánico de un cono parásito (o cono satélite) erosionado por los glaciares, ubicado en el pie sur del edificio actual cerca del borde de la caldera inferida de Cotopaxi I (Fig. 2.4). Intercalados en el paquete detrítico se encuentran varios de sus flujos de lava andesítica silícica que se pueden rastrear 8 km valle abajo, vinculando así la actividad del Morurcu con este período de erosión (Hall y Mothes, 2008).

A lo largo del cañón del Río Pita cerca de la Bocatoma, al NE de Cotopaxi, se expone una secuencia compuesta por conglomerados de flujo fluvial y de escombros, una serie distintiva de ceniza andesítica y escoria bien estratificada y al menos cinco grandes flujos de lava andesítica, de varios metros de potencia, que recorrieron distancias de entre 23 y 40 km al norte del volcán con un volumen total combinado de aprox. 4,1 km³. Por correlación estratigráfica, su edad se encuentra definida entre la serie riolítica Barrancas (420–560 ka) y la Ignimbrita de Chalupas (216 ka) (Andrade et al., 2005; Bablon et al., 2020; Hall y Mothes, 2008).

2.2.5 UNIDADES CANGAHUA Y CHALUPAS

Después de un largo periodo que se extendió alrededor de 350 ka, en el que no se encuentran productos eruptivos del Cotopaxi, se depositaron y cubrieron la zona del volcán dos importantes unidades geológicas, productos de la intensa actividad volcánica en zonas cercanas de los Andes ecuatorianos (Andrade et al., 2005).

2.2.5.1 UNIDAD CANGAHUA

Consiste en un depósito de una toba volcánica alterada endurecida, de grano fino, de color café claro hasta habano, de 25 a 30 m de potencia, que está compuesto principalmente de ceniza volcánica reelaborada y vinculada a los períodos de glaciación en las cordilleras, cuando las condiciones climáticas en el callejón interandino experimentaron temperaturas reducidas (hasta 7 °C). Estudios sugieren que la parte superior de la formación puede tener unos 20 ka, mientras que su base es más antigua que la Ignimbrita de Chalupas (216 ka) pero más joven que la serie Barrancas (420–560 ka) (Hall y Mothes, 1997, 2008).

2.2.5.2 UNIDAD IGNIMBRITA DE CHALUPAS

Es un gran depósito piroclástico masivo que tiene una distribución radial a la caldera y aflora predominantemente a lo largo del Valle Interandino (Fig. 2.4), alcanzando espesores de hasta 200 m (espesor promedio de 30 m). Este paquete, que interrumpe la depositación de la Unidad Cangahua, contiene abundante ceniza y pómez fibrosa de color blanco o grisáceo extendiéndose en un área de aprox. 2000 km² y con un volumen total estimado de depósitos de ignimbrita y coignimbrita entre 200–265 km³. Su edad ha sido asignada en K-Ar de 216 ± 5 ka (Bablon et al., 2020; Beate et al., 2006; Hall y Mothes, 2008; Hammersley, 2003).

2.2.6 COTOPAXI II-A

Luego del largo periodo de inactividad, en el cual se depositaron las unidades Cangahua y Chalupas, empezó una nueva etapa de actividad eruptiva periódica en el Cotopaxi hace ~13200 años AP. Estas erupciones de carácter riolítico fueron acompañadas por pequeñas erupciones andesíticas, evidenciadas por delgadas capas de lapilli y escoria que se encuentran dispersas en esta serie. Se han identificado cinco episodios eruptivos riolíticos principales que abarcaron alrededor de 8700 años, los cuales produjeron extensas caídas plinianas de distribución regional, numerosos flujos de ceniza (con espesores importantes en las zonas actuales de Sigchos, Quito,

Papallacata, Cosanga y El Coca) y oleadas piroclásticas, algunas de los cuales viajaron a más de 30 km del cráter, flujos de colapso de domos con fragmentos que aparecen en la mayoría de los productos eruptivos y flujos de escombros ricos en cenizas (Andrade et al., 2005; Hall y Mothes, 2008).

Hace 4500 años AP, ocurrió la última erupción riolítica de carácter catastrófico conocida como el Episodio Cañón Colorado. El edificio volcánico que se había formado hasta ese entonces, el Cotopaxi II-A, se desestabilizó, ocasionando el colapso sectorial del flanco NE del volcán y cuya cicatriz de deslizamiento podría ser la pared de roca Yanasacha que se observa hoy en día (Hall y Mothes, 2008). Como resultado, descendió una avalancha de escombros gigantesca con un volumen aprox. de 2.1 km³, y cuyos remanentes conforman un extenso campo de pequeñas colinas llamadas “hummocks” ubicados en la zona norte y nororiental del volcán, cubriendo un área de más de 70 km² (Encalada, 2018).

La avalancha de escombros que fue acompañada y precedida de grandes flujos piroclásticos, dieron como resultado el rápido derretimiento de los glaciares y la formación de un gigantesco lahar, denominado como el Lahar del Valle de Chillos (Fig. 2.5), el mayor flujo de escombros del Holoceno en área y volumen hasta ahora reconocido en los Andes del norte, el cual fluyó por los ríos Pita, San Pedro y Guayllabamba, desembocando en el Océano Pacífico (Hall y Mothes, 2008).

2.2.7 COTOPAXI II-B

Después de la intensa actividad del Cotopaxi II-A en la que gran parte de su edificio volcánico había quedado destruido, empieza una serie continua de erupciones periódicas de carácter andesítico con la excepción de una pequeña erupción riolítica ocurrida hace 2100 años AP (Anexo I). Durante este episodio andesítico se han producido al menos 18 ciclos eruptivos, en 43 erupciones de magnitud moderada a grande (VEI ≥ 3) (Andrade et al., 2005; Newhall y Self, 1982).

Estas erupciones han construido gran parte del edificio actual y se caracterizan por tener un patrón eruptivo similar, que involucra caídas plinianas de lapilli, flujos piroclásticos de escoria o pómez, flujos de lava en bloques y grandes flujos de escombros (Fig. 2.5). Se estima que el volumen total de emisión de magma andesítico es de 14,82 km³ durante los últimos 5800 años (Hall y Mothes, 2008).

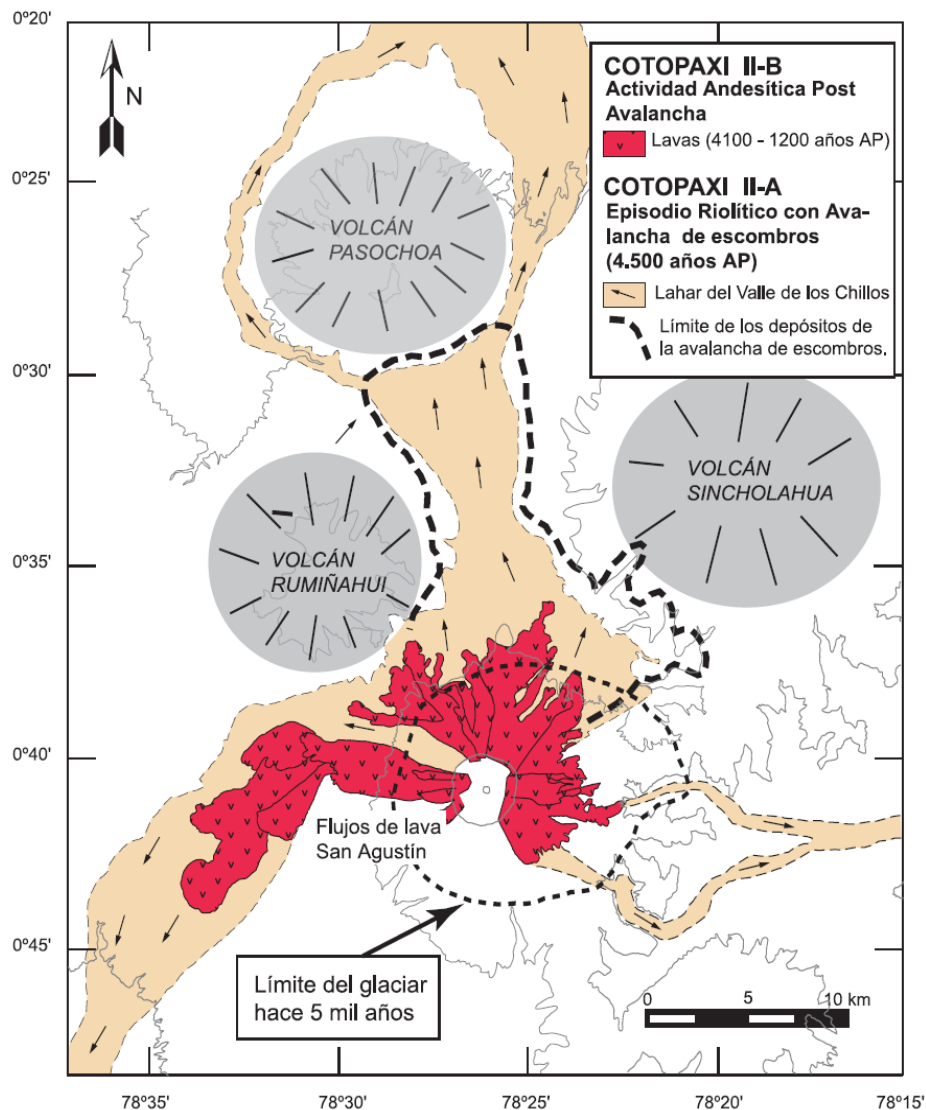


Figura 2.5. Mapa geológico simplificado de los depósitos asociados a la erupción riolítica, colapso de flanco (avalancha de escombros) y el lahar del Valle de Los Chillos ocurridos hace aprox. 4500 años AP en el "Cotopaxi II-A". Se muestra también los depósitos de las coladas de lava que ocurrieron entre 4100 años AP y 1200 años AP., cuando comenzó a construirse el "Cotopaxi II-B". Modificado de Hall y Mothes (2008).

2.2.8 PERIODO HISTÓRICO

Las culturas prehispánicas que ocuparon territorios de la Sierra ecuatoriana seguramente atestiguaron diversos eventos eruptivos del Cotopaxi que desafortunadamente no se tienen registros escritos, sin embargo, desde 1532 con la conquista española se empiezan a documentar con cierto detalle las erupciones del volcán Cotopaxi. De esta manera, se conoce que en los últimos 500 años el volcán ha experimentado varios ciclos eruptivos en los años de 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1854-1855 y 1877-1880; teniendo en promedio un episodio por siglo (Andrade et al., 2005; Hall et al., 2005).

Fueron frecuentes durante estas erupciones flujos piroclásticos, caídas de ceniza y escoria a nivel regional, pequeños flujos de lava y lahares moderados a grandes. Eventos no confirmados en los años de 1757-1758, 1857, 1866, 1885, 1903-1904, 1906, 1912 y 1942 se reportan en las crónicas pero con información escasa o incompleta (Pistolesi et al., 2011).

2.2.8.1 ERUPCIÓN DE 1877

Desde inicios de 1877 varias manifestaciones se hacían presente en el volcán como emisiones de vapor sobre el cráter y pequeñas detonaciones escuchadas en sus cercanías. No fue hasta el 26 de junio en el que se produjo una erupción considerable, con una espesa lluvia de cenizas sobre las ciudades de Machachi, Quito y Latacunga; acompañadas de extensos flujos piroclásticos que fundieron parte del glaciar generando extensos y destructivos lahares (Wolf, 1878).

Estos fluyeron principalmente por los ríos Pita, Cutuchi Y Tamboyacu, ocasionando severos daños a lo largo de sus tres drenajes y alcanzando velocidades de hasta 20 m/s (Mothes et al., 2004). Este desastre arrasó y devastó los valles de los ríos, cobrando la vida de más de 1000 personas y ocasionando cuantiosas pérdidas económicas (Sodiro, 1877; Wolf, 1878). La erupción de 1877 se puede considerar como una erupción típica del Cotopaxi, no obstante, las erupciones de 1744 y 1768 fueron más grandes (Andrade et al., 2005).

2.2.9 ERUPCIÓN DE 2015

En el mes de abril el volcán Cotopaxi experimentó un notable aumento en su actividad sísmica, registro de infrasonidos, desgasificación de SO_2 y deformación de flancos con pequeños desplazamientos (Mothes et al., 2017). Esta actividad precursora dio inicio a una nueva fase eruptiva el 14 de agosto con las primeras explosiones freáticas, ocasionando emisiones semicontinuas de vapor de agua, gases y ceniza las cuales duraron aprox. cuatro meses (Fig. 2.6). La actividad de 2015 nunca superó una magnitud VEI = 2 (Índice de Explosividad Volcánica) (Newhall y Self, 1982). El volcán expulsó un total de $\sim 1.2 \cdot 10^9$ kg de ceniza (aprox. $8.6 \cdot 10^5$ m³) durante 4 fases eruptivas ocasionando una moderada afectación a las comunidades ubicadas al oeste y al noroeste del volcán, cuya actividad principal es la agricultura y ganadería (Bernard et al., 2016; Hidalgo et al., 2018; Mothes et al., 2017).



Figura 2.6. Actividad volcánica del volcán Cotopaxi en agosto de 2015. Se observa una columna eruptiva con contenido moderado de ceniza en dirección hacia el occidente-suroccidente. (Fotografía de P. Mothes, IGEPN).

2.2.10 ACTIVIDAD DE 2022 – 2023

El volcán Cotopaxi ha registrado un incremento en su actividad desde el 21 de octubre de 2022, iniciando así un nuevo período eruptivo. Desde entonces, las emisiones de ceniza han sido el fenómeno eruptivo más frecuente; siendo más intensas entre diciembre de 2022 y febrero de 2023 (Fig. 2.7), con hasta diez emisiones por semana, principalmente de baja altura (<1 km snc) y con bajo contenido de ceniza. Por lo que se han tenido reportes de varias caídas de ceniza en las áreas cercanas al Parque Nacional Cotopaxi, incluyendo los cantones de Quito, Mejía, Rumiñahui y Latacunga.

No obstante, desde finales de febrero de 2023 se viene registrando un descenso progresivo en las tendencias de los parámetros de vigilancia del volcán Cotopaxi, tanto en la actividad interna como en la superficial. A nivel interno, se ha registrado una disminución en la cantidad de sismos diarios, especialmente los relacionados con emisiones de ceniza (tremores) y movimiento de fluidos (LPs). A nivel superficial, también ha habido una disminución en el flujo y masa de dióxido de azufre (SO₂) emitidos por el volcán hacia la atmósfera, así como en la tasa de emisiones de ceniza y la cantidad emitida. Los parámetros de vigilancia generalmente muestran que la intensidad de la erupción del Cotopaxi está disminuyendo (Almeida et al., 2023).

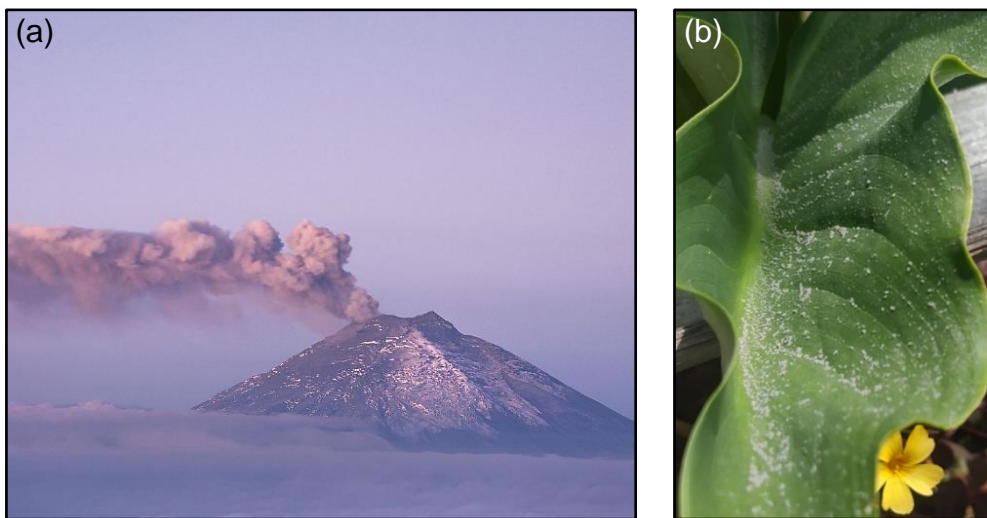


Figura 2.7. (a) Emisión de ceniza del volcán Cotopaxi en febrero de 2023. Se observa una columna eruptiva con en dirección hacia el oriente. (Fotografía de Roberto Valdez). (b) Caída de ceniza en diciembre de 2022 en el valle de los Chillos.

2.3 LAHARES

“Lahar” es uno de los pocos términos de origen indonesio (javanés) que han ingresado al idioma inglés y se traduce como un flujo de lodo destructivo que desciende por las laderas de un volcán. Fue utilizado por primera vez en 1922 por Escher, el cual propuso que los flujos de lodo volcánico se originan en: la erupción en un lago cratérico, el derretimiento de una capa de hielo o intensas lluvias sobre materiales sueltos (Neall, 1976).

El término fue aceptado en la literatura inglesa para los tres tipos de flujo y en la actualidad se define como una mezcla de escombros de roca, sedimentos y agua que se origina en las laderas de un volcán, que fluye rápidamente impulsado por la gravedad y comúnmente incorporan agua y sedimentos adicionales. Debido a que los lahares están saturados de agua, las interacciones líquido-sólido influyen en su comportamiento y los distinguen de otros fenómenos volcánicos como las avalanchas de escombros y flujos piroclásticos (Vallance e Iverson, 2015). El término también puede significar el depósito de dicho flujo (Waite, 2013).

El abundante líquido que contienen hace que fluya en pendientes bajas e inunde zonas alejadas de sus fuentes (hasta cientos de kilómetros) y los fragmentos de roca transportados los hacen especialmente destructivos (Vallance e Iverson, 2015). Cerca del 17% de las muertes históricas relacionadas con volcanes han sido causadas por lahares, con aproximadamente 45,000 muertes en los últimos 400 años; siendo el más destructivo el lahar ocurrido en 1985 producto de la erupción del volcán Nevado del Ruiz en Colombia (Fig. 2.8) dejando un saldo de 23,080 víctimas mortales (Witham, 2005).



Figura 2.8. Vista aérea de los restos del pueblo de Armero, Colombia, devastado por un lahar asociado con la erupción del Nevado del Ruiz en noviembre de 1985. (Fotografía de R.J. Janda, Servicio Geológico de los Estados Unidos).

Según Vallance e Iverson (2015), la génesis de un lahar requiere:

- Una fuente adecuada de agua (superficial, atmosférica, etc.).
- Abundante material no consolidados que incluyen típicamente flujos piroclásticos, depósitos de caída, sedimentos glaciales, coluviales y suelo.
- Pendientes pronunciadas (comúnmente $> 25^\circ$) y relieve sustancial en la fuente.
- Un mecanismo desencadenante (erupciones volcánicas, desprendimiento de glaciares, terremotos, lluvias intensas, etc.).

2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS LAHARES SEGÚN SU ORIGEN

Los lahares pueden ser primarios (sineruptivos) o secundarios (posteruptivos o no relacionados con las erupciones).

2.3.1.1 LAHARES PRIMARIOS

Corresponden a aquellos que se inician durante la actividad volcánica, cuando el material eruptivo (avalanchas de rocas calientes, flujos piroclásticos o surges) entra rápidamente en contacto con la nieve y glaciares que cubren las partes altas de un volcán provocando su fusión parcial o total y generando grandes cantidades de agua de deshielo que luego se escurre, se une y erosiona los escombros piroclásticos para formar lahares ricos en agua (Fig. 2.9) (Pierson et al., 1990).

A medida que fluyen río abajo los lahares incorporan escombros volcánicos, depósitos glaciares, aluviales y coluviales; de modo que en unos pocos kilómetros a varias decenas de kilómetros se convierten en grandes flujos de escombros ricos en material sólido (Mothes y Vallance, 2015; Vallance e Iverson, 2015).

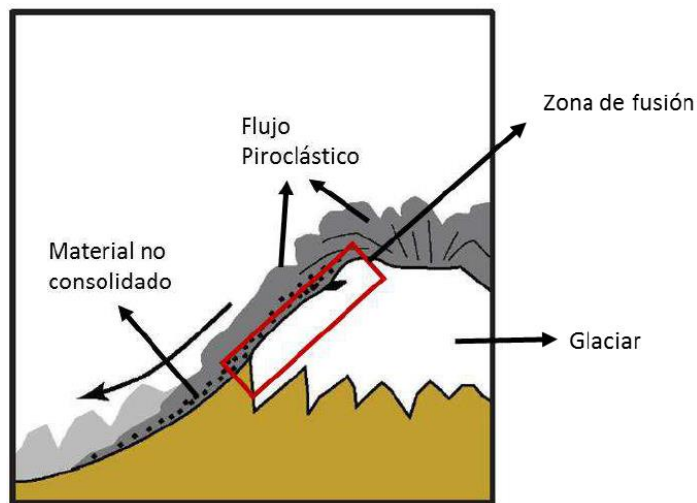


Figura 2.9. Esquema de la formación de un lahar primario durante una erupción lo suficientemente fuerte para producir fusión de la capa glaciaria. Tomado de Andrade et al. (2005).

Un ejemplo de este tipo de lahares se produce cuando ocurre una erupción en el fondo de un lago formado en la caldera de un volcán. Es potencialmente la forma más destructiva de lahar porque puede implicar la liberación repentina de grandes volúmenes de agua, causando pérdidas de vidas y propiedades (edificios, viviendas, infraestructura y tierras fértiles, etc.) (Kusakabe, 1996; Neall, 1976).

En 1919, una erupción en el lago formado en el cráter del volcán Monte Kelut en Indonesia (Fig. 2.10) ocasionó la destrucción de 131 km² de tierras de cultivo y la muerte de 5110 personas (Kusakabe, 1996). El estallido de la erupción, según los informes, se escuchó en un radio de aprox. 500 Km., y ha sido calificada como la segunda más grande del Monte Kelut en el siglo XX (Nawiyanto et al., 2019).



Figura 2.10. Lago del cráter Ruapehu después de la erupción freatomagmática de septiembre de 2007 y el lahar formado. (Fotografía de Karoly Nemeth).

La combinación de grandes cantidades de agua, pendientes empinadas, sedimentos del lago, gases volcánicos de alta temperatura y abundante material piroclástico disponible para la removilización hace que estos eventos sean particularmente peligrosos, ya que tienden a viajar por los valles fluviales existentes, que con frecuencia son el lugar de poblaciones extensas (Manville, 2015).

2.3.1.2 LAHARES SECUNDARIOS

Corresponden a aquellos cuya fuente de agua no está directamente asociada con la actividad volcánica. Estos son causados por intensas precipitaciones (Fig. 2.11) o por mecanismos no eruptivos como los terremotos,

desprendimiento de glaciares, caída de rocas y la erosión; que pueden provocar el colapso de una pared circundante al cráter (Neall, 1976).

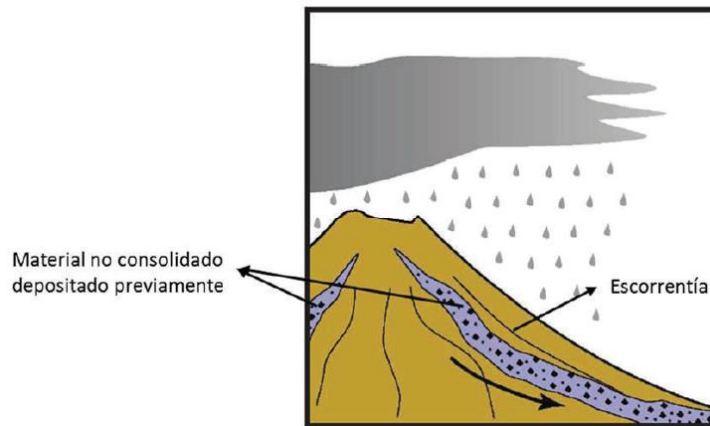


Figura 2.11. Esquema de la formación de un lahar secundario durante un periodo de lluvias intensas, estas remobilizan el material pírcloástico suelto depositado previamente. Tomado de Andrade et al. (2005).

Los lahares que resultan de lluvias intensas a menudo ocurren después de que las erupciones depositan abundantes materiales sueltos de depósitos de flujo o caída de pírcloastos. Estos suelen ser pequeños ($10^4 - 10^6 \text{ m}^3$), pero abundantes durante la estación invernal. Su descarga está limitada por la intensidad, acumulación, duración de la lluvia y por la incorporación de material no consolidados fácilmente erosionable del orden de decenas a cientos de m^3/s . Este tipo de lahar representa una amenaza duradera, ya que pueden desencadenarse mucho después de una erupción (Mothes y Vallance, 2015; Thouret et al., 2020).

Los lahares generados por el colapso de una laguna cratérica alcanzan volúmenes mayores ($0,1 \text{ km}^3$ o más) y recorren distancias más lejanas (de 10 a 100 km) que los lahares inducidos por la lluvia. Un desastre de tal magnitud ocurrió en el año 2000 en Ecuador, cuando un gran bloque de brechas andesíticas se desprendió verticalmente desde la pared Norte del volcán El Altar cayendo sobre la laguna caldérica denominada “Laguna Amarilla” ocasionando un flujo de escombros y lodo que descendió valle abajo, dejando 13 personas fallecidas, cientos de cabezas de ganado perdido y provocando numerosos daños hasta en la región amazónica (Eissen et al., 2004).

2.4 CHILLOS VALLEY LAHAR

Hace aprox. 4500 años AP, durante una erupción riolítica catastrófica que ocasionó el colapso sectorial de los flancos N y NE del volcán, se formó una avalancha de escombros que fue acompañada de grandes flujos piroclásticos los cuales fundieron la cubierta glaciar del volcán y generaron un gigantesco flujo de lodo y escombros, denominado como el “Chillos Valley Lahar”. Las correlaciones estratigráficas sugieren que estos tres eventos: avalancha de escombros, flujos piroclásticos y el lahar, ocurrieron aproximadamente de forma simultanea (Hall y Mothes, 1995; Mothes et al., 1998). El paso del lahar fue probablemente uno de los episodios geológicos más grandes en el Valle Interandino y en los Andes del Norte durante el Holoceno debido a que el enorme lahar cubrió un área de $\sim 440 \text{ km}^2$, con un volumen de aprox. 3.8 km^3 ; alcanzando un espesor promedio de 2 m en los 326 km que viajó (Fig. 2.12) (Mothes et al., 1998).

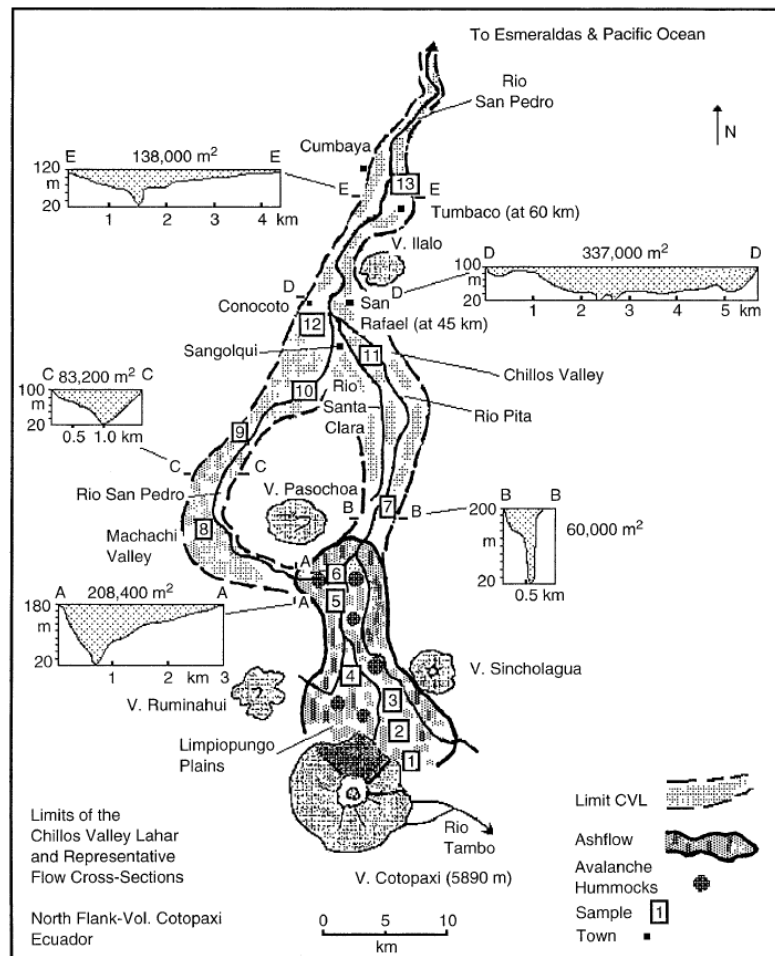


Figura 2.12. Mapa representativo que muestra los límites del CVL y secciones transversales de flujo, así como los hummocks de avalancha y el depósito de cenizas del Cañón Colorado. Tomado de Mothes et al. (1998).

En el Valle de los Chillos, su localidad tipo, el lahar alcanzó los 11 km de ancho y una profundidad de 150 m. Se desconoce el costo humano de este evento prehistórico, ya que se han encontrado restos de cerámicas en la base del flujo y en suelo subyacente (Mothes et al., 1998).

El lahar fluyó por los ríos septentrionales al volcán rodeando los flancos inferiores de los volcanes Rumiñahui y Sincholagua. En el volcán Pasochoa, una parte de la descarga fue desviada al Oeste hacia el río San Pedro; mientras que el restante descendió por el Río Pita alcanzando profundidades de hasta 200 m. En la confluencia de los dos ríos, los flujos se fusionaron y el lahar se extendió lateralmente por toda la planicie alcanzando un ancho de sección transversal de 11 km (Mothes et al., 1998).

El flujo continuó por el río San Pedro, luego por el cañón del río Guayllabamba; en donde hubo poca depositación debido al ambiente de alta energía. Más adelante, en la confluencia con el río Esmeraldas, el depósito de CVL se encuentra intercalado con sedimentos fluviales; en el sector de la población de Viche y Chura, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico (Mothes et al., 1998).

Con base a dataciones radiométricas realizadas en troncos carbonizados de árboles tomados del depósito del CVL en la planicie costera, suelo debajo de los flujos de ceniza del Cañón Colorado y por correlaciones estratigráficas se deduce que el Chillos Valley Lahar se generó hace aproximadamente 4500 – 4600 años AP (Mothes et al., 1998).

2.5 CARACTERÍSTICAS DEL CHILLOS VALLEY LAHAR

El depósito del CVL se identifica fácilmente de otras unidades estratigráficas por su color beige, composición litológica y aspecto homogéneo. Además, por ser de las últimas unidades depositadas y que generalmente cubre la superficie del terreno (Fig. 2.13a). Consiste entre un 80-90% de matriz (ceniza,

piedra pómez y granos líticos); de 10 a 20% de clastos líticos y con poca frecuencia se encuentran grandes bloques decimétricos hasta los 2 m de diámetro (Anexo VII-A1).

El CVL tiene una potencia uniforme de aproximadamente 2 m, que se evidencia a lo largo de todo el depósito como en los sectores de Rumipamba, Cotogchoa, Conocoto, San Rafael, Tumbaco e incluso en la zona costera a lo largo del Río Esmeraldas. No se observa estratificación interna, ni gradación. En su interior se encuentran pequeñas vesículas, que corresponden a bolsas de aire y gas atrapados en el flujo, y coágulos de suelo que demuestran que el flujo fue erosivo (Mothes et al., 1998). En algunos sectores es posible encontrar una capa de paleosuelo hacia la base del CVL, y subyaciendo a esta se encuentra la Fm. Cangahua que contiene bolas de cangahua (Fig. 2.13b), un icnofósil de *Coprinisphaera Ecuadoriensis* (Sánchez et al., 2013).

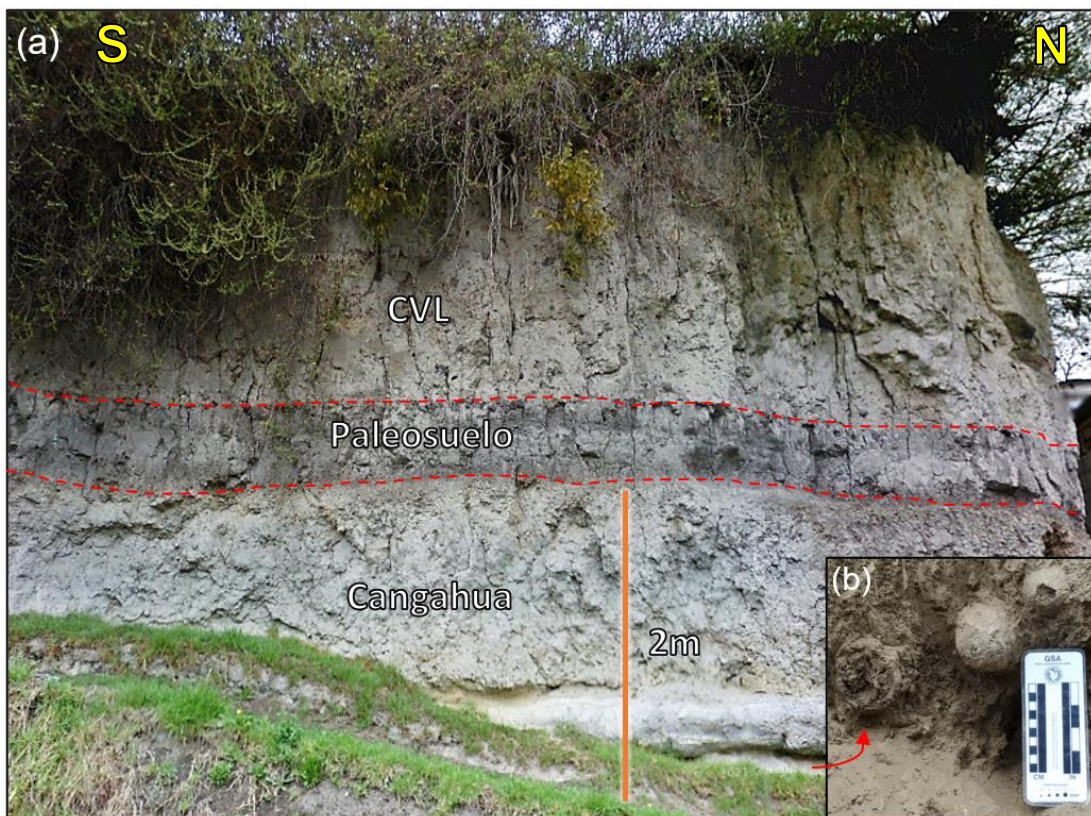


Figura 2.13. (a) Afloramiento localizado a 200 m. del parque de Conocoto, con dirección NE-SO, se observan tres unidades estratigráficas desde la base hacia el techo: Fm. Cangahua, Paleosuelo y el depósito del CVL. (b) Bolas de Cangahua (*Coprinisphaera Ecuadoriensis*).

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1 RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Esta primera etapa consistió en distinguir e identificar afloramientos del depósito del CVL principalmente en los sectores de Conocoto, Amaguaña, Sangolquí, entre otros; en las que se realizaron varias rutas (Fig. 3.1) donde se tomaron muestras con el objetivo de realizar una descripción de sus principales características como son: posición estratigráfica, potencia, color, litologías presentes, matriz, aspectos texturales (esfericidad y redondez), estructura del depósito, sorteo y gradación. Se visitó también la planicie de inundación por lahares de la zona norte del Parque Nacional Cotopaxi, en la cual se observaron los hummocks o colinas correspondientes al depósito de avalancha de escombros o de los flujos piroclásticos que hace 4500 años AP dieron origen al CVL; donde se pudo identificar que generalmente el depósito sobreyace a los hummocks.

Dentro de las inmediaciones del parque, en los cortes de la carretera, se observaron depósitos de lahares recientes; así como de lahares históricos con el fin de diferenciar las características entre depósitos de lahar rico en matriz (CVL) y un lahar pobre en matriz (lahar histórico de 1877) del volcán Cotopaxi. Además, en todas las campañas de campo se registraron con un GPS las coordenadas UTM WGS84 de cada punto para su tratamiento geográfico en un software GIS y se realizó un registro fotográfico de los principales afloramientos y puntos de interés/control.

Con las muestras obtenidas, se realizó la descripción macroscópica de los diferentes componentes del depósito: clastos líticos (riolíticos, dacíticos y andesíticos), granos que constituyen la matriz (cenizas vítricas, cristales), terrones de suelo, escoria, lapilli, pómez, y obsidiana.

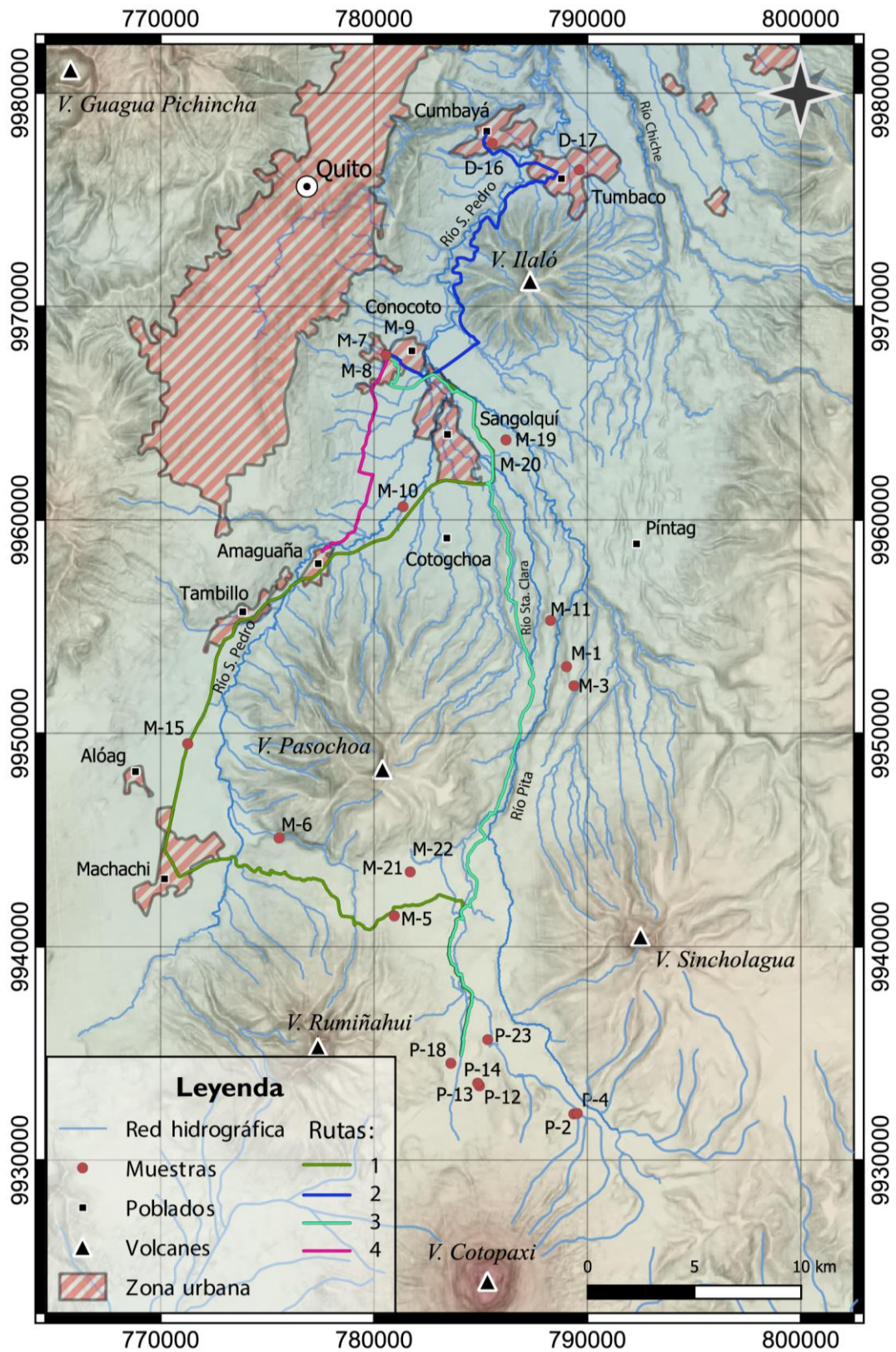


Figura 3.1. Mapa de ubicación de las muestras utilizadas en este estudio (P: Proximales, M: Medias, D: Distales) y las rutas de observación realizadas con el fin de identificar el depósito CVL en la zona Norte del volcán Cotopaxi.

3.2 OBTENCIÓN DE DATOS GRANULOMÉTRICOS

Existe una amplia cantidad de datos publicados en revistas académicas, artículos científicos, mapas y libros que se encuentran disponibles solo en forma de gráficos e imágenes en los cuales se observan las variables involucradas y su relación entre sí. Obtener los valores numéricos exactos de los gráficos puede ser un proceso extenso y que con frecuencia genera errores. Para ayudar en esta tarea de recuperación de datos, que resulta ser un proceso bastante tedioso, se han desarrollado herramientas de digitalización que realizan ingeniería inversa de imágenes para extraer la información que se encuentran representada.

En ese contexto se utilizó el software WebPlotDigitizer, una herramienta multiplataforma (web y escritorio) de código abierto y semiautomática que hace que este proceso sea bastante útil; facilitando la extracción de una gran cantidad de datos de forma rápida y precisa (Rohatgi, 2021).

Los pasos realizados para la obtención de los datos granulométricos del lahar Osceola estudiado por Vallance y Scott (1997) y del lahar histórico de 1877 (Mothes et al., 2004) del volcán Cotopaxi se detallan a continuación:

3.2.1 CARGA DE IMÁGENES EN EL SOFTWARE

El archivo de imagen que contiene los datos que se desean extraer es subido en el software. Se admiten formatos o JPEG, PNG, BMP y GIF.

3.2.2 CALIBRACIÓN DE LOS EJES

Después de cargar la imagen deseada, debe especificar el tipo de ejes que se utilizan en los gráficos. Los datos granulométricos por lo general se encuentran representados en:

- Histogramas de frecuencia cuyos ejes x e y indican la escala del tamaño de grano vs. la distribución de cada clase (Fig. 3.2).
- Curvas granulométricas cuyos ejes x e y indican la abertura del tamiz (tamaño de grano) y la distribución acumulada (porcentaje), respectivamente.

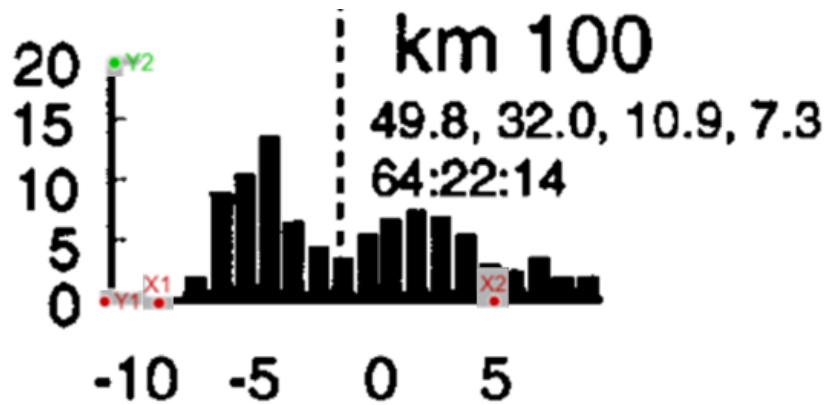


Figura 3.2. Imagen cargada en el software WebPlotDigitizer donde se han calibrado los ejes.

3.2.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

Cuando han sido calibrado los ejes de los gráficos y se ha eliminado la cuadrícula de fondo (si fuera el caso), se empiezan a seleccionar los puntos de datos en los gráficos e imágenes (Fig. 3.3). Este procedimiento se lo puede realizar en el modo manual o automático.

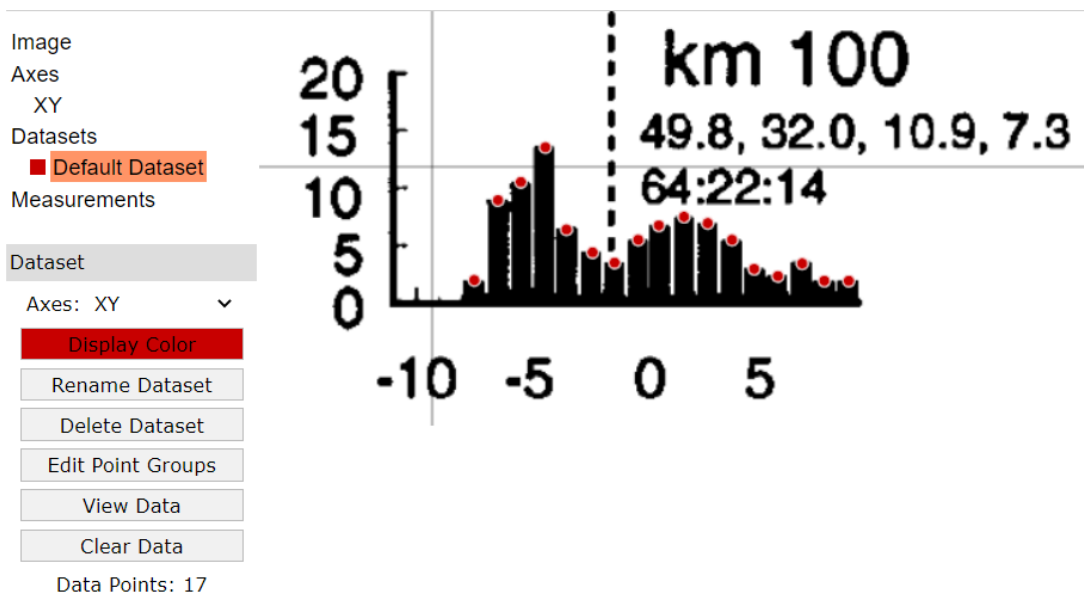


Figura 3.3. Imagen cargada en el software WebPlotDigitizer que muestra los puntos con información que va a ser extraída.

3.2.4 MANEJO Y TRATAMIENTO DE DATOS DIGITALIZADOS

Luego de que los puntos de datos requeridos se han marcado en la imagen utilizando el modo manual, el modo automático o una combinación de ambos, los valores digitalizados pueden ser extraídos o exportados a archivos de texto simples que contienen datos tabulares (CSV), el cual es compatible con la mayoría de software de análisis de datos como Microsoft Excel, Matlab, etc.

3.3 PARÁMETROS PARA ESTUDIOS GRANULOMÉTRICOS

Los ensayos granulométricos y datos proporcionados para este estudio fueron analizados en base a parámetros estadísticos formulados por Folk y Ward (1957) los cuales fueron modificados del trabajo realizado por Inman (1952). Se utilizaron cinco parámetros que son comúnmente utilizados en estadística, los cuales se calculan a partir de percentiles de obtenidos de la curva de frecuencia acumulada y describen con mayor precisión la distribución del tamaño de grano de los componentes (Tabla 3.1). Los parámetros fueron calculados con ayuda del software SFT y analizados en Microsoft Excel.

Parámetros	Fórmulas
Mediana	Φ_{50}
Media	$\frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3}$
Desviación estándar gráfica inclusiva	$\frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6}$
Asimetría inclusiva gráfica	$\frac{\Phi_{84} + \Phi_{16} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_{95} + \Phi_5 - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$
Curtosis gráfica	$\frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})}$

Tabla 3.1. Fórmulas de los parámetros estadísticos gráficos comunes para estudios granulométricos. Φ_n es el percentil n de la distribución de tamaño en la curva de frecuencia acumulada. Tomado de Folk y Ward (1957).

3.3.1 MEDIANA (Md)

Es el valor que ocupa la posición central en la curva de distribución de frecuencia acumulada (Fig. 3.4), representado por Φ_{50} (el tamaño de grano para el cual el 50 % de la muestra es más fina y el 50 % es más gruesa) (Inman, 1952).

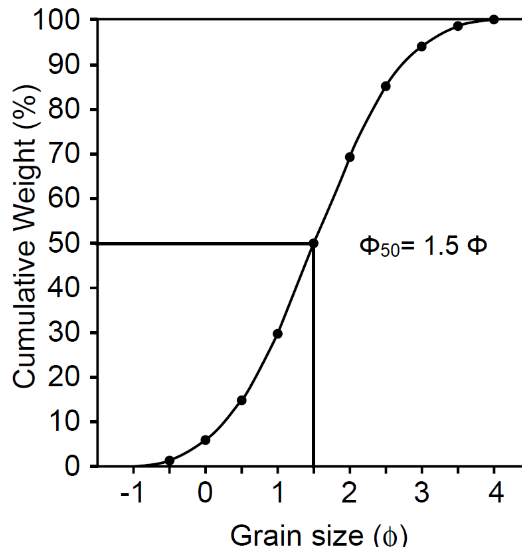


Figura 3.4. Ilustración esquemática que muestra el valor de la mediana (Φ_{50}) en una curva de frecuencia acumulada. Modificado de Cheel (2021).

3.3.2 MEDIA (Mz)

Es el valor promedio aritmético del tamaño de grano de la distribución. En distribuciones normales perfectamente simétricas, la media es igual a la mediana (Fig. 3.5). Se debe tener en cuenta que la media real no se puede determinar a partir de los datos obtenidos mediante el análisis granulométrico, sin embargo, se puede aproximar mediante la fórmula de Folk y Ward (1957).

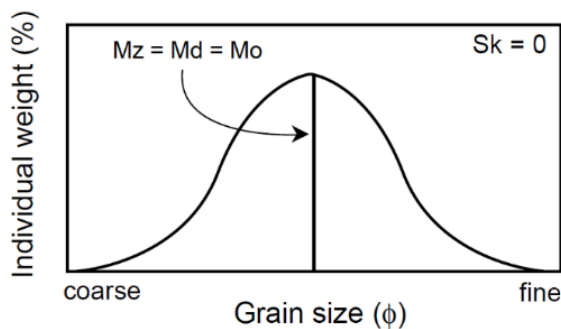


Figura 3.5. Ilustración esquemática que muestra una distribución simétrica en una curva de frecuencia. Mz: media. Md: mediana (Φ_{50}). Mo: moda. Sk: asimetría. Modificado de Cheel (2021).

3.3.3 DESVIACIÓN ESTÁNDAR GRÁFICA INCLUSIVA (σ_I)

También conocido como coeficiente de dispersión, refleja el grado de selección granulométrica o clasificación que conforman un depósito. Los sedimentos pobremente clasificados poseen una variedad de tamaños de granos, mientras que los sedimentos que están bien clasificados son de tamaño similar (Cheel, 2021). En la Tabla 3.2 se describe el grado de sorteo según el rango de valor de σ_I calculado.

σ_I	Grado de sorteo
$0 < \sigma_I < 0.35$	Muy bueno
$0.35 < \sigma_I < 0.5$	Bueno
$0.5 < \sigma_I < 1.00$	Moderado
$1.00 < \sigma_I < 2.00$	Pobre
$2.00 < \sigma_I < 4.00$	Muy pobre
$\sigma_I > 4.00$	Extremadamente pobre

Tabla 3.2. Descripción del grado de selección granulométrica según el valor de σ_I . Tomado de Folk y Ward (1957).

3.3.4 ASIMETRÍA GRÁFICA INCLUSIVA (Sk_I)

Este valor permite establecer el grado de simetría (o asimetría) que presenta una curva de distribución. En una distribución simétrica, la media y la mediana coinciden, pero si la distribución está sesgada, la media se aparta de la mediana, y la medida de esta desviación puede utilizarse como medida de la asimetría (Inman, 1952). En la Tabla 3.3 se describe el grado de asimetría según el rango de valor de Sk_I calculado.

Sk_i	Grado de asimetría
+0.3 < Sk _i < +1.0	Muy positiva
+0.1 < Sk _i < +0.3	Positiva
-0.1 < Sk _i < +0.1	Casi simétrica
-0.3 < Sk _i < -0.1	Negativa
-1.0 < Sk _i < -0.3	Muy negativa

Tabla 3.3. Descripción del coeficiente de asimetría según el valor de Sk_i. Tomado de Folk y Ward (1957).

3.3.5 CURTOSIS GRÁFICA (K_G)

Es el valor que indica cuán escarpada se encuentra una curva de distribución. Mide la proporción de la clasificación en los extremos de la distribución en comparación con la clasificación en la parte central y, como tal, es una prueba sensible y valiosa de la normalidad de una distribución (Inman, 1952). En la Tabla 3.4 se describe el grado de curtosis según el rango de valor de K_G calculado.

K_G	Grado de curtosis
Sk _i > 3.0	Extremadamente leptocúrtica
1.50 < Sk _i < 3.0	Muy leptocúrtica
1.11 < Sk _i < 1.5	Leptocúrtica
0.9 < Sk _i < 1.11	Mesocúrtica
0.67 < Sk _i < 0.9	Platicúrtica
Sk _i < 0.67	Muy platicúrtica

Tabla 3.4. Descripción del coeficiente de curtosis según el valor de K_G. Tomado de Folk y Ward (1957).

3.4 ELABORACION DE UN STORYMAP

ArcGIS StoryMaps es una aplicación online que permite la creación de mapas interactivos usando contenido multimedia (imágenes o videos) y texto; con la finalidad de contar historias o presentar información relevante, despertando el interés y generando un atractivo visual hacia el usuario (Fig. 3.6). En ese contexto, se utilizó esta herramienta para presentar los resultados de esta investigación (Sección 4.4).



Figura 3.6. Interfaz de usuario gráfica que muestra la estructura de un StoryMap.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 GRANULOMETRÍA

En el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional (Laboratorio calificado por el INEN y miembro del Sistema Nacional de Laboratorios, SILA) se realizaron análisis granulométricos por tamizado (Anexo II) para el Instituto Geofísico de 23 muestras recolectadas por los investigadores Dr. Minard Hall y MSc. Patricia Mothes durante campañas de campo (Anexo III). En este trabajo, se consideraron dichos ensayos con el fin de analizar las características granulométricas del depósito del CVL.

Los resultados son representados gráficamente mediante histogramas de frecuencia, porcentaje en peso de las clases granulométricas (wt. %) vs. tamaño de grano en phi (Φ) y mediante curvas granulométricas, porcentaje de material que atraviesa cada tamiz (wt. %) vs. abertura del tamiz (mm) en formato "log-normal". En base a distancias referentes a los sitios de muestreo, se dividió en 3 facies o segmentos: proximales, medios y distales.

4.1.1 FACIES PROXIMALES

Las facies proximales en el depósito del CVL se encuentran representadas por las muestras P - 2, 4, 12, 13, 14, 18 y 23, cuyas distancias oscilan entre 8 y 11 km río abajo desde la fuente del lahar (Fig. 3.1). Los ensayos granulométricos (Tabla 4.1) muestran que los granos de tamaño de arena (0.0625 - 2 mm) constituyen ~44.5 wt. %, la fracción de finos (Arcilla y Limo < 0.0625 mm) es de ~7.9 wt. %, mientras que la fracción de material grueso (>2 mm) es de ~47.6 wt. %. Las curvas granulométricas (Fig. 4.1) evidencian el gran contenido de matriz en el depósito ~ (37 - 81 wt. %).

Muestra	Contenido (wt. %)			Parámetros estadísticos							
	<0.06 mm	0.06-2 mm	>2 mm	Mz (Φ)	Md (Φ)	σ_1		Sk _i		K _G	
P-2	6.1	30.8	63.1	-1.6	-2.4	3.0	Muy pobre	0.42	Muy positiva	0.81	Platicúrtica
P-4	7.5	30.3	62.1	-1.2	-2.2	3.1	Muy pobre	0.42	Muy positiva	0.79	Platicúrtica
P-12	9.2	39.9	50.9	-0.9	-1.1	3.3	Muy pobre	0.15	Positiva	0.62	Muy platicúrtica
P-13	10.0	38.3	51.8	-0.9	-1.2	3.3	Muy pobre	0.18	Positiva	0.65	Muy platicúrtica
P-14	7.6	50.6	41.8	-0.1	-0.4	2.7	Muy pobre	0.15	Positiva	0.89	Platicúrtica
P-18	14.0	67.4	18.6	-1.1	0.8	2.3	Muy pobre	0.15	Positiva	0.83	Platicúrtica
P-23	0.7	54.1	45.2	-1.1	-0.5	2.4	Muy pobre	-0.29	Negativa	0.70	Platicúrtica
Mean	7.9	44.5	47.6								

Tabla 4.1. Parámetros estadísticos de (Folk y Ward, 1957) y contenido (wt. %) en las facies proximales del CVL. Mz: media. Md: mediana (Φ_{50}). σ_1 : desviación estándar gráfica inclusiva (sorteo). Sk_i: asimetría inclusiva gráfica. K_G: curtosis gráfica.

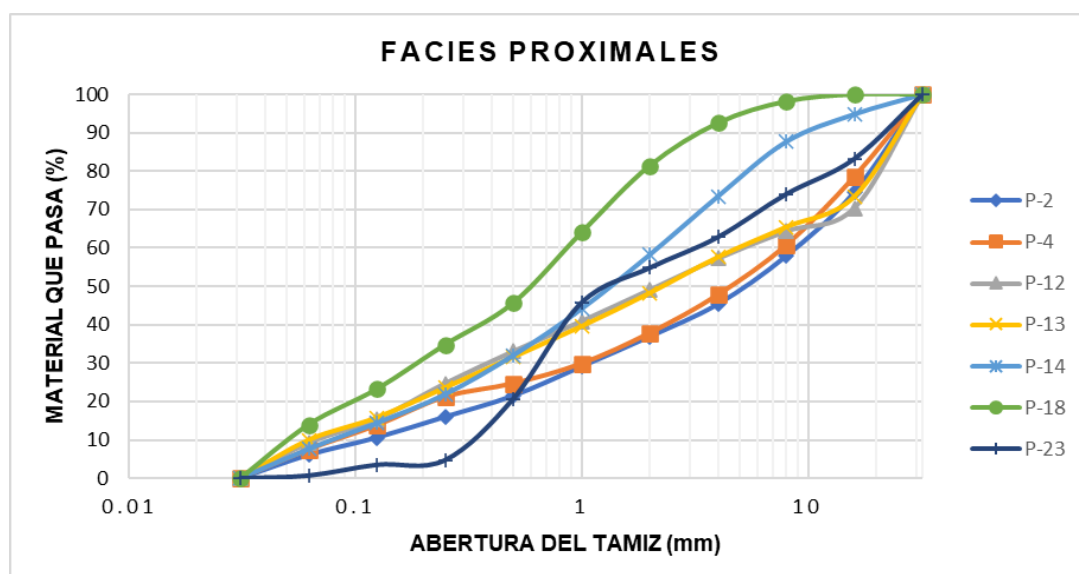


Figura 4.1. Curvas granulométricas de las facies proximales en el CVL. Porcentaje de material que atraviesa cada tamiz (wt. %) vs. abertura del tamiz (mm) representado en formato “log-normal”.

Los parámetros estadísticos de (Folk y Ward, 1957) indican que la Media de tamaño de grano se encuentra entre -1.6 y -0.1 (ϕ Φ), la mediana varía entre -2.4 y 0.8 (ϕ Φ), el σ_1 (sorteo) tiene valores entre 2.3 y 3.3 que representan un sorteo muy pobre. El coeficiente de asimetría (Sk_i) varía entre 0.15 y 0.42 presentando una asimetría positiva a muy positiva, es decir, los histogramas (Fig. 4.2) exhiben una distribución sesgada a la derecha (mayor proporción de granos gruesos) a excepción de la muestra P-23; y la curtosis (K_G) presenta valores entre 0.6 y 0.9 que indican curvas de distribución Platicúrticas.

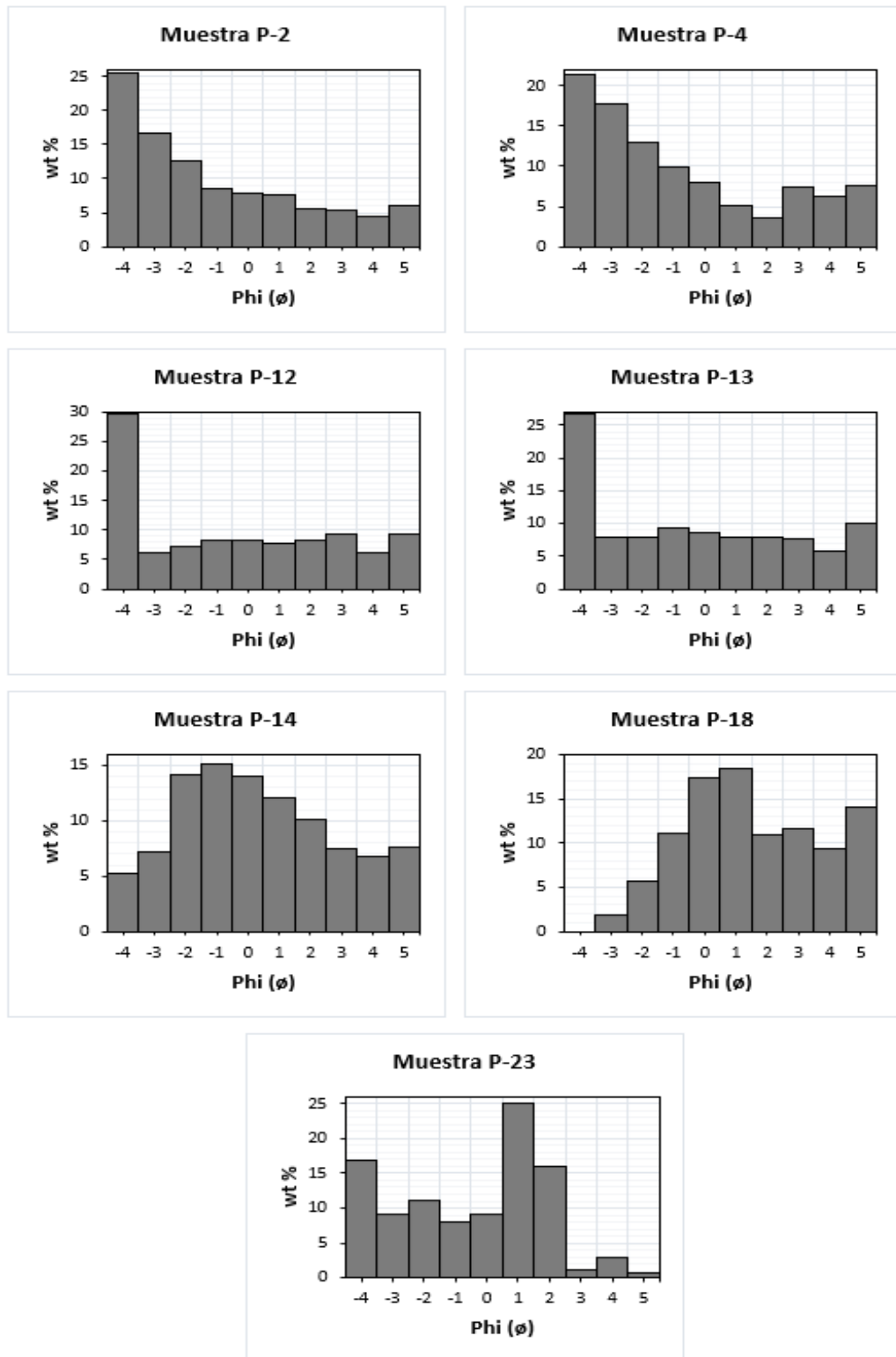


Figura 4.2. Histogramas de distribución para las facies proximales del CVL. wt. %: porcentaje en peso. Phi (Φ): escala del tamaño de grano.

4.1.2 FACIES MEDIAS

Las facies medias en el depósito del CVL se encuentran representadas por las muestras M -1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 19, 20, 21, 22; cuyas distancias oscilan entre 18 y 43 km río abajo desde la fuente del lahar (Fig. 3.1). Los ensayos granulométricos (Tabla 4.2) muestran que los granos de tamaño de arena (0.0625 - 2 mm) constituyen ~52.5 wt. %, la fracción de finos (Arcilla y Limo < 0.0625 mm) es de ~12.8 % wt. %, mientras que la fracción de material grueso (>2 mm) es de ~34.7 wt. %. El contenido de matriz varía entre aprox. 37 - 90 wt. %, que se evidencia en las curvas granulométricas (Fig. 4.3).

Muestra	Contenido (wt. %)			Parámetros estadísticos							
	<0.06 mm	0.06-2 mm	>2 mm	Mz (Φ)	Md (Φ)	σ_1		Sk _i		K _G	
M-1	20.4	60.9	18.6	1.6	1.9	2.5	Muy pobre	-0.20	Negativa	0.76	Platicúrtica
M-3	19.5	49.9	30.6	0.8	1.2	3.1	Muy pobre	-0.18	Negativa	0.72	Platicúrtica
M-5	13.0	74.8	12.2	1.9	2.0	2.3	Muy pobre	-0.24	Negativa	1.49	Leptocúrtica
M-6	21.5	53.5	25.0	1.2	1.4	2.9	Muy pobre	-0.17	Negativa	0.78	Platicúrtica
M-7	18.4	57.5	24.2	0.9	1.7	3.2	Muy pobre	-0.35	Muy negativa	0.89	Platicúrtica
M-8	20.0	67.9	12.1	1.9	2.0	2.2	Muy pobre	-0.15	Negativa	0.91	Mesocúrtica
M-9	20.0	69.8	10.2	2.0	2.1	2.2	Muy pobre	-0.14	Negativa	0.91	Mesocúrtica
M-10	9.7	44.1	46.2	-0.6	-0.6	3.3	Muy pobre	0.03	Casi Simétrica	0.63	Muy platicúrtica
M-11	7.4	33.2	59.3	-1.5	-2.6	3.2	Muy pobre	0.46	Muy positiva	0.68	Platicúrtica
M-15	16.1	48.3	35.6	0.5	0.6	3.2	Muy pobre	-0.08	Simétrica	0.76	Platicúrtica
M-19	3.9	33.3	62.8	-1.6	-2.4	3.0	Muy pobre	0.41	Muy positiva	0.76	Platicúrtica
M-20	2.3	36.9	60.8	-1.4	-1.8	2.7	Muy pobre	0.27	Positiva	0.87	Platicúrtica
M-21	2.4	40.4	57.2	-1.2	-1.6	2.9	Muy pobre	0.21	Positiva	0.74	Platicúrtica
M-22	5.2	64.3	30.5	0.8	1.3	2.7	Muy pobre	-0.26	Negativa	0.65	Muy platicúrtica
Mean	12.8	52.5	34.7								

Tabla 4.2. Parámetros estadísticos de (Folk y Ward, 1957) y contenido (wt. %) en las facies proximales del CVL. Mz: media. Md: mediana (Φ_{50}). σ_1 : desviación estándar gráfica inclusiva (sorteo). Sk_i: asimetría inclusiva gráfica. K_G: curtosis gráfica.

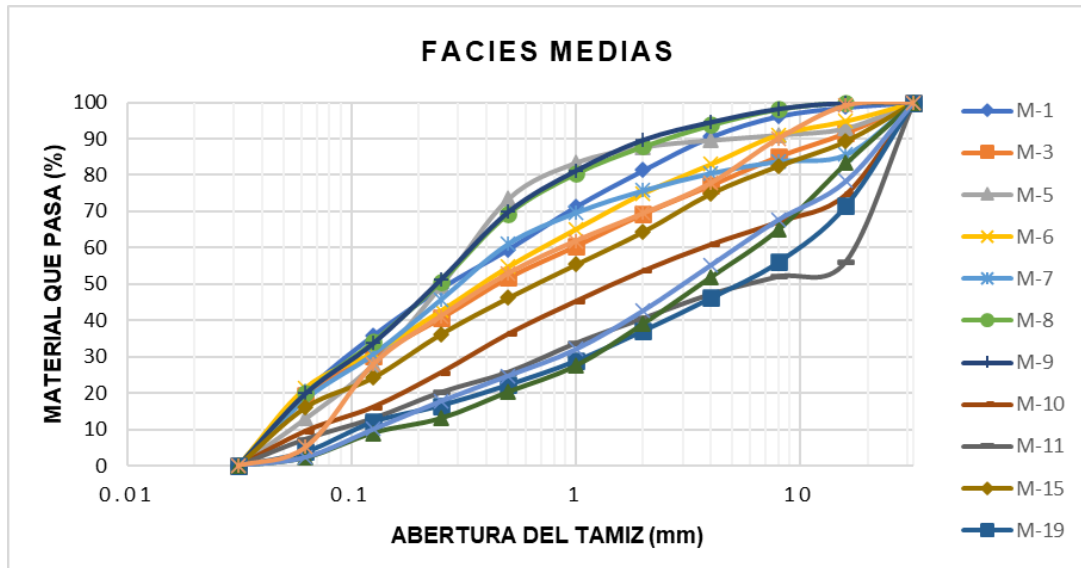


Figura 4.3. Curvas granulométricas de las facies medias en el CVL. Porcentaje de material que atraviesa cada tamiz vs. abertura del tamiz (mm) representado en formato “log-normal”.

Los parámetros estadísticos de Folk y Ward (1957) indican que la media de tamaño de grano se encuentra entre -1.6 y 2 (ϕ Φ), la mediana varía entre -2.6 y 2.1 (ϕ Φ), el σ_1 (sorteo) tiene valores entre 2.2 y 3.3 que representan un sorteo muy pobre. El coeficiente de asimetría (Sk_1) varía entre -0.4 y 0.5 presentando curvas de distribución de varios tipos (con sesgo a la izquierda, derecha y casi simétricas) que se interpretan como una variedad en la proporción de los tamaños de grano. La curtosis (K_G) presenta valores entre 0.6 y 1.6 que indican mayoritariamente curvas de distribución Platicúrticas (Fig. 4.4) con excepción de las muestras M-5 que exhibe una curva leptocúrtica y las muestras M-8 y M-9 con curvas de distribución mesocúrticas.

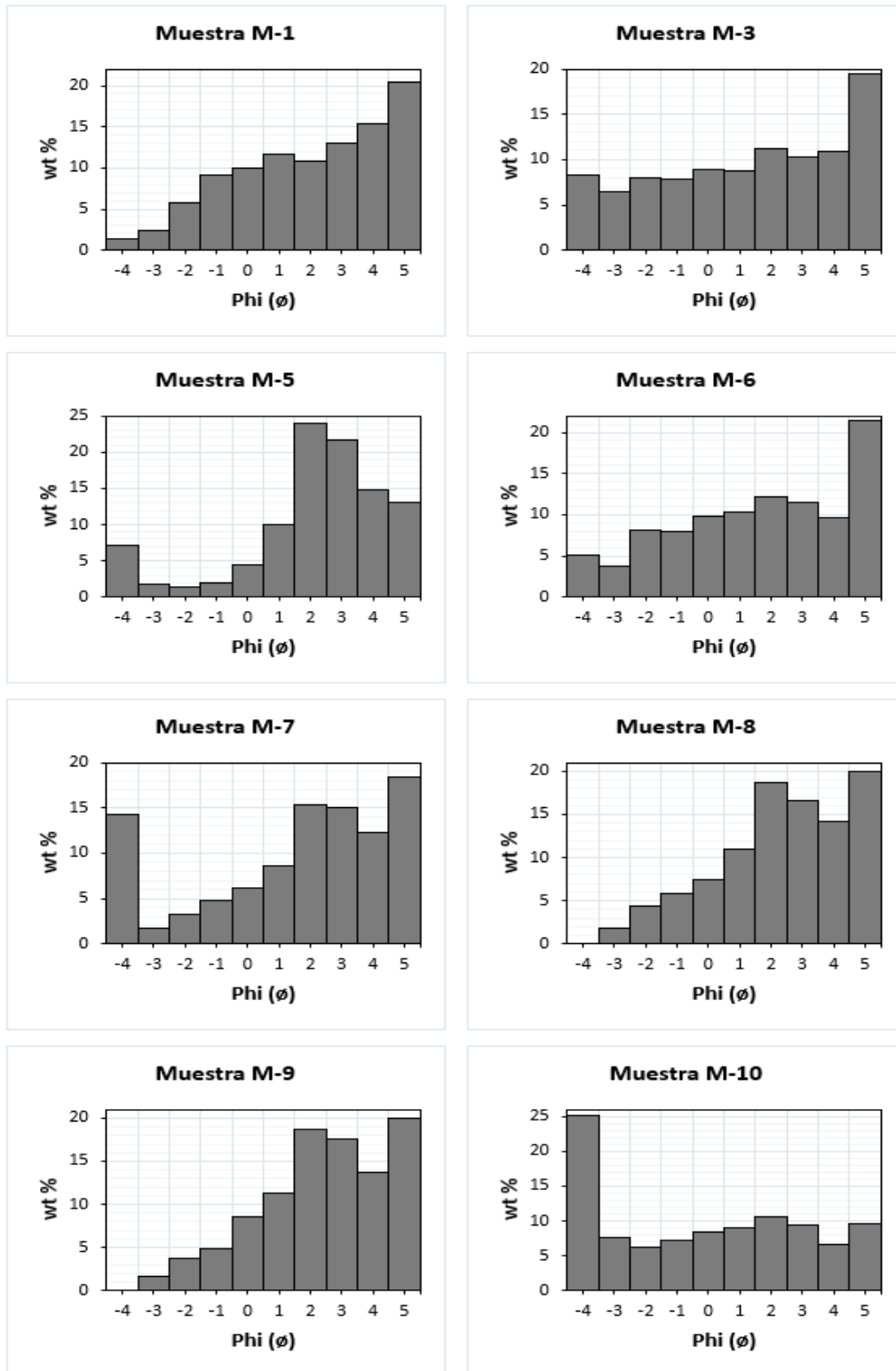


Figura 4.4. Histogramas de distribución para las facies medias del CVL. wt. %: porcentaje en peso. Phi (Φ): escala del tamaño de grano.

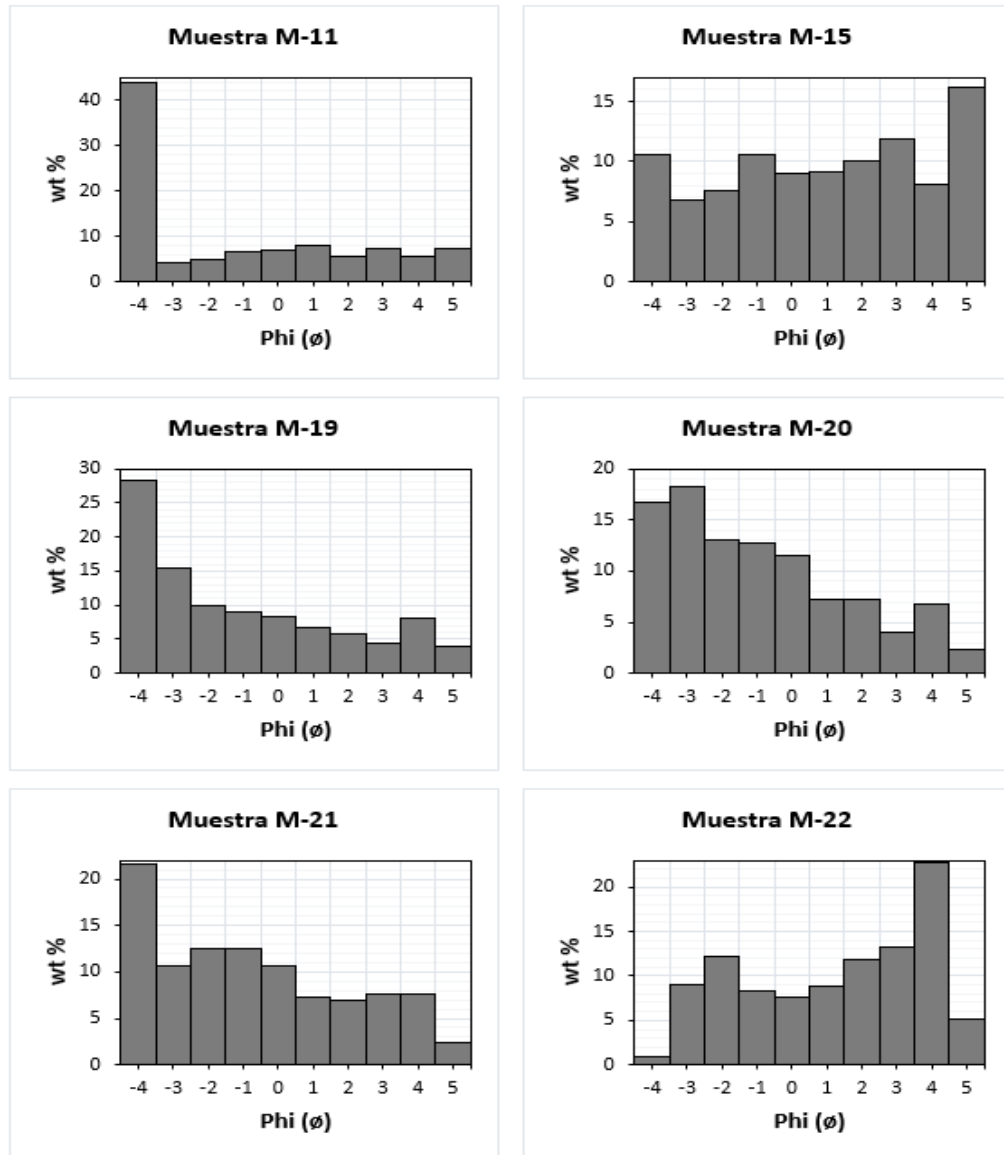


Figura 4.4 (Continuación). Histogramas de distribución para las facies medias del CVL. wt. %: porcentaje en peso. Phi (Φ): escala del tamaño de grano.

4.1.3 FACIES DISTALES

Las facies distales en el depósito del CVL se encuentran representadas por las muestras D-16 y D-17; cuyas distancias se ubican a 52 y 53 km río abajo desde la fuente del lahar (Fig. 3.1). Los ensayos granulométricos (Tabla 4.3) muestran que los granos de tamaño de arena (0.0625 - 2 mm) constituyen ~45.3 wt. %, la fracción de finos (Arcilla y Limo < 0.0625 mm) es de ~8 % wt. %, mientras que la fracción de material grueso (>2 mm) es de ~46.6 % wt. %.

Las curvas granulométricas (Fig. 4.5) evidencian el gran contenido de matriz en el depósito ~ (47 - 59 wt. %).

Muestra	Contenido (wt. %)			Parámetros estadísticos							
	<0.06 mm	0.06-2 mm	>2 mm	Mz (Φ)	Md (Φ)	σ_i		Sk_i		K_G	
D-16	11.0	48.5	40.5	0.0	-0.4	2.92	Muy pobre	0.09	Simétrica	0.88	Platicúrtica
D-17	5.1	42.2	52.8	1.2	-1.2	2.93	Muy pobre	0.14	Positiva	0.73	Platicúrtica
Mean	8.0	45.3	46.6								

Tabla 4.3. Parámetros estadísticos gráficos de (Folk y Ward, 1957) en las facies distales del CVL. Mz: media. Md: mediana (Φ_{50}). σ_i : desviación estándar gráfica inclusiva (sorteo). Sk_i : asimetría inclusiva gráfica. K_G : curtosis gráfica.

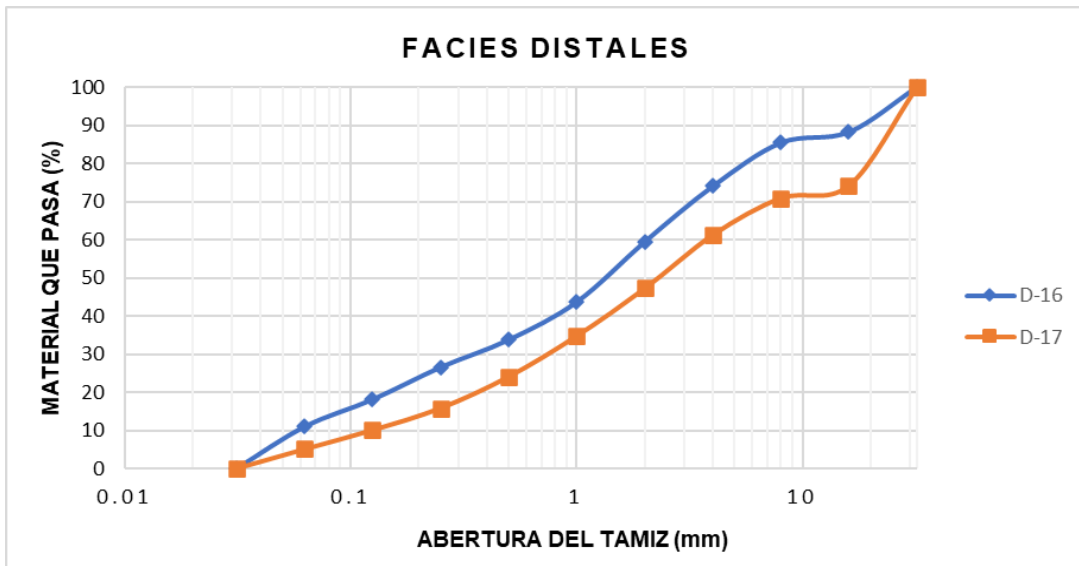


Figura 4.5. Curvas granulométricas de las facies medias en el CVL. Porcentaje de material que atraviesa cada tamiz vs. abertura del tamiz (mm) representado en formato “log-normal”.

Los parámetros estadísticos de (Folk y Ward, 1957) indican que la media de tamaño de grano se encuentra entre 0 y 1.2 (Φ), la mediana varía entre -1.2 y -0.4 (Φ), el σ_i (sorteo) tiene valores de 2.92 y 2.93 que representan un sorteo muy pobre. El coeficiente de asimetría (Sk_i) varía entre 0.09 y 0.14 presentando una asimetría simétrica a positiva, es decir, los histogramas (Fig. 4.6) exhiben una distribución no sesgada (muestra D-16) a sesgada a la derecha (muestra D-17). La curtosis (K_G) presenta valores de 0.73 y 0.88 que indican curvas de distribución Platicúrticas.

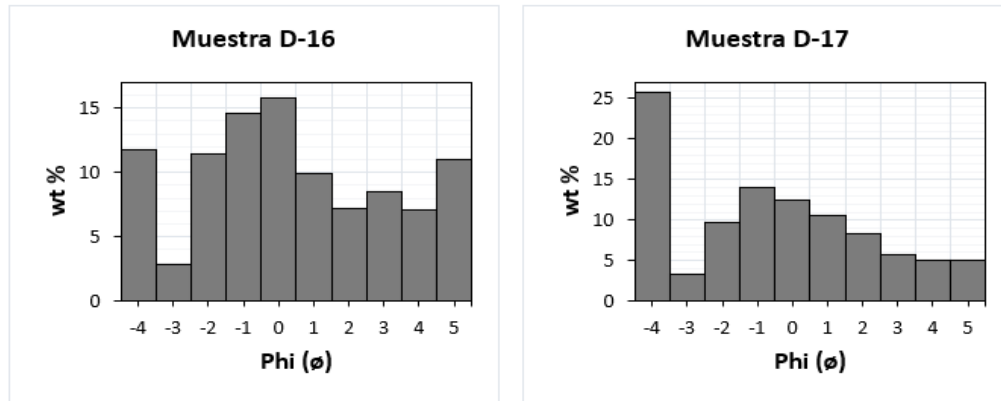


Figura 4.6. Histogramas de distribución para las facies distales del CVL. wt. %: porcentaje en peso. Phi (Φ): escala de tamaño de grano.

4.1.4 COMPARACIONES GRANULOMÉTRICAS

Los datos granulométricos obtenidos para el Chilllos Valley Lahar (23 muestras) son comparados con los del lahar Osceola (21 muestras) del Mount Rainier (Washington, USA), un extenso flujo cohesivo que contiene entre 6 – 25 wt. % de granos de tamaño de Arcilla y Limo (< 0.0625 mm) (Vallance y Scott, 1997). El depósito CVL contiene mayor cantidad de granos de tamaño de arena (49.4 wt. % vs. 27.5 wt. % en promedio). Además, contiene menos material de tamaño de arcilla y limo (10.9 wt. % vs. 15.7 wt. %), así como menos material grueso (39.7 wt. % vs. 56.6 wt. %). Lo cual denota que el depósito CVL está claramente dominado por la fracción del tamaño de arena (Fig. 4.7a, b).

Los análisis granulométricos del del CVL también son comparados con los del lahar de 1877 (Fig. 4.7c) (18 muestras), el último de importancia producido por el Cotopaxi caracterizado por transportar numerosos bloques de escoria y que se refleja en su alto porcentaje de grava (25 – 80 wt. %) (Mothes et al., 2004). El depósito del CVL contiene mayor proporción de granos de tamaño de arena (49.4 wt. % vs. 44.4 wt. %) y mayor cantidad de material fino (10.9 wt. % vs. 5.1 wt. %) que lo caracterizan como un lahar rico en matriz (Fig. 4.9a). Sin embargo, el contenido de grava es mayor en el depósito lahórico de 1877 (50.6 wt. % vs. 39.7 wt. %), por lo cual está clasificado en la categoría textural de "flujos de detritos granulares" (Mothes et al., 2004).

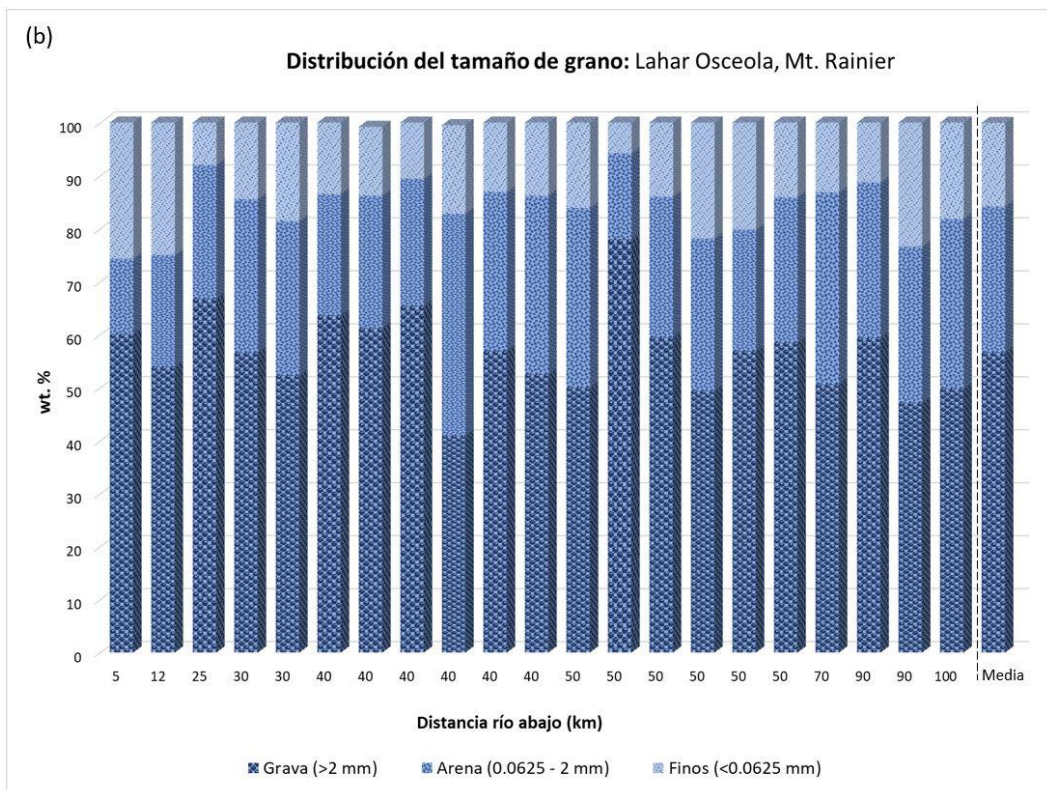
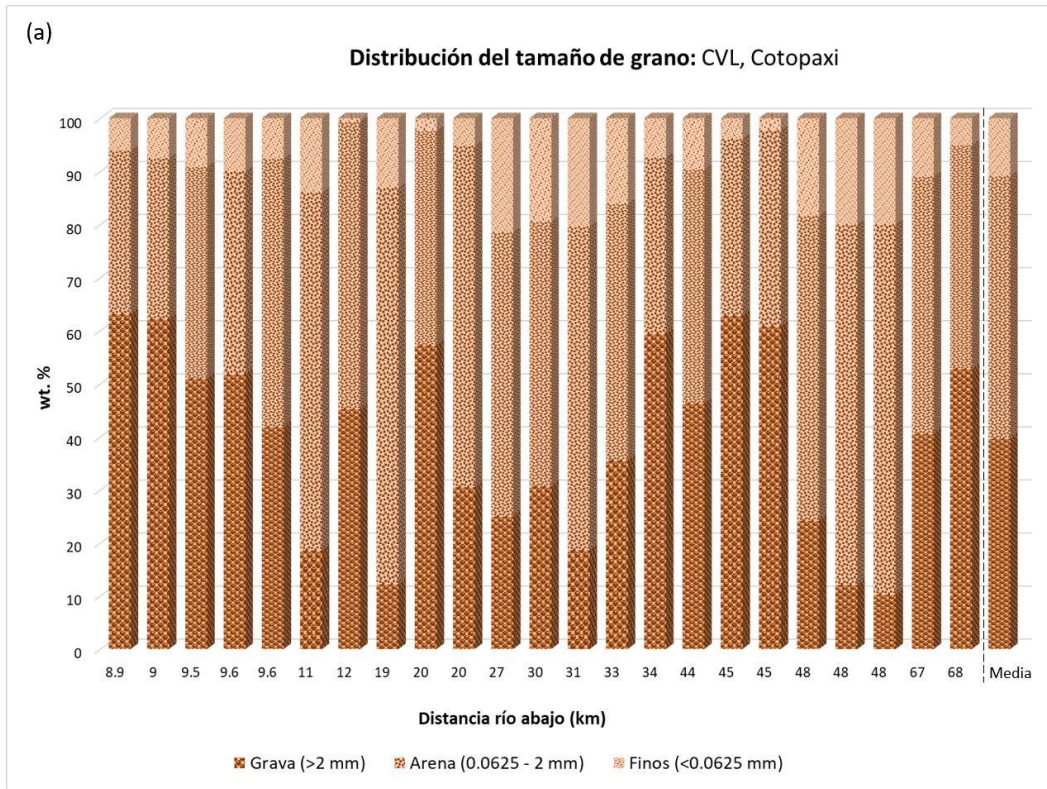


Figura 4.7. Distribución del tamaño de grano de los depósitos laháricos (a) CVL, Cotopaxi; (b) Lahar Osceola, Mt. Rainier vs. la distancia (km) río abajo desde la fuente del lahar que muestra el porcentaje en peso de grava, arena y finos. Datos de lahar Osceola, Mt. Rainier tomados de Vallance y Scott (1997).

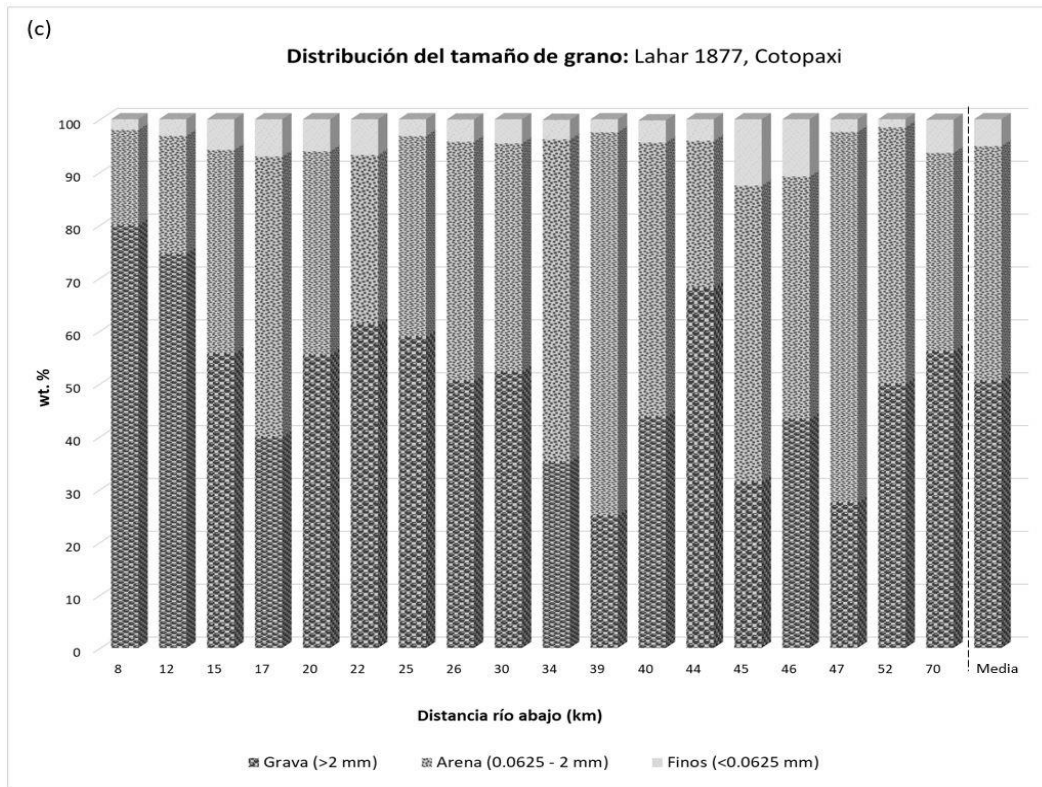


Figura 4.7 (Continuación). Distribución del tamaño de grano de los depósitos laháricos (c) Lahar de 1877, Cotopaxi vs. la distancia (km) río abajo desde la fuente del lahar que muestra el porcentaje en peso de grava, arena y finos. Datos de lahar 1877, Cotopaxi tomados de Mothes et al. (2004).

Mediante el diagrama de clasificación de flujos propuesto por Pierson y Scott (1999), en el cual se relaciona la media del tamaño de grano (M_z) y el sorteo (σ_1), ambos en unidades Phi (Φ); la mayoría de las muestras del CVL (con excepción de 3 muestras de las facies medias) se sitúan en la categoría de “flujos de escombros no cohesivos” (Fig. 4.8a) o pobres en arcilla en los que el componente fino (partículas del tamaño de limo y arcilla) es generalmente <10 wt. %; las fracciones de grava se encuentran entre el 10.2 y el 63.1 wt. %, y las fracciones de arena entre el 30.3 y el 74.8 wt. %.

Los datos granulométricos del lahar histórico de 1877 del Cotopaxi y del lahar Osceola del Mt. Rainier también son presentados en el diagrama de clasificación de flujos propuesto por Pierson y Scott (1999) (Fig. 4.8b), en el que se observa claramente que el lahar Osceola corresponde a un flujo de escombros cohesivo que concuerda con lo descrito por Vallance y Scott (1997).

El alto contenido de arcillas en este tipo de lahares se debe a que estos generalmente se forman por el colapso de edificios alterados hidrotermalmente (John et al., 2008; Scott et al., 1995).

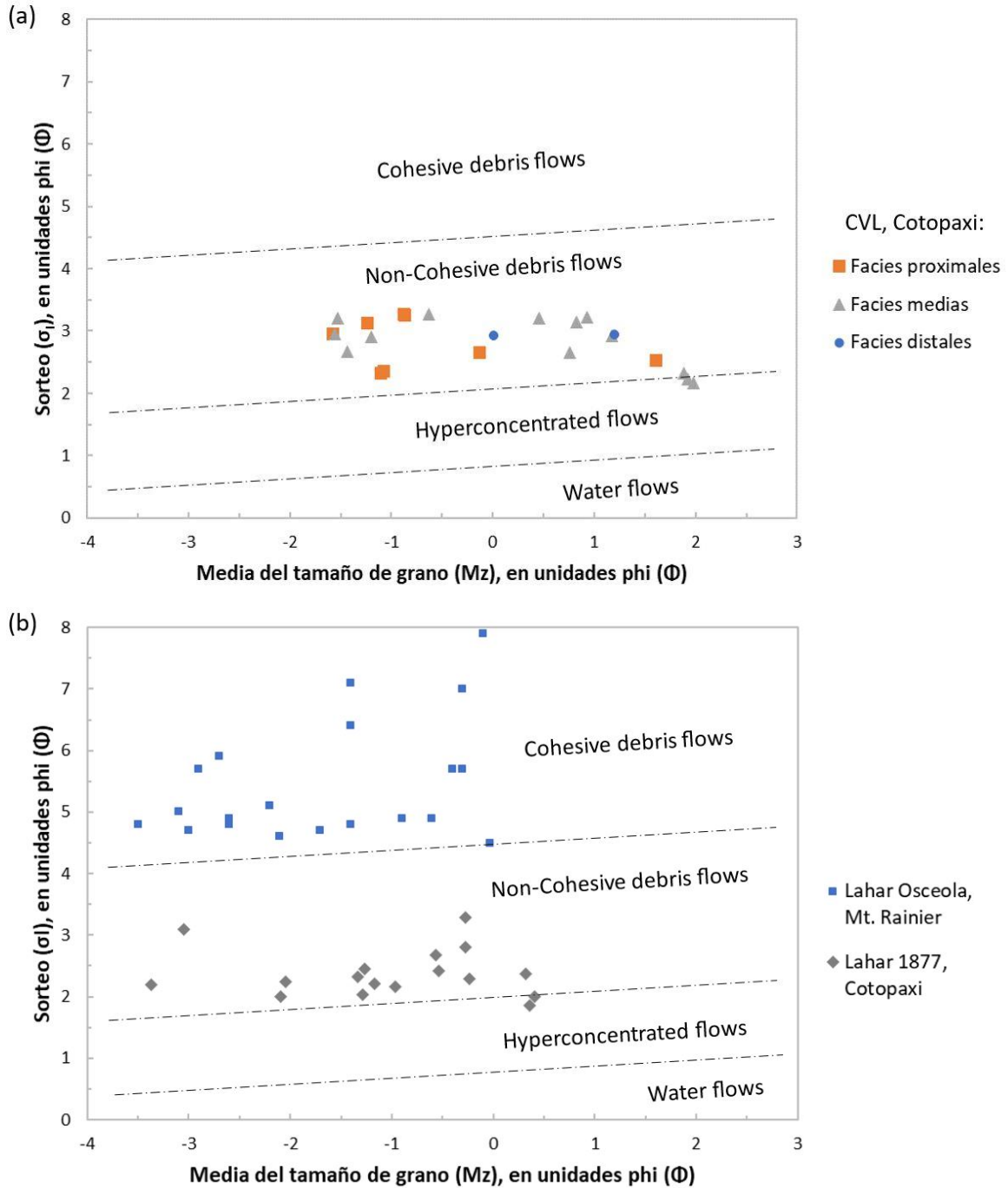


Figura 4.8. Método de clasificación de flujos propuesto por Pierson y Scott (1999). En (a) muestras de las facies proximales, medias y distales del depósito CVL. En (b) para el lahar Osceola, Mt. Rainier (azul) y lahar de 1877, Cotopaxi (gris). Datos de lahar Osceola, Mt. Rainier tomados de Vallance y Scott (1997). Datos de lahar 1877, Cotopaxi tomados de Mothes et al. (2004).

Las muestras del lahar histórico de 1877 del Cotopaxi, por su parte, se ubican en el campo de flujos de escombros no cohesivos o pobres en arcilla, debido a que este transportó una mayor cantidad de material grueso (~50.6 wt. %); lo cual se evidencia en sus afloramientos en los que se puede observar grandes bloques andesíticos y escorias negras de los flujos piroclásticos que originaron el lahar (Fig. 4.9b) (Mothes et al., 2004).

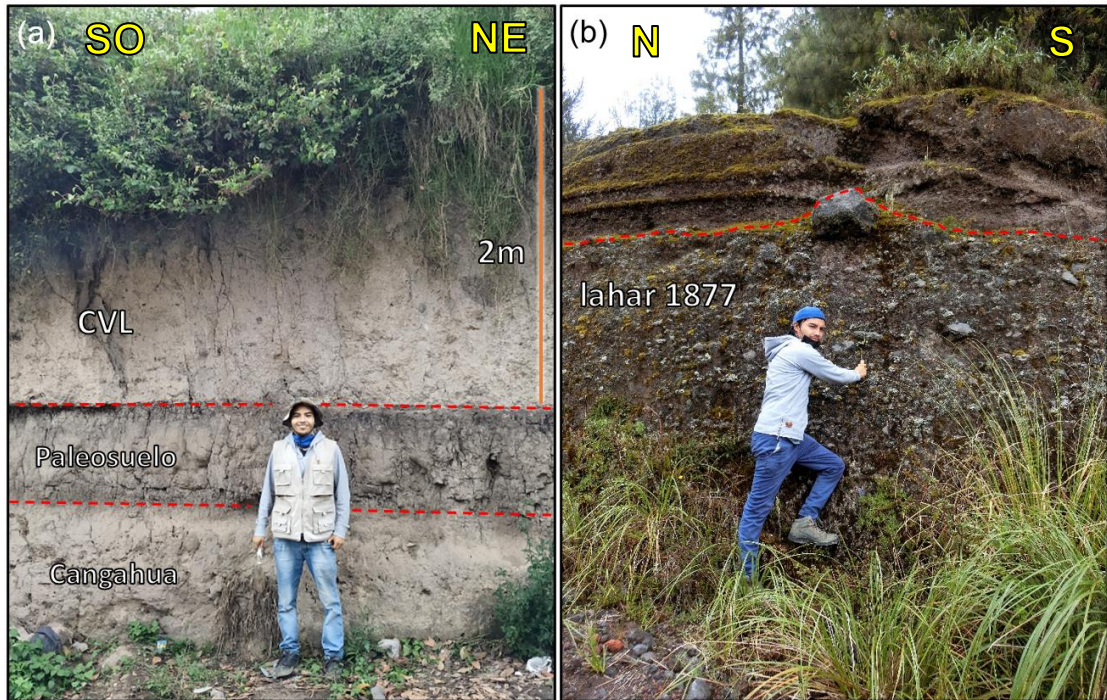


Figura. 4.9. Afloramientos de dos depósitos lahéricos del volcán Cotopaxi. (a) Chillos Valley Lahar a 100 m. del parque de Conocoto. (b) Lahar histórico de 1877 en las inmediaciones del Parque Nacional Cotopaxi.

4.2 PETROGRAFÍA DEL DEPÓSITO Y OTROS ELEMENTOS ENCONTRADOS

En la Tabla 4.4 se describe la petrografía observada en muestra de mano de los principales clastos encontrados en el depósito CVL.

Clastos	Descripción
Riolita	Textura porfirítica y afanítica, estructura masiva a bandeada; en varias tonalidades de gris a crema con abundantes fenocristales de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas y micas (biotita, muscovita) en una matriz microcristalina. Los clastos son angulares a subredondeados de baja esfericidad a subesféricos (Fig. 4.10a).
Vitrófiro riolítico	Textura porfirítica, estructura masiva a brechoide y semi-frágil. De color gris a negro con fenocristales de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasas en una matriz vítrea. Los clastos son angulares y de baja esfericidad (Fig. 4.10b).
Andesita	Textura porfirítica, estructura masiva y vesicular; de color gris oscuro a negro. Mineralógicamente constituida por plagioclasa, anfíbol y piroxeno dentro de una matriz microcristalina. Los clastos son angulares a subredondeados de baja esfericidad a subesféricos (Fig. 4.10c).
Dacita	Textura porfirítica, estructura masiva; de color gris claro con fenocristales de cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita en una matriz microcristalina. Los clastos son angulares a subredondeados de baja esfericidad a subesféricos (Fig. 4.10d).
Obsidiana	Textura vítrea y perlítica; estructura masiva a fluidal; de color negro azabache y fractura concoidal típica. Raramente se encuentran fenocristales de cuarzo y plagioclasa en su matriz. Los clastos son angulares y de baja esfericidad (Fig. 4.10e).
Pómez	Textura vítrea (holohialina), estructura vesicular y fibrosa; de color blanco a gris claro y brillo sedoso con fenocristales de biotita y plagioclasas (menos frecuentes). Los clastos son angulares a subredondeados de baja esfericidad a subesféricos (Fig. 4.10f).

Escoria	Textura vítrea, estructura vesicular o escoriácea y de aspecto irregular; de color gris, rojizo o negro con fenocristales de plagioclasas. Los clastos son angulares y de baja esfericidad (Fig. 4.10g, h).
---------	---

Tabla 4.4. Principales componentes líticos del depósito CVL. (a) Riolita. (b) Vitrófiro riolítico. (c) Andesita. (d) Dacita. (e) Obsidiana. (f) Pómez. (g) Escoria negra. (h) Escoria rojiza.

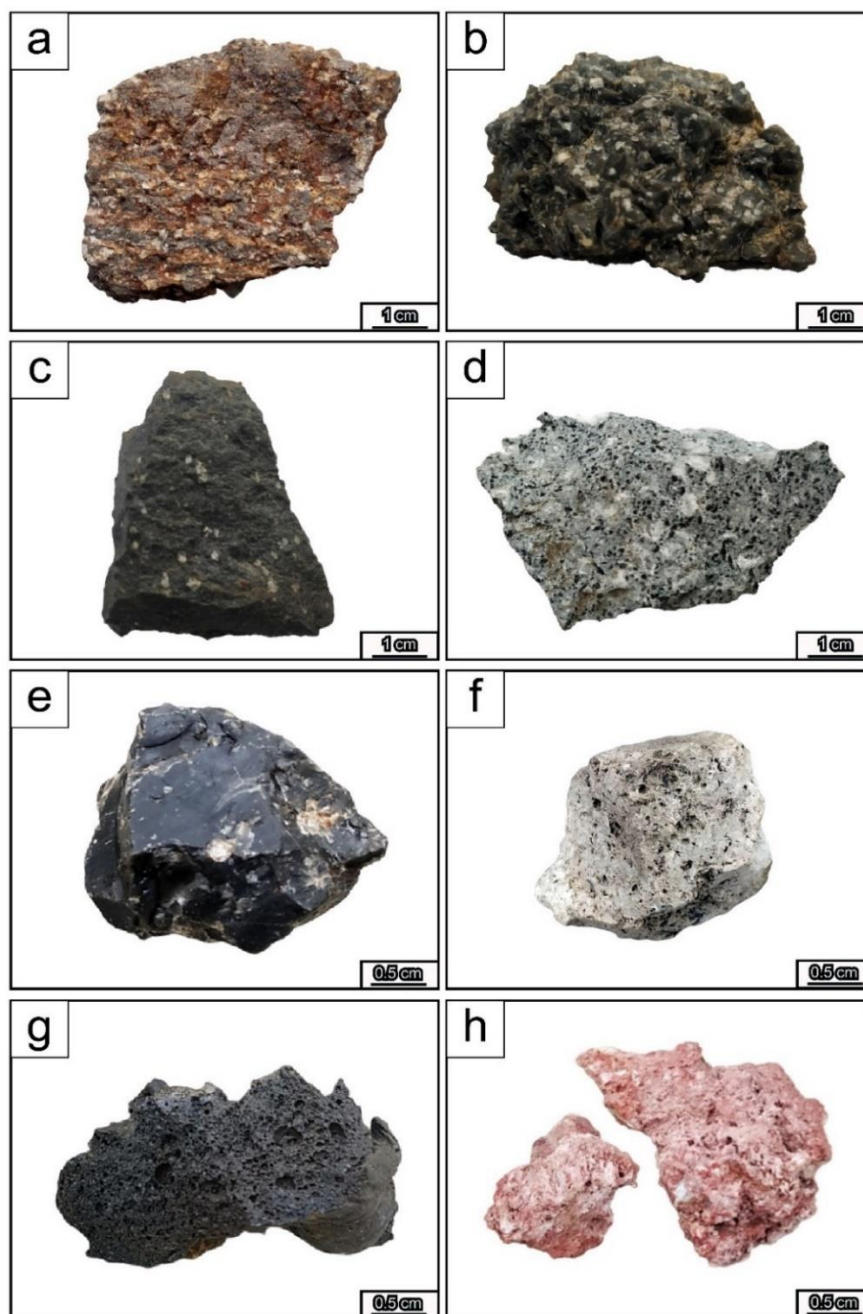


Figura 4.10. Principales componentes líticos del depósito CVL. (a) Riolita. (b) Vitrófiro riolítico. (c) Andesita. (d) Dacita. (e) Obsidiana. (f) Pómez. (g) Escoria negra. (h) Escoria rojiza.

En el depósito CVL también se puede encontrar ocasionalmente fragmentos de cerámicas que son fácilmente distinguibles por su forma y color (Fig. 4.11a), restos de materia carbonácea que corresponden a troncos que fueron arrastrados por el lahar (Fig. 4.11b) y terrones de suelo que demuestran que el flujo fue erosivo (Fig. 4.11c). Estos elementos fueron útiles para determinar la edad del evento mediante correlaciones estratigráficas y dataciones por radiocarbono, por lo que se deduce que el Chillos Valley Lahar se generó hace aproximadamente 4500 – 4600 años AP (Mothes et al., 1998; Smith y Lowe, 1991).

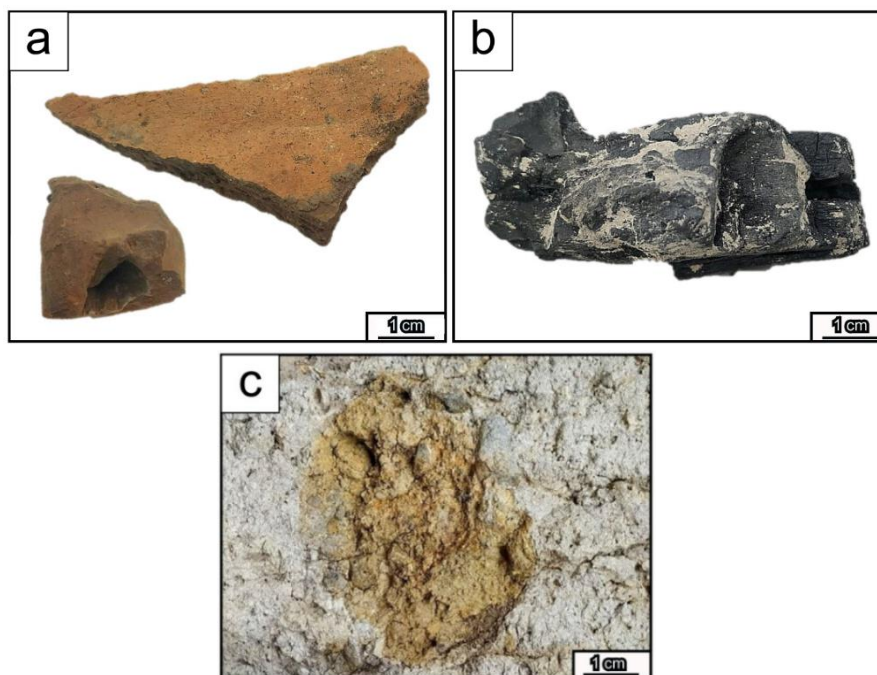


Figura 4.11. Otros elementos encontrados en el depósito CVL. (a) Restos de cerámica. (b) Restos de troncos carbonizados. (c) Coágulos de suelo.

4.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

En la Figura 4.12, se presenta un mapa de distribución espacial del depósito CVL como resultado de las observaciones realizadas en las campañas de campo y en base a los mapas publicados por Mothes et al. (1998), Andrade et al. (2005), Hall y Mothes (2008). Los contactos que se muestran en el mapa son inferidos. El CVL ocupa un área aproximada de 388 km², y un espesor promedio de 2 m (varía con la morfología del terreno); por lo cual se estima un volumen seco de aproximadamente 0.77 km³.

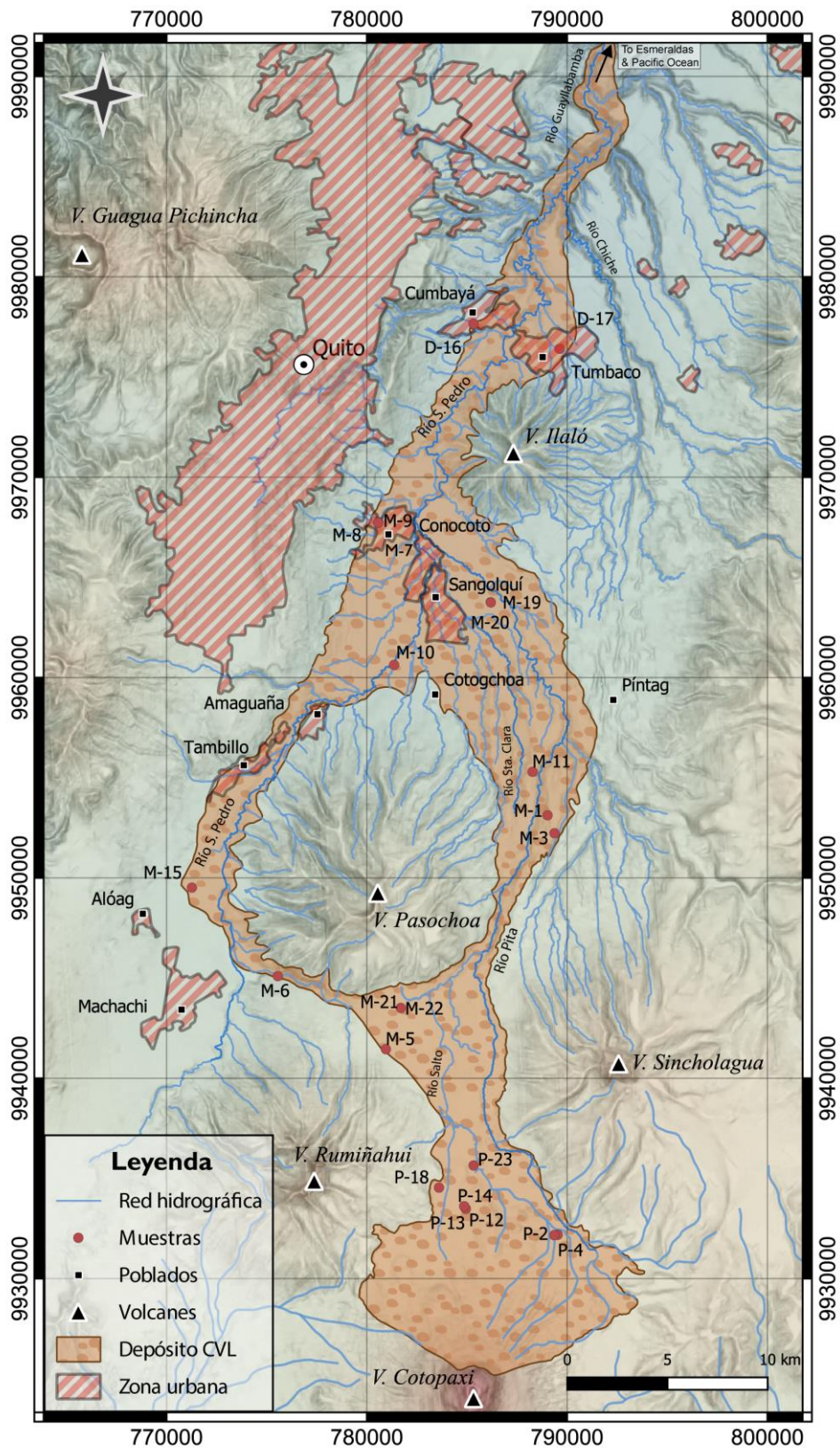


Figura 4.12. Mapa de distribución espacial del depósito CVL en la ruta norte de flujo, donde se señala la ubicación de las muestras utilizadas en este estudio. Modificado de Mothes et al. (1998), Andrade et al. (2005), Hall y Mothes (2008).

4.4 PUBLICACIÓN DEL STORYMAP

Los resultados de este trabajo de investigación también son presentados en un ArcGIS StoryMap (Fig. 4.13), que se encuentra publicado en el siguiente enlace:

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:t/g/personal/juan_rea_epn_edu_ec/ERD_GKzvkiIILYvXwsCOjYB3VIRBHlclNhvngaBiWqv5w?e=mSZhOA

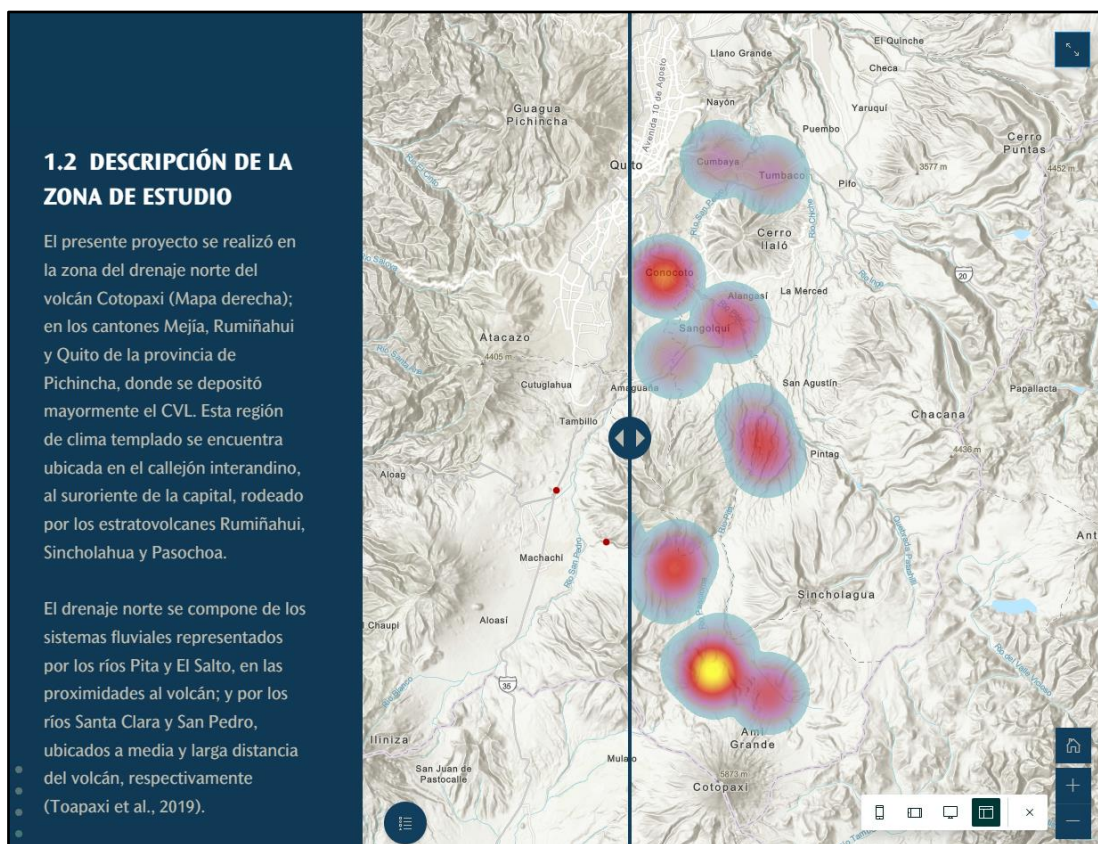


Figura 4.13. Imagen captura del StoryMap publicado online.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La granulometría global del depósito CVL evidencia que los granos de tamaño de arena (0.0625 - 2 mm) son la fracción dominante con el 49.4 wt. %, seguido del material grueso (mayor a 2 mm) con el 39.7 wt. %; y finalmente el componente fino, partículas de tamaño de limo y arcilla, (< 0.0625 mm) con el 10.9 wt. %.
- No se evidencia una distribución preferencial en el tamaño de grano en las 3 facies o segmentos en los que se dividieron las muestras: proximales, medios y distales. Las rutas de observación, así como las campañas de campo permitieron corroborar que el depósito es homogéneo a lo largo de todo el trayecto del lahar y que carece de gradación interna.
- Según el diagrama de clasificación de flujos propuesto por Pierson y Scott (1999) las muestras del depósito CVL, al igual que las del lahar de 1877 se sitúan en la categoría de “flujos de escombros no cohesivos” o pobres en arcilla, que se caracterizan por tener un mal sorteo, son masivos y generalmente matriz-soportados. Pese a esto, el CVL tuvo un comportamiento similar al de los grandes flujos de lodo cohesivo que se explica en su origen, un flujo de cenizas, y su enorme volumen; por lo que no se aprecian cambios texturales significativos con la distancia. Además, se observan frecuentemente grandes bloques de roca suspendidos en el centro del depósito, factor que asocia con un lahar tipo cohesivo.
- Los principales componentes encontrados en el depósito CVL son: clastos líticos (riolíticos, dacíticos y andesíticos), granos que constituyen la matriz (cenizas vítricas, cristales), terrones de suelo, escoria, lapilli, pómez, y obsidiana. Los clastos riolíticos aparecen en

mayor proporción, lo cual es concordante con la última gran erupción de este tipo hace aproximadamente 4500 años AP y que dio origen al lahar.

- En el depósito del CVL se puede encontrar ocasionalmente fragmentos de cerámicas y restos de troncos carbonizados de árboles que fueron arrastrados por el flujo. Los fragmentos de cerámica evidencian que el lahar posiblemente ocasionó la pérdida de vidas humanas, aunque se desconoce sus proporciones.
- El depósito del CVL es fácilmente identificable de otras unidades estratigráficas debido a su color beige, composición litológica y aspecto homogéneo. En su trayecto generalmente cubre la superficie del terreno y es de las últimas unidades depositadas con una potencia uniforme de aproximadamente 2 m, que varía ligeramente en algunos sectores. En la zona de estudio, ocupa un área aproximada de 388 km²; por lo que se estima un volumen seco de aprox. 0.77 km³.
- Los clastos que componen el depósito del CVL mantienen un aspecto fresco, dado que no han sufrido alteración hidrotermal; que en comparación con el lahar Osceola del Mount Rainier (Washington, USA) la alteración por fluidos hidrotermales fue particularmente intensa, generando un alto contenido de arcillas lo cual se ve reflejado en la granulometría de su depósito (John et al., 2008).

5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar un tamizado con mayor detalle con el fin de encontrar otros elementos importantes como fragmentos de huesos o materia orgánica con el propósito de obtener dataciones radiométricas más precisas para definir la edad del evento lahárico.
- Se recomienda realizar análisis detallados en un estudio geológico local en las zonas de peligro del volcán Cotopaxi, particularmente en valle de Los Chillos; con el fin de identificar los depósitos laháricos existentes y entender la dinámica de los flujos de lodo y escombros que afectaron en el pasado, determinar periodos de recurrencia y desarrollar mejores planes de evacuación y mitigación de desastres frente a estos fenómenos. Aunque debido a las circunstancias por las cuales se formó el CVL, no es muy probable la formación de otro lahar de dimensiones similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M., Andrade, D., Bernard, B., Cordova, M., Hernández, S., Naranjo, F., Palacios, P., Salgado, J., Sierra, D., Vasconez, A., Vasconez, F., & Yopez, M. (2023). *Informe Volcánico Especial Cotopaxi N° 2023-002* (p. 16). <https://informes.igepn.edu.ec/igepn-registro-web/pages/public/InformeGenerado.jsf?directorio=29767>
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., Segovia, M., Rolandone, F., & Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador. *Tectonics*, 35(5), 1048–1065. <https://doi.org/10.1002/2016TC004117>
- Andrade, D., Hall, M. L., Mothes, P. A., Troncoso, L., Eissen, J.-P., Samaniego, P., Egred, J., Ramon, P., Rivero, D., & Yepes, H. (2005). *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi* (Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional & Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Eds.). Corporación Editora Nacional.
- Bablon, M., Quidelleur, X., Siani, G., Samaniego, P., Le Penneç, J.-L., Nouet, J., Liorzou, C., Santamaría, S., & Hidalgo, S. (2020). Glass shard K-Ar dating of the Chalupas caldera major eruption: Main Pleistocene stratigraphic marker of the Ecuadorian volcanic arc. *Quaternary Geochronology*, 57, 101053. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2020.101053>
- Barberi, F., Coltelli, M., Frullani, A., Rosi, M., & Almeida, E. (1995). Chronology and dispersal characteristics of recently (last 5000 years) erupted tephra of Cotopaxi (Ecuador): Implications for long-term eruptive forecasting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69(3), 217–239. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00017-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00017-8)
- Beate, B., Hammersley, L., DePaolo, D. J., & Deino, A. (2006). La Edad de la Ignimbrita de Chalupas, prov. De Cotopaxi, Ecuador, y su importancia como marcador estratigráfico. *6th Jornadas en Ciencias de la Tierra, Abstract book*, 68–71.

- Bernard, B., Battaglia, J., Proaño, A., Hidalgo, S., Vásconez, F., Hernandez, S., & Ruiz, M. (2016). Relationship between volcanic ash fallouts and seismic tremor: Quantitative assessment of the 2015 eruptive period at Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 78(11), 80. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1077-5>
- Bigazzi, G., Coltelli, M., Hadler, J., & Osorio, A. (1997). Provenance Studies of Obsidian Artefacts Using the Fission-Track Analysis in South America: An Overview. *Noticias de Antropología y Arqueología Mem. 49th Cong. Intern. Americanistas*, Quito, ARQ 14, 1–16. <https://www.equiponaya.com.ar/congresos/contenido/49CAI/Bigazzi.htm>
- Cáceres, B. (2016). *Dramatical reduction of Cotopaxi Glaciers during the last volcano awakening 2015-2016. Conference: AGU Fall Meeting, San Francisco-Moscone Center.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17483.80168>
- Cáceres, B., Jordan, E., Ungerechts, L., Francou, B., & Peñafiel, A. (2010). Evaluación geométrica del casquete glaciar del volcán Cotopaxi usando fotogrametría digital. *Glaciares, nieves y hielos de América Latina*, 225. http://www.cepeige.org/wp-content/uploads/2018/05/DFEVALUACI%C3%93N-CASQUETE-GLACIAR_COTOPAXI.pdf
- Cheel, R. (2021). *Introduction to Clastic Sedimentology*. Department of Earth Sciences, Brock University: St. Catharines, Ontario, Canada. <http://www.brocku.ca/sedimentology>
- Collot, J.-Y., Michaud, F., Alvarado, A., Marcaillou, B., Marc, S., Ratzov, G., & Migeon, S. (2009). *Vision general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador-Sur de Colombia: Implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subduccion de la Cordillera de Carnegie* (pp. 47–74).
- Cronin, S. J., Hodgson, K. A., Neall, V. E., Palmer, A. S., & Lecointre, J. A. (1997). 1995 Ruapehu lahars in relation to the late Holocene lahars of Whangaehu River, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 40(4), 507–520. <https://doi.org/10.1080/00288306.1997.9514780>

- Ego, F., Sébrier, M., Lavenu, A., Yepes, H., & Egues, A. (1996). Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 259(1), 101–116. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00075-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00075-5)
- Eissen, J., Beate, B., Hall, M., Laraque, A., Francou, B., & Cáceres, B. (2004). El deslave del 13 de octubre del 2000 del volcán El Altar. En A. Alvarado, A. García-Aristizábal, P. Mothes, & M. Segovia (Eds.), *Investigaciones en geociencias* (pp. 44–50). Corporación Editora Nacional. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010036196>
- Encalada, M. E. (2018). *Dinámica de la avalancha de escombros del volcán Cotopaxi – Zona Norte* [Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19191>
- Ettinger, S., Manville, V., Kruse, S., & Paris, R. (2014). GPR-derived architecture of a lahar-generated fan at Cotopaxi volcano, Ecuador. *Geomorphology*, 213, 225–239. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.013>
- Ettinger, S., Mothes, P., Paris, R., & Schilling, S. (2007). The 1877 lahar deposits on the eastern flank of Cotopaxi volcano. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 13(3), Article 3. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.4022>
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3–26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Garrison, J. M., Davidson, J. P., Hall, M., & Mothes, P. (2011). Geochemistry and Petrology of the Most Recent Deposits from Cotopaxi Volcano, Northern Volcanic Zone, Ecuador. *Journal of Petrology*, 52(9), 1641–1678. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr023>
- Guillier, B., Chatelain, J.-L., Jaillard, É., Yepes, H., Poupinet, G., & Fels, J.-F. (2001). Seismological evidence on the geometry of the Orogenic System in central-northern Ecuador (South America). *Geophysical Research Letters*, 28(19), 3749–3752. <https://doi.org/10.1029/2001GL013257>

- Gutscher, M.-A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J.-Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: Impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3), 255–270. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00060-6)
- Hall, M. L., & Mothes, P. (1995). Bimodal nature of the eruptive history of Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Abstract IUGG XXI General Assembly, Boulder, Colorado*, p A452.
- Hall, M. L., & Mothes, P. (1997). El origen y edad de la Cangahua superior, valle de Tumbaco, Ecuador. En C. Zebrowski, P. Quantin, & G. Trujillo (Eds.), *Suelos volcánicos endurecidos* (Mem III Symp Intern. ORSTOM, pp. 19–28).
- Hall, M. L., & Mothes, P. (2008). The rhyolitic–andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 70(6), 675–702. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0161-2>
- Hall, M. L., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., & Johnson, J. B. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>
- Hammersley, L. (2003). *Isotopic evidence for the relative roles of fractional crystallization, crustal assimilation and magma supply in the generation of large volume rhyolitic eruptions*. [Ph.D. Thesis]. University of California, Berkeley.
- Hammersley, L., DePaolo, D. J., & Beate, B. (2001). *Development of large-volume rhyolitic ignimbrites (LRI'S): The Chalupas Caldera, an example from Ecuador*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20307494>
- Hidalgo, S., Battaglia, J., Arellano, S., Sierra, D., Bernard, B., Parra, R., Kelly, P., Dinger, F., Barrington, C., & Samaniego, P. (2018). Evolution of the 2015 Cotopaxi Eruption Revealed by Combined Geochemical and Seismic Observations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(7), 2087–2108. <https://doi.org/10.1029/2018GC007514>

- Hidalgo, S., Gerbe, M. C., Martin, H., Samaniego, P., & Bourdon, E. (2012). Role of crustal and slab components in the Northern Volcanic Zone of the Andes (Ecuador) constrained by Sr–Nd–O isotopes. *Lithos*, 132–133, 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.019>
- Inman, D. L. (1952). Measures for describing the size distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 22(3), 125–145. <https://doi.org/10.1306/D42694DB-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- John, D. A., Sisson, T. W., Breit, G. N., Rye, R. O., & Vallance, J. W. (2008). Characteristics, extent and origin of hydrothermal alteration at Mount Rainier Volcano, Cascades Arc, USA: Implications for debris-flow hazards and mineral deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175(3), 289–314. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.04.004>
- Jones, R. J. (2016). The Initiation of Rain-Triggered Lahars. *University of Leeds School of Earth and Environment*, 301.
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Vargas, R. B., Lauría, E., & Fortes, L. P. S. (2003). The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(2), 125–131. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(03\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(03)00028-2)
- Kusakabe, M. (1996). Hazardous Crater Lakes. En R. Scarpa & R. I. Tilling (Eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards* (pp. 573–598). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0_17
- Lavenu, A., Noblet, C., Bonhomme, M. G., Egüez, A., Dugas, F., & Vivier, G. (1992). New K-Ar age dates of Neogene and Quaternary volcanic rocks from the Ecuadorian Andes: Implications for the relationship between sedimentation, volcanism, and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, 5(3), 309–320. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(92\)90028-W](https://doi.org/10.1016/0895-9811(92)90028-W)
- Litherland, M., Aspen, J. A., & Jemielita, R. A. (1994). *The Metamorphic Belts of Ecuador*. British Geological Survey.
- Manville, V. (2015). Volcano-Hydrologic Hazards from Volcanic Lakes. En D. Rouwet, B. Christenson, F. Tassi, & J. Vandemeulebrouck (Eds.), *Volcanic Lakes* (pp. 21–71). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_2

- Mothes, P. A., Hall, M. L., & Janda, R. J. (1998). The enormous Chillós Valley Lahar: An ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 59(4), 233–244. <https://doi.org/10.1007/s004450050188>
- Mothes, P. A., & Vallance, J. W. (2015). Chapter 6 - Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador: Highlights from Stratigraphy and Observational Records and Related Downstream Hazards. En J. F. Shroder & P. Papale (Eds.), *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (pp. 141–168). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00006-X>
- Mothes, P., Hall, M. L., Andrade, D., Samaniego, P., Pierson, T. C., Gorki Ruiz, A., & Yepes, H. (2004). Character, Stratigraphy and Magnitude of Historical Lahars of Cotopaxi Volcano (Ecuador). *Acta Vulcanologica : journal of the national volcanic group of Italy*, 1/2. <https://doi.org/10.1400/19097>
- Mothes, P., Ruiz, M. C., Viracucha, E. G., Ramón, P. A., Hernández, S., Hidalgo, S., Bernard, B., Gaunt, E. H., Jarrín, P., Yépez, M. A., & Espín, P. A. (2017). Geophysical Footprints of Cotopaxi's Unrest and Minor Eruptions in 2015: An Opportunity to Test Scientific and Community Preparedness. En J. Gottsmann, J. Neuberg, & B. Scheu (Eds.), *Volcanic Unrest* (pp. 241–270). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/11157_2017_10
- Nawiyanto, Nawiyanto, & Sasmita, N. (2019). The Eruption of Mount Kelud in 1919: Its Impact and Mitigation Efforts. *Proceedings of the 1st International Conference on Social Sciences and Interdisciplinary Studies (ICSSIS 2018)*. Proceedings of the 1st International Conference on Social Sciences and Interdisciplinary Studies (ICSSIS 2018), Medan, Indonesia. <https://doi.org/10.2991/icssis-18.2019.25>
- Neall, V. E. (1976). Lahars as major geological hazards. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 13(1), 233–240. <https://doi.org/10.1007/BF02634799>
- Newhall, C. G., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical*

Research: *Oceans*, 87(C2), 1231–1238.
<https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>

Nocquet, J.-M., Mothes, P., & Alvarado, A. (2012). *Geodésia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador*.

Nocquet, J.-M., Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Mothes, P. A., Rolandone, F., Jarrin, P., Cisneros, D., Alvarado, A., Audin, L., Bondoux, F., Martin, X., Font, Y., Régnier, M., Vallée, M., Tran, T., Beauval, C., Maguiña Mendoza, J. M., Martinez, W., Tavera, H., & Yepes, H. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*, 7(4), 287–291. <https://doi.org/10.1038/ngeo2099>

Pierson, T. C., & Costa, J. E. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. En *Reviews in Engineering Geology* (Vol. 7, pp. 1–12). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/REG7-p1>

Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J.-C., & Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. En *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (Vol. 41, Números 1–4, p. 50). <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70016221>

Pierson, T. C., & Major, J. J. (2014). Hydrogeomorphic Effects of Explosive Volcanic Eruptions on Drainage Basins. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42(1), 469–507. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054913>

Pistolesi, M., Rosi, M., Cioni, R., Cashman, K. V., Rossotti, A., & Aguilera, E. (2011). Physical volcanology of the post-twelfth-century activity at Cotopaxi volcano, Ecuador: Behavior of an andesitic central volcano. *GSA Bulletin*, 123(5–6), 1193–1215. <https://doi.org/10.1130/B30301.1>

Ramon, P., Vallejo Vargas, S., Mothes, P., Vasconez, F., Yepes, H., Hidalgo, S., & Santamaría, S. (2021). *Instituto Geofísico -Escuela Politécnica Nacional, el Servicio Sismológico y Volcanológico Ecuatoriano*.

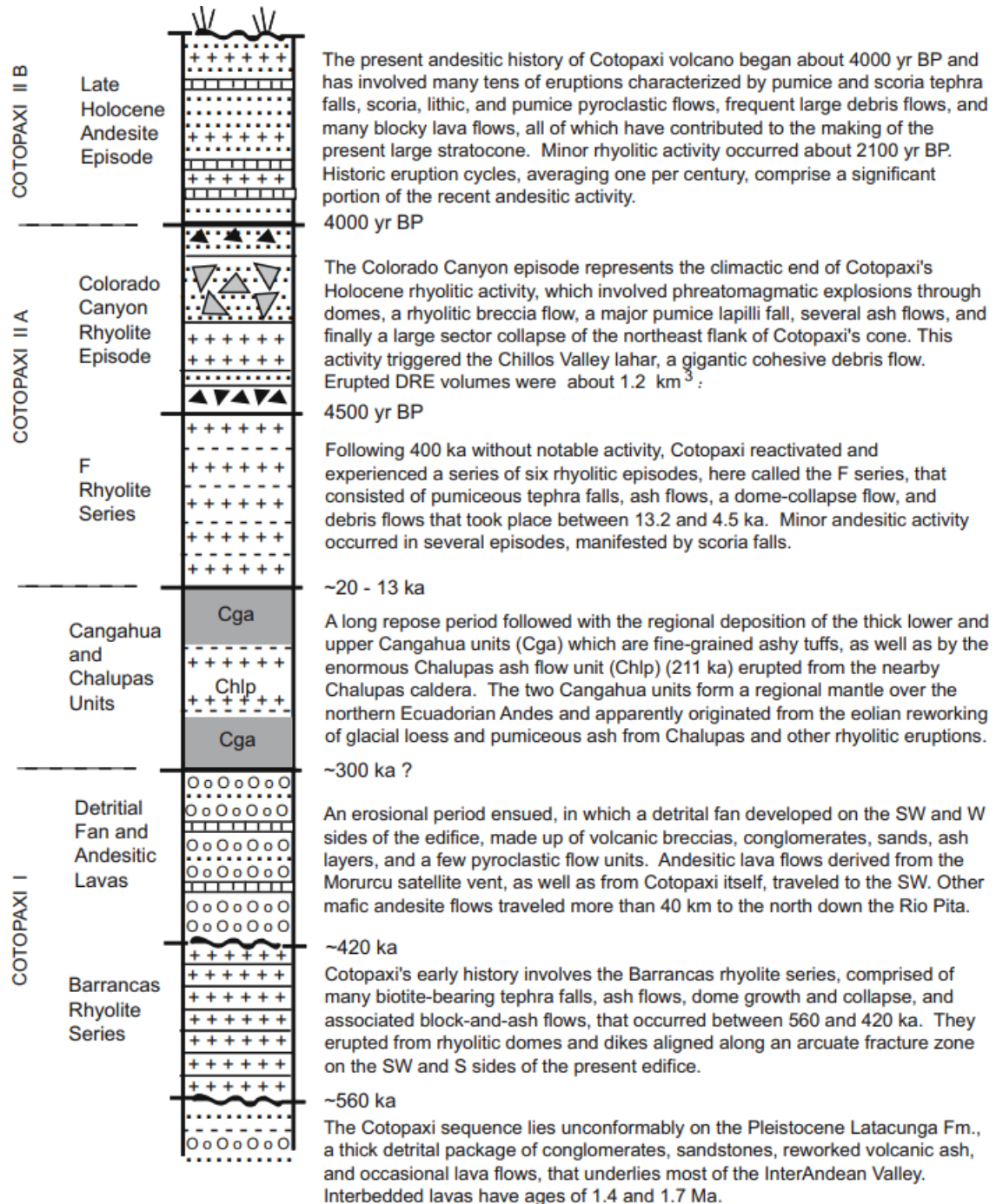
Rohatgi, A. (2021). *WebPlotDigitizer—Extract data from plots, images, and maps* (4.5) [HTML5]. <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>

- Sallarès, V., Charvis, P., Flueh, E. R., Bialas, J., & the SALIERI Scientific Party. (2005). Seismic structure of the Carnegie ridge and the nature of the Galápagos hotspot. *Geophysical Journal International*, 161(3), 763–788. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02592.x>
- Sánchez, M. V., Genise, J. F., Bellosi, E. S., Román-Carrión, J. L., & Cantil, L. F. (2013). Dung beetle brood balls from Pleistocene highland palaeosols of Andean Ecuador: A reassessment of Sauer's *Coprinisphaera* and their palaeoenvironments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 257–274. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.05.028>
- Scott, K. M., Vallance, J. W., & Pringle, P. T. (1995). *Sedimentology, Behavior, and Hazards of Debris Flows at Mount Rainier, Washington* (USGS Numbered Series Núm. 1547; Professional Paper, p. 56). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/pp1547>
- Smith, G. A. (1986). Coarse-grained nonmarine volcanoclastic sediment: Terminology and depositional process. *Geological Society of America Bulletin*, 97(1), 1–10. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1986\)97<1:CNVSTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1986)97<1:CNVSTA>2.0.CO;2)
- Smith, G., & Lowe, D. (1991). *Lahars: Volcano-Hydrologic Events and Deposition in the Debris Flow—Hyperconcentrated Flow Continuum*. <https://doi.org/10.2110/pec.91.45.0059>
- Sodiro, L. (1877). *Relación sobre la erupción del Cotopaxi acaecida el día 26 de junio de 1877*. Imprenta Nacional, Quito - Ecuador, pp 40. <http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/12657>
- Thouret, J.-C., Antoine, S., Magill, C., & Ollier, C. (2020). Lahars and debris flows: Characteristics and impacts. *Earth-Science Reviews*, 201, 103003. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103003>
- Toapaxi, J., Torres, C., Hamad, K., Vera, P., Méndez, J., Toapaxi, J., Torres, C., Hamad, K., Vera, P., & Méndez, J. (2019). Actualización de la Modelación Numérica del Flujo de Escombros Producto de una Erupción del Volcán

- Cotopaxi – Flanco Norte. *Revista Politécnica*, 44(1), 7–14.
<https://doi.org/10.33333/rp.vol44n1.01>
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 157–171. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00018-4)
- Vallance, J. W., & Iverson, R. M. (2015). Chapter 37—Lahars and Their Deposits. En H. Sigurdsson (Ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)* (pp. 649–664). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00037-7>
- Vallance, J. W., & Scott, K. M. (1997). The Osceola Mudflow from Mount Rainier: Sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow. *Geological Society of America Bulletin*, 109(2), 143–163. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109<0143:TOMFMR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109<0143:TOMFMR>2.3.CO;2)
- Vera, E. (2000). *Herramienta de consulta volcánica bajo el contexto de un GIS* [Tesis, Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales. Universidad de las Américas Puebla]. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lis/vera_c_ea/
- Vilaña, D. L. (2017). *Análisis comparativo de la simulación numérica tridimensional y unidimensional, del tránsito de lahares primarios en el sector de La Caldera del drenaje norte del volcán Cotopaxi*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18795>
- Waite, R. B. (2013). Lahar. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 579–580). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_206
- Witham, C. S. (2005). Volcanic disasters and incidents: A new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148(3), 191–233. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.04.017>
- Wolf, T. (1878). *Memoria sobre el Cotopaxi y su última erupción, acaecida el 26 de junio de 1877*. Imprenta El Comercio, Guayaquil - Ecuador, pp 48. <https://archive.org/details/memoriasobreelco00wolf/mode/2up>

ANEXOS

ANEXO I. SÍNTESIS DE LA HISTORIA ESTRATIGRÁFICA DEL VOLCÁN COTOPAXI (Hall y Mothes, 2008).



ANEXO II. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO



Figura A1. Procedimiento para realizar el análisis granulométrico por tamizado. (a) Introducción de la muestra en la columna de tamices. (b) Pesaje de la porción de muestra retenida en cada tamiz.

ANEXO III. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS PROPORCIONADOS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-0872

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

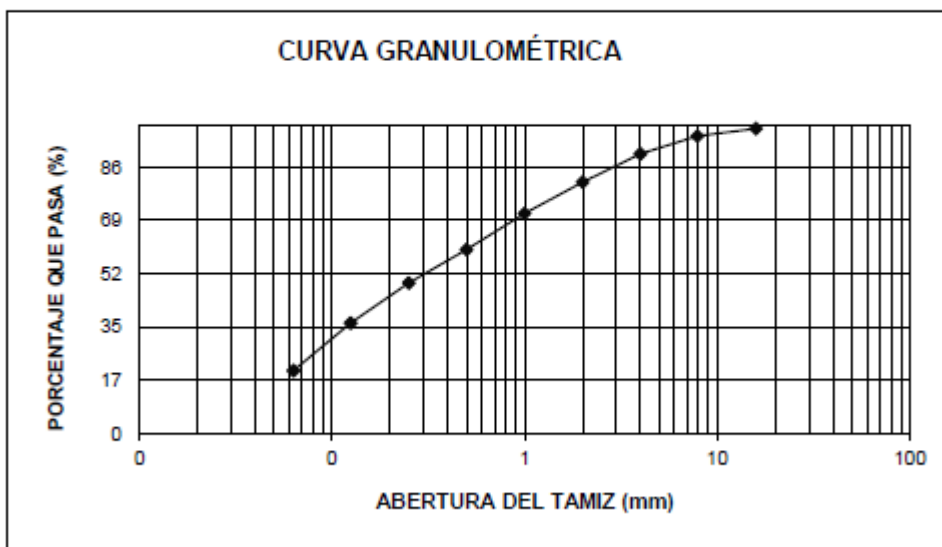
PROYECTO: ***

MUESTRA: M1 (M1)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMANO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	8.3	1.3	1.3	98.7
5/16"	7.900	15.6	2.5	3.8	96.2
5	4.000	36.3	5.7	9.5	90.5
10	2.000	58.4	9.2	18.6	81.4
18	1.000	63.9	10.0	28.7	71.3
35	0.500	74.6	11.7	40.4	59.6
60	0.250	68.4	10.8	51.2	48.8
120	0.125	82.4	13.0	64.1	35.9
230	0.063	98.3	15.5	79.6	20.4
BANDEJA		129.8	20.4	100.0	0.0
TOTAL		636.0			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-0872

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

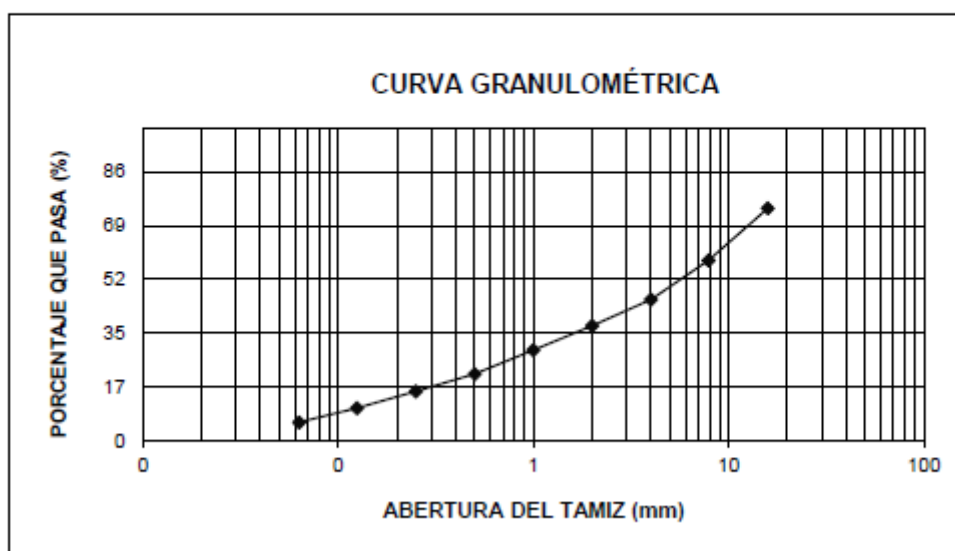
PROYECTO: ***

MUESTRA: M2 (P2)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	278.8	25.5	25.5	74.5
5/16"	7.900	182.2	16.7	42.1	57.9
5	4.000	136.8	12.5	54.6	45.4
10	2.000	92.5	8.5	63.1	36.9
18	1.000	85.0	7.8	70.9	29.1
35	0.500	83.6	7.6	78.5	21.5
60	0.250	60.1	5.5	84.0	16.0
120	0.125	59.3	5.4	89.4	10.6
230	0.063	49.1	4.5	93.9	6.1
BANDEJA		66.7	6.1	100.0	0.0
TOTAL		1094.1			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-0872

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

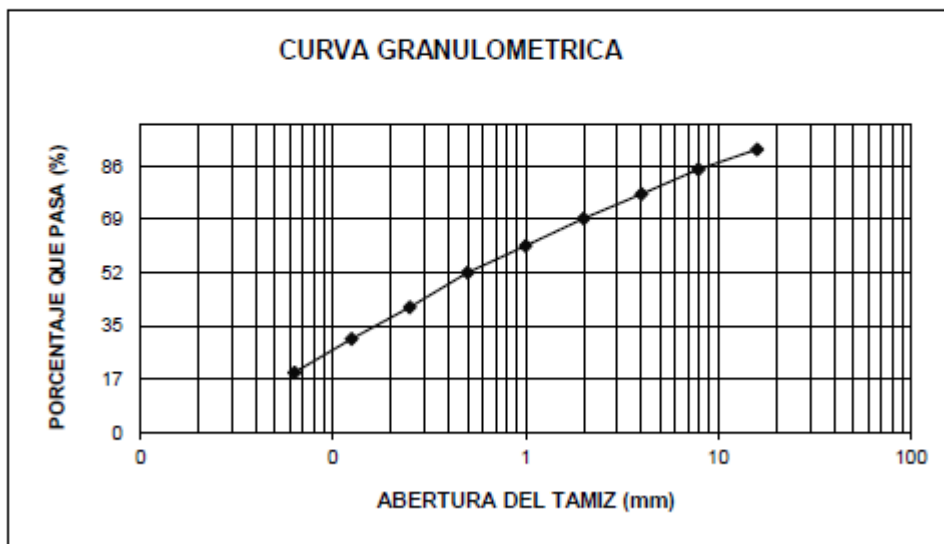
PROYECTO: ***

MUESTRA: M3 (M3)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	56.9	8.3	8.3	91.7
5/16"	7.900	44.3	6.5	14.8	85.2
5	4.000	54.2	7.9	22.8	77.2
10	2.000	53.6	7.9	30.6	69.4
18	1.000	60.7	8.9	39.5	60.5
35	0.500	59.3	8.7	48.2	51.8
60	0.250	76.1	11.2	59.4	40.6
120	0.125	69.8	10.2	69.6	30.4
230	0.063	74.3	10.9	80.5	19.5
BANDEJA		133.0	19.5	100.0	0.0
TOTAL		682.2			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-0872

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

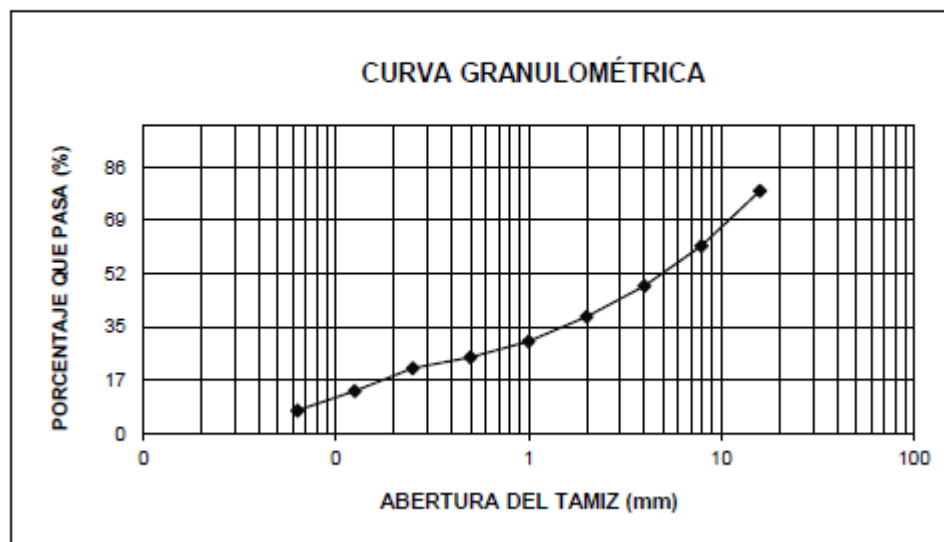
PROYECTO: ***

MUESTRA: M4 (P4)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	163.1	21.4	21.4	78.6
5/16"	7.900	135.8	17.8	39.3	60.7
5	4.000	98.2	12.9	52.2	47.8
10	2.000	75.7	10.0	62.1	37.9
18	1.000	60.6	8.0	70.1	29.9
35	0.500	39.3	5.2	75.3	24.7
60	0.250	26.6	3.5	78.8	21.2
120	0.125	56.3	7.4	86.2	13.8
230	0.063	47.9	6.3	92.5	7.5
BANDEJA		57.3	7.5	100.0	0.0
TOTAL		760.8			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-0872

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

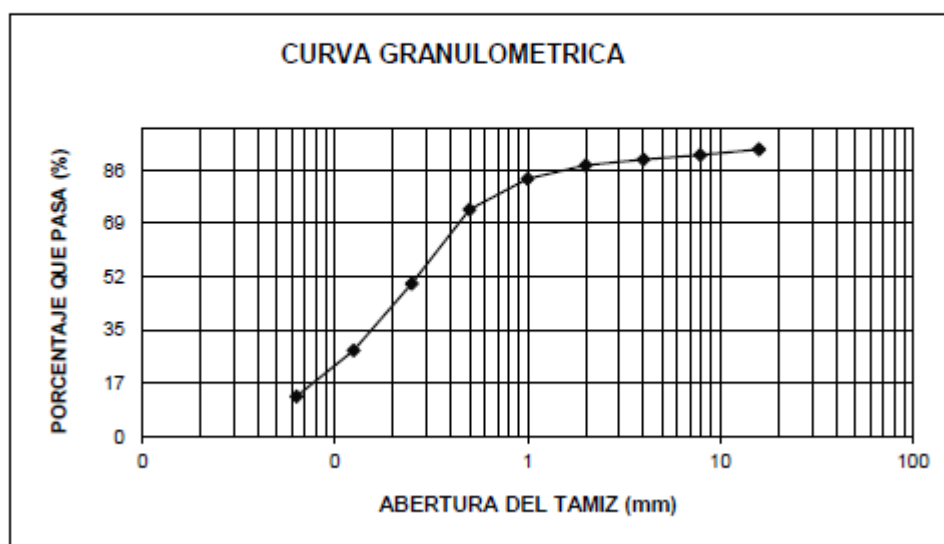
PROYECTO: ***

MUESTRA: M5 (M5)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	60.8	7.0	7.0	93.0
5/16"	7.900	15.9	1.8	8.9	91.1
5	4.000	12.4	1.4	10.3	89.7
10	2.000	16.1	1.9	12.2	87.8
18	1.000	37.8	4.4	16.6	83.4
35	0.500	85.5	9.9	26.5	73.5
60	0.250	207.2	24.0	50.5	49.5
120	0.125	186.5	21.6	72.1	27.9
230	0.063	128.2	14.9	87.0	13.0
BANDEJA		112.6	13.0	100.0	0.0
TOTAL		863.0			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-0872

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

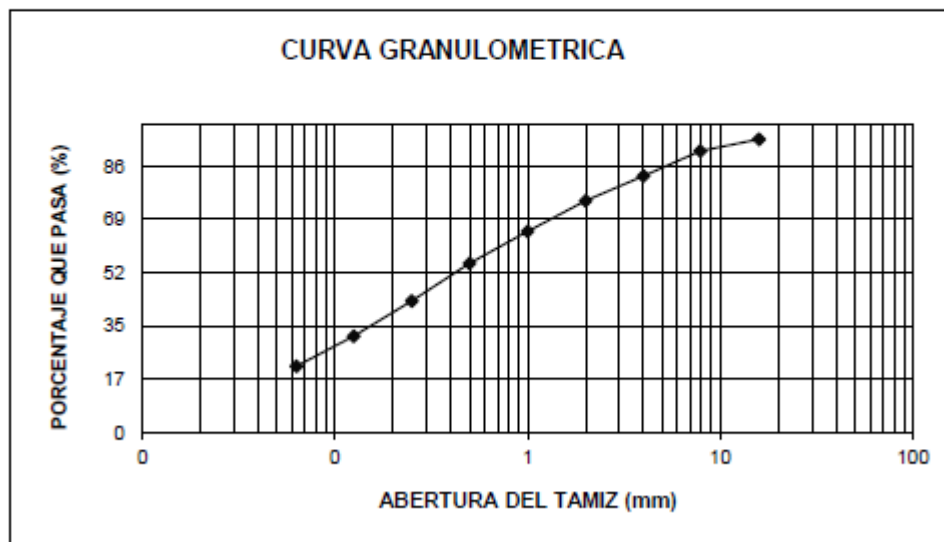
PROYECTO: ***

MUESTRA: M6 (M6)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	52.0	5.1	5.1	94.9
5/16"	7.900	39.0	3.8	8.9	91.1
5	4.000	83.0	8.1	16.9	83.1
10	2.000	82.6	8.0	25.0	75.0
18	1.000	101.5	9.9	34.8	65.2
35	0.500	106.2	10.3	45.2	54.8
60	0.250	124.9	12.2	57.3	42.7
120	0.125	117.8	11.5	68.8	31.2
230	0.063	99.6	9.7	78.5	21.5
BANDEJA		221.1	21.5	100.0	0.0
TOTAL		1027.7			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

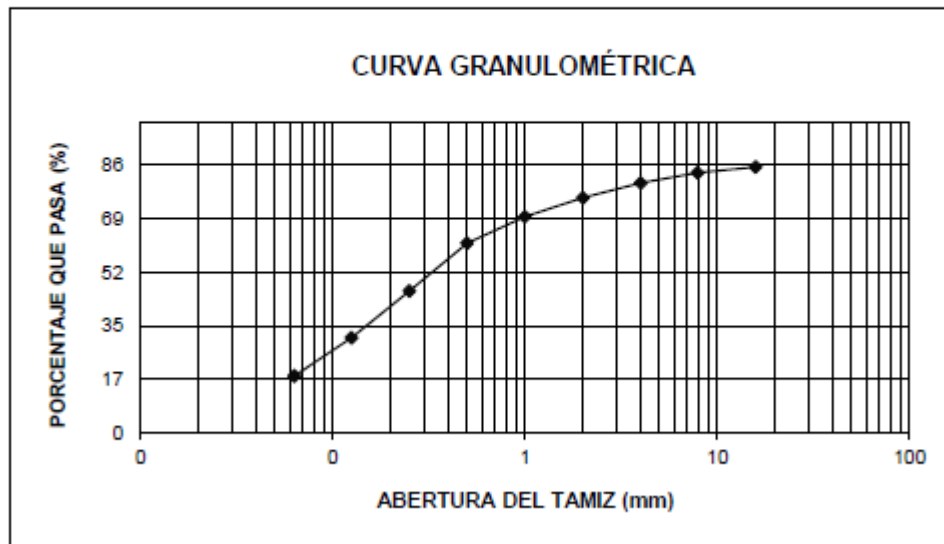
PROYECTO: ***

MUESTRA: 7 BASE (M7)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	87.2	14.3	14.3	85.7
5/16"	7.900	10.9	1.8	16.1	83.9
5	4.000	20.1	3.3	19.4	80.6
10	2.000	28.8	4.7	24.2	75.8
18	1.000	37.4	6.1	30.3	69.7
35	0.500	52.1	8.6	38.9	61.1
60	0.250	93.6	15.4	54.2	45.8
120	0.125	91.3	15.0	69.3	30.7
230	0.063	75.2	12.4	81.6	18.4
BANDEJA		111.9	18.4	100.0	0.0
TOTAL		608.5			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

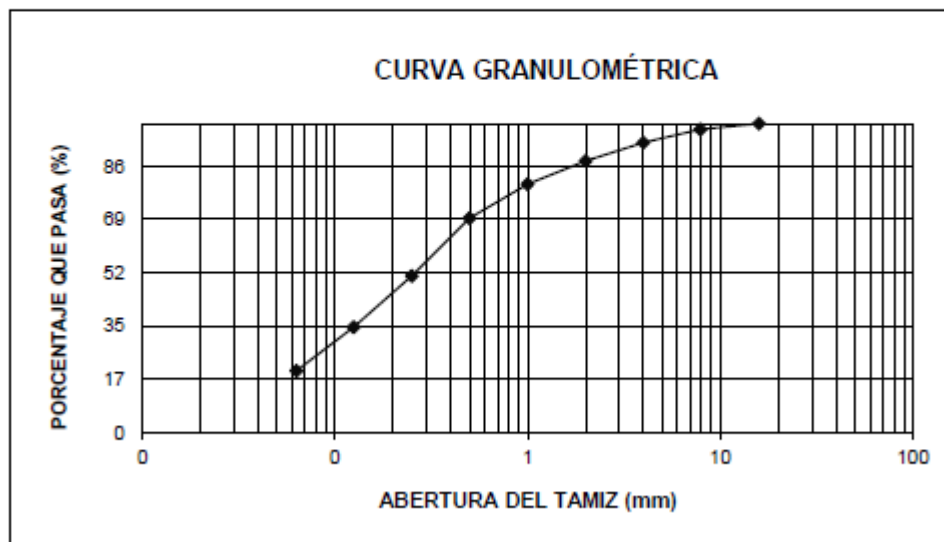
PROYECTO: ***

MUESTRA: 7 MID (M8)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMANO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	0.0	0.0	0.0	100.0
5/16"	7.900	10.2	1.8	1.8	98.2
5	4.000	24.3	4.4	6.2	93.8
10	2.000	32.9	5.9	12.1	87.9
18	1.000	41.6	7.5	19.6	80.4
35	0.500	61.5	11.0	30.6	69.4
60	0.250	104.3	18.7	49.3	50.7
120	0.125	92.3	16.6	65.8	34.2
230	0.063	78.7	14.1	80.0	20.0
BANDEJA		111.7	20.0	100.0	0.0
TOTAL		557.5			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

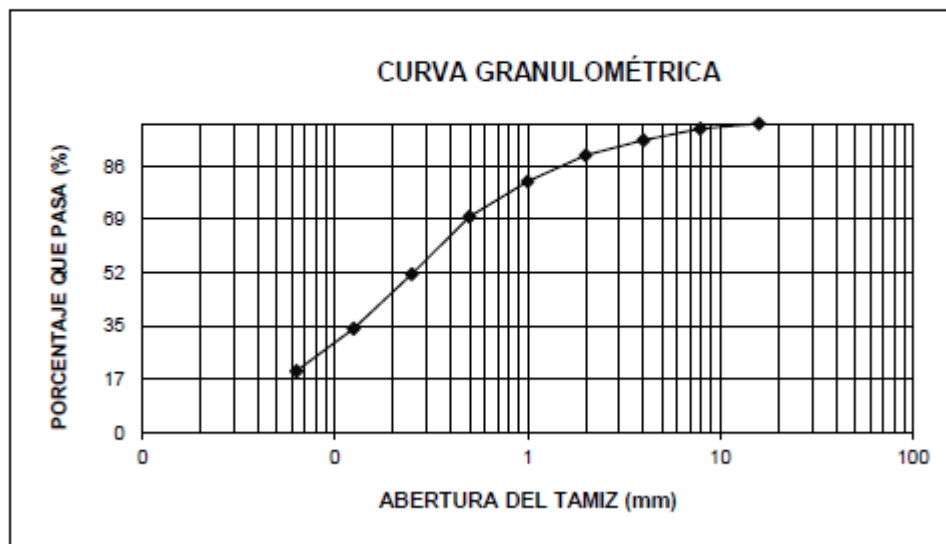
PROYECTO: ***

MUESTRA: 7 TOP (M9)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	0.0	0.0	0.0	100.0
5/16"	7.900	8.9	1.7	1.7	98.3
5	4.000	19.1	3.7	5.4	94.6
10	2.000	25.5	4.9	10.2	89.8
18	1.000	44.4	8.5	18.7	81.3
35	0.500	59.2	11.3	30.1	69.9
60	0.250	97.5	18.7	48.7	51.3
120	0.125	91.8	17.6	66.3	33.7
230	0.063	71.8	13.7	80.0	20.0
BANDEJA		104.5	20.0	100.0	0.0
TOTAL		522.7			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

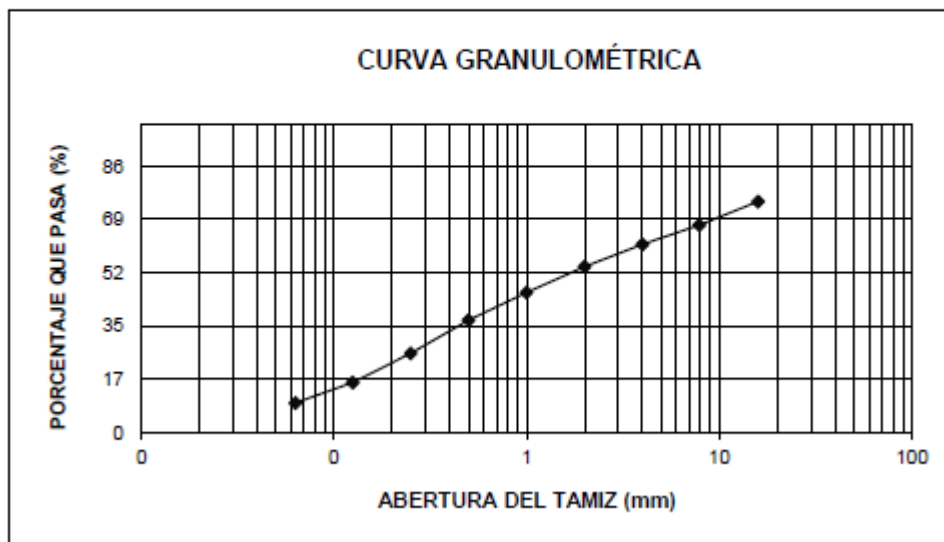
PROYECTO: ***

MUESTRA: 8 (M10)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	168.7	25.2	25.2	74.8
5/16"	7.900	50.6	7.6	32.8	67.2
5	4.000	41.7	6.2	39.0	61.0
10	2.000	48.3	7.2	46.2	53.8
18	1.000	56.3	8.4	54.6	45.4
35	0.500	60.0	9.0	63.6	36.4
60	0.250	71.5	10.7	74.3	25.7
120	0.125	63.2	9.4	83.7	16.3
230	0.063	44.1	6.6	90.3	9.7
BANDEJA		64.7	9.7	100.0	0.0
TOTAL		669.1			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

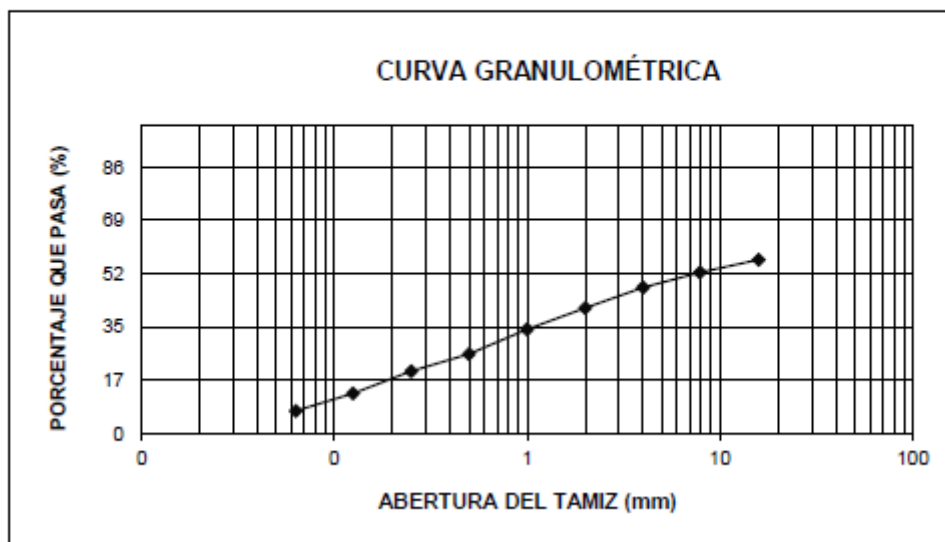
PROYECTO: ***

MUESTRA: 9 (M11)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	547.4	43.7	43.7	56.3
5/16"	7.900	51.8	4.1	47.8	52.2
5	4.000	60.9	4.9	52.7	47.3
10	2.000	83.4	6.7	59.3	40.7
18	1.000	85.8	6.8	66.2	33.8
35	0.500	99.8	8.0	74.2	25.8
60	0.250	69.8	5.6	79.7	20.3
120	0.125	90.0	7.2	86.9	13.1
230	0.063	71.1	5.7	92.6	7.4
BANDEJA		92.8	7.4	100.0	0.0
TOTAL		1252.8			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

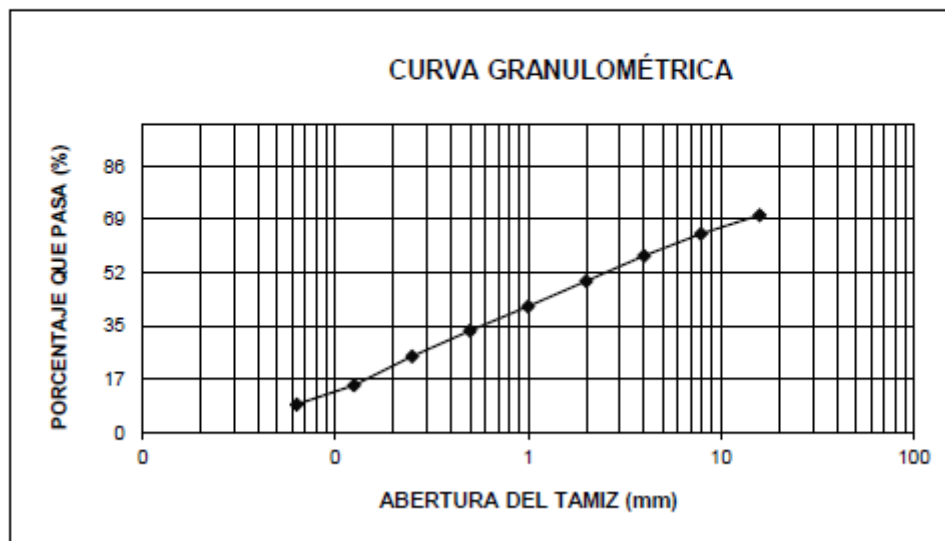
PROYECTO: ***

MUESTRA: 10 (P12)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMANO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	289.0	29.6	29.6	70.4
5/16"	7.900	59.2	6.1	35.7	64.3
5	4.000	69.4	7.1	42.8	57.2
10	2.000	79.9	8.2	50.9	49.1
18	1.000	79.9	8.2	59.1	40.9
35	0.500	76.6	7.8	67.0	33.0
60	0.250	81.5	8.3	75.3	24.7
120	0.125	90.8	9.3	84.6	15.4
230	0.063	60.6	6.2	90.8	9.2
BANDEJA		89.8	9.2	100.0	0.0
TOTAL		976.7			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

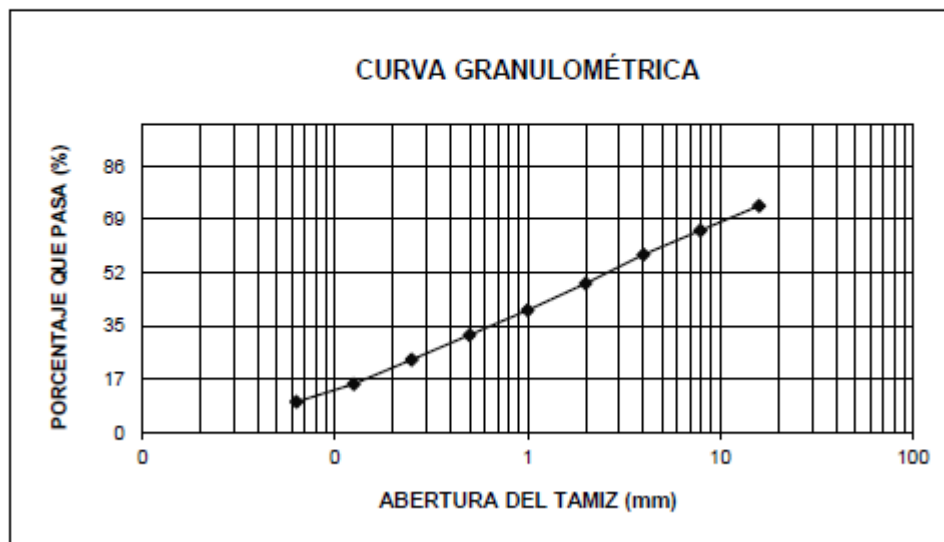
PROYECTO: ***

MUESTRA: 11 (P13)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	205.7	26.6	26.6	73.4
5/16"	7.900	61.4	7.9	34.6	65.4
5	4.000	60.5	7.8	42.4	57.6
10	2.000	72.3	9.4	51.8	48.2
18	1.000	66.9	8.7	60.4	39.6
35	0.500	61.8	8.0	68.4	31.6
60	0.250	61.7	8.0	76.4	23.6
120	0.125	60.2	7.8	84.2	15.8
230	0.063	45.1	5.8	90.0	10.0
BANDEJA		77.1	10.0	100.0	0.0
TOTAL		772.7			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

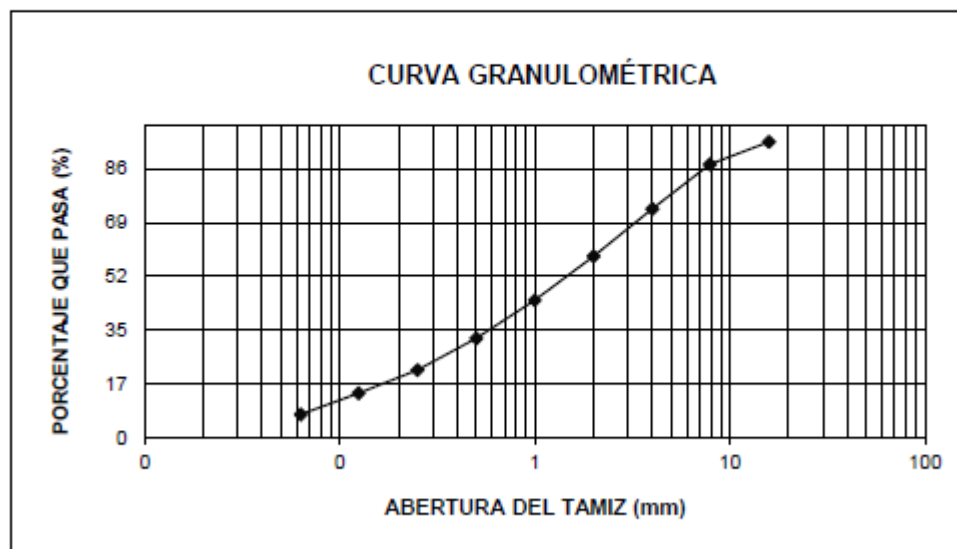
PROYECTO: ***

MUESTRA: 12 (P14)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	37.5	5.2	5.2	94.8
5/16"	7.900	51.9	7.2	12.4	87.6
5	4.000	102.7	14.2	26.6	73.4
10	2.000	109.9	15.2	41.8	58.2
18	1.000	101.8	14.1	55.9	44.1
35	0.500	87.5	12.1	68.0	32.0
60	0.250	73.3	10.1	78.2	21.8
120	0.125	53.8	7.4	85.6	14.4
230	0.063	48.9	6.8	92.4	7.6
BANDEJA		55.1	7.6	100.0	0.0
TOTAL		722.4			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

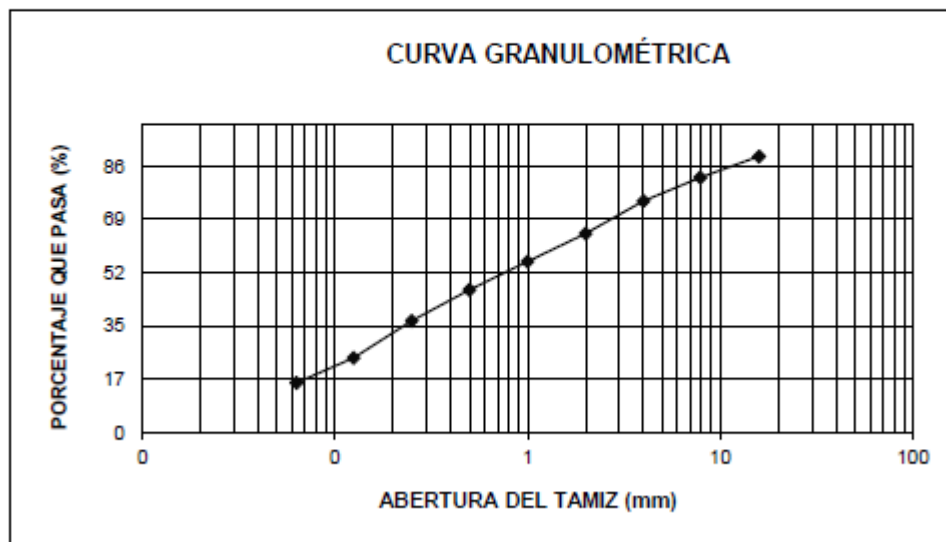
PROYECTO: ***

MUESTRA: 13 (M15)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	61.9	10.6	10.6	89.4
5/16"	7.900	40.0	6.8	17.4	82.6
5	4.000	44.4	7.6	25.0	75.0
10	2.000	61.5	10.5	35.6	64.4
18	1.000	53.0	9.1	44.6	55.4
35	0.500	53.5	9.2	53.8	46.2
60	0.250	58.5	10.0	63.8	36.2
120	0.125	69.8	11.9	75.7	24.3
230	0.063	47.6	8.1	83.9	16.1
BANDEJA		94.3	16.1	100.0	0.0
TOTAL		584.5			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

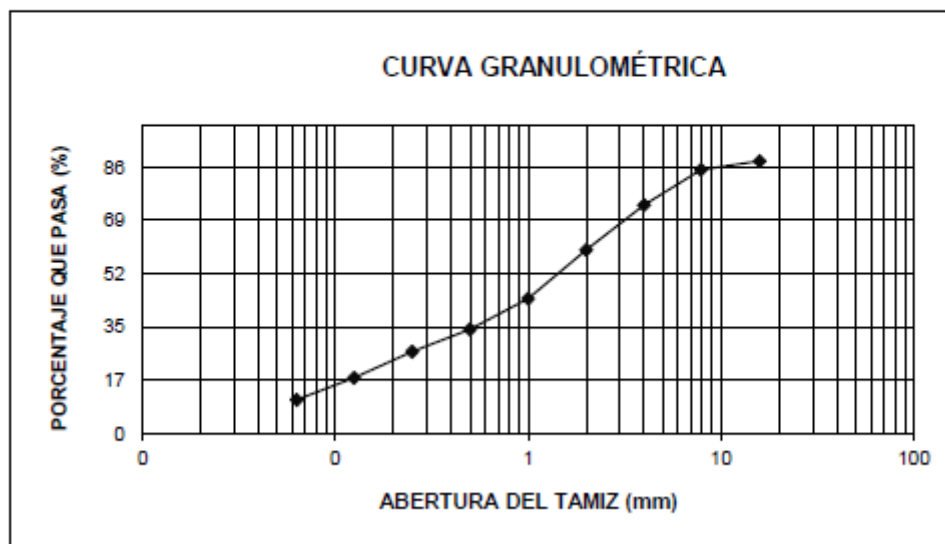
PROYECTO: ***

MUESTRA: 18 (D16)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMANO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	59.1	11.8	11.8	88.2
5/16"	7.900	14.1	2.8	14.6	85.4
5	4.000	57.2	11.4	26.0	74.0
10	2.000	73.1	14.6	40.5	59.5
18	1.000	79.3	15.8	56.3	43.7
35	0.500	49.8	9.9	66.2	33.8
60	0.250	36.1	7.2	73.4	26.6
120	0.125	42.5	8.5	81.9	18.1
230	0.063	35.7	7.1	89.0	11.0
BANDEJA		55.2	11.0	100.0	0.0
TOTAL		502.1			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

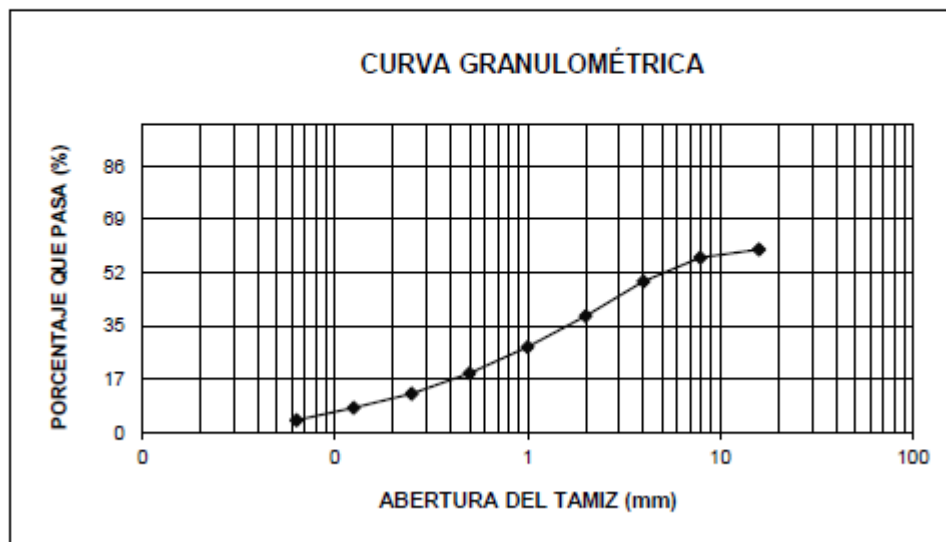
PROYECTO: ***

MUESTRA: 19 (D17)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	202.4	40.7	40.7	59.3
5/16"	7.900	13.1	2.6	43.4	56.6
5	4.000	38.3	7.7	51.1	48.9
10	2.000	55.6	11.2	62.3	37.7
18	1.000	49.5	10.0	72.2	27.8
35	0.500	42.3	8.5	80.7	19.3
60	0.250	32.8	6.6	87.3	12.7
120	0.125	22.9	4.6	92.0	8.0
230	0.063	19.8	4.0	95.9	4.1
BANDEJA		20.2	4.1	100.0	0.0
TOTAL		496.9			



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 12-01019

SOLICITADO: INSTITUTO GEOFISICO

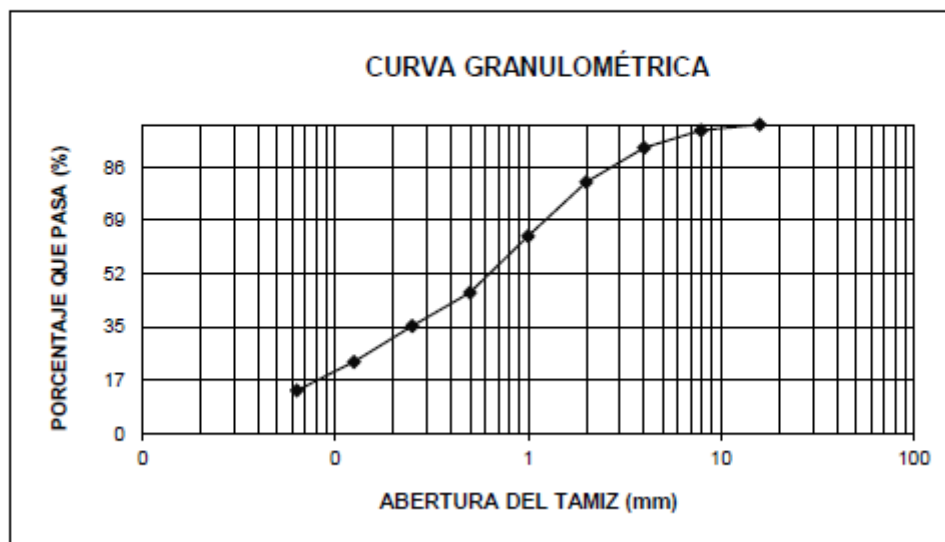
PROYECTO: ***

MUESTRA: 23 (P18)

UNIDAD: ***

SITIO: ***

TAMIZ No.	TAMANO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
5/8"	15.900	0.0	0.0	0.0	100.0
5/16"	7.900	10.1	1.8	1.8	98.2
5	4.000	31.4	5.7	7.5	92.5
10	2.000	61.7	11.1	18.6	81.4
18	1.000	96.7	17.4	36.0	64.0
35	0.500	101.8	18.3	54.3	45.7
60	0.250	60.3	10.9	65.2	34.8
120	0.125	64.2	11.6	76.8	23.2
230	0.063	51.5	9.3	86.0	14.0
BANDEJA		77.6	14.0	100.0	0.0
TOTAL		555.3			



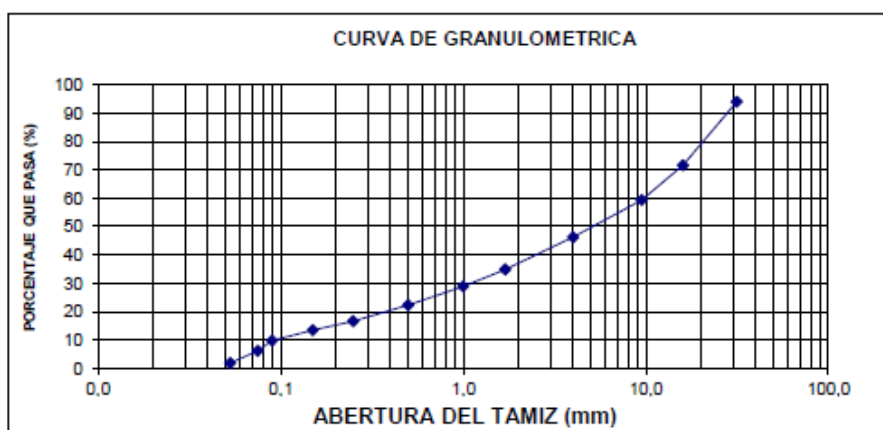
ANALISIS GRANULOMETRICO

INF. No. 14-0349

SOLICITADO: MINARD L. HALL
PROYECTO: TUNGURAHUA INSTITUTO GEOFISICO
FISCALIZADOR: INSTITUTO GEOFISICO
MUESTRA: 11-MOTHES-071-1 BASE CVL
NORMA: INEN 696, ASTM C 33

TAMIZ No.	TAMANO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
1 1/4"	31,500	59,7	6,0	6,0	94,0
5/8"	16,000	223,8	22,4	28,4	71,6
3/8"	9,500	122,7	12,3	40,7	59,3
5	4,000	130,8	13,1	53,8	46,2
12	1,700	113,3	11,4	65,1	34,9
18	1,000	59,6	6,0	71,1	28,9
35	0,500	65,9	6,6	77,7	22,3
60	0,250	56,5	5,7	83,4	16,6
100	0,150	31,7	3,2	86,5	13,5
170	0,090	36,7	3,7	90,2	9,8
200	0,075	36,3	3,6	93,9	6,1
270	0,053	42,9	4,3	98,2	1,8
BANDEJA		18,5	1,8	100,0	0,0
TOTAL		998,3			

Observaciones: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente.



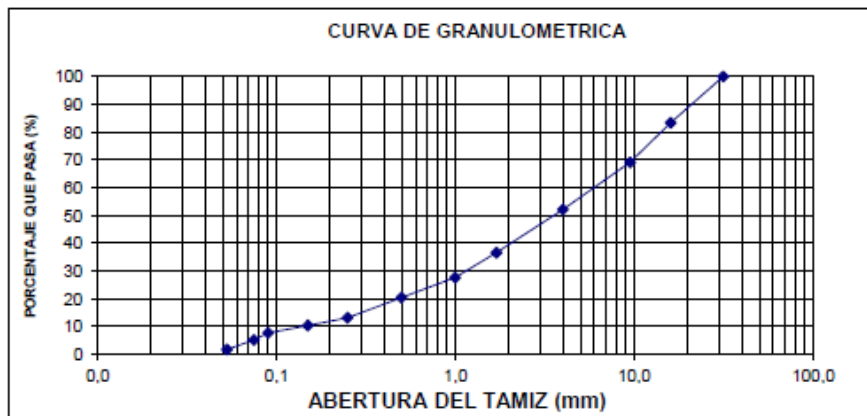
ANALISIS GRANULOMETRICO

INF. No. 14-0349

SOLICITADO: MINARD L. HALL
PROYECTO: TUNGURAHUA INSTITUTO GEOFISICO
FISCALIZADOR: INSTITUTO GEOFISICO
MUESTRA: 12-MOTHES-071-2 TOP CVL
NORMA: INEN 696, ASTM C 33

TAMIZ No.	TAMANO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
1 1/4"	31,500	0,0	0,0	0,0	100,0
5/8"	16,000	166,4	16,7	16,7	83,3
3/8"	9,500	142,3	14,3	30,9	69,1
5	4,000	169,7	17,0	48,0	52,0
12	1,700	154,8	15,5	63,5	36,5
18	1,000	89,3	8,9	72,4	27,6
35	0,500	71,7	7,2	79,6	20,4
60	0,250	72,5	7,3	86,9	13,1
100	0,150	27,8	2,8	89,7	10,3
170	0,090	26,8	2,7	92,3	7,7
200	0,075	25,1	2,5	94,9	5,1
270	0,053	34,7	3,5	98,3	1,7
BANDEJA		16,6	1,7	100,0	0,0
TOTAL		997,5			

Observaciones: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente.



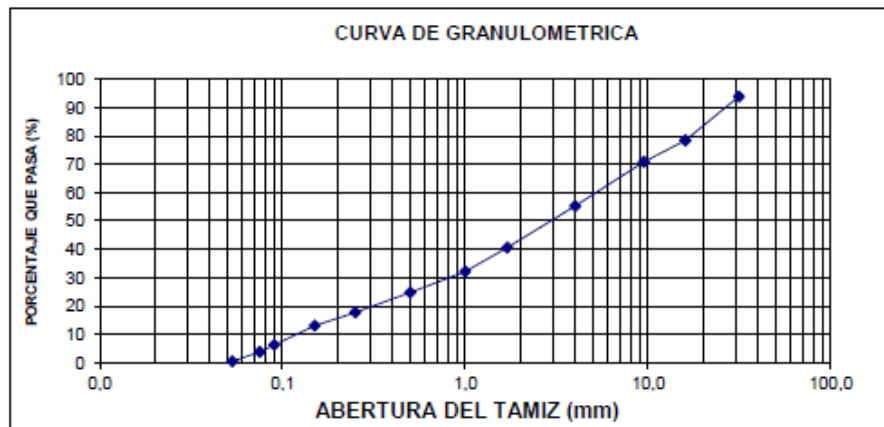
ANALISIS GRANULOMETRICO

INF. No. 14-0349

SOLICITADO: MINARD L. HALL
PROYECTO: TUNGURAHUA INSTITUTO GEOFISICO
FISCALIZADOR: INSTITUTO GEOFISICO
MUESTRA: 13-MOTHES HDA AVE MARÍA SAMPLE 1
NORMA: INEN 696, ASTM C 33

TAMIZ No.	TAMANO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
1 1/4"	31,500	61,5	6,1	6,1	93,9
5/8"	16,000	154,9	15,5	21,6	78,4
3/8"	9,500	75,5	7,5	29,1	70,9
5	4,000	156,2	15,6	44,7	55,3
12	1,700	146,9	14,7	59,4	40,6
18	1,000	84,8	8,5	67,9	32,1
35	0,500	73,8	7,4	75,2	24,8
60	0,250	70,3	7,0	82,2	17,8
100	0,150	46,9	4,7	86,9	13,1
170	0,090	67,9	6,8	93,7	6,3
200	0,075	24,8	2,5	96,2	3,8
270	0,053	33,7	3,4	99,5	0,5
BANDEJA		4,7	0,5	100,0	0,0
TOTAL		1001,9			

Observaciones: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente.



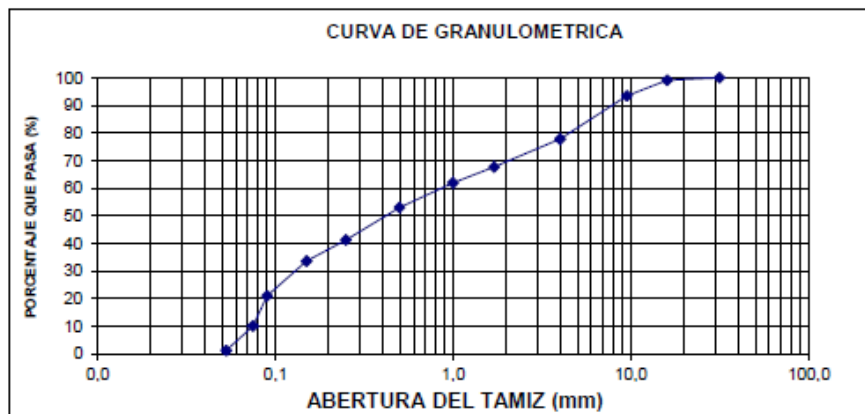
ANALISIS GRANULOMETRICO

INF. No. 14-0349

SOLICITADO: MINARD L. HALL
PROYECTO: TUNGURAHUA INSTITUTO GEOFISICO
FISCALIZADOR: INSTITUTO GEOFISICO
MUESTRA: 14-MOTHES HDA. AVE MARIA, PF IN AVALANCHE CRACK , STOP 2
NORMA: INEN 696, ASTM C 33

TAMIZ No.	TAMANO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
1 1/4"	31,500	0,0	0,0	0,0	100,0
5/8"	16,000	8,8	0,9	0,9	99,1
3/8"	9,500	56,9	5,7	6,6	93,4
5	4,000	156,9	15,7	22,2	77,8
12	1,700	101,4	10,1	32,3	67,7
18	1,000	57,3	5,7	38,1	61,9
35	0,500	90,0	9,0	47,0	53,0
60	0,250	117,7	11,7	58,8	41,2
100	0,150	76,8	7,7	66,5	33,5
170	0,090	126,5	12,6	79,1	20,9
200	0,075	109,3	10,9	90,0	10,0
270	0,053	88,9	8,9	98,9	1,1
BANDEJA		11,5	1,1	100,0	0,0
TOTAL		1002,1			

Observaciones: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente.



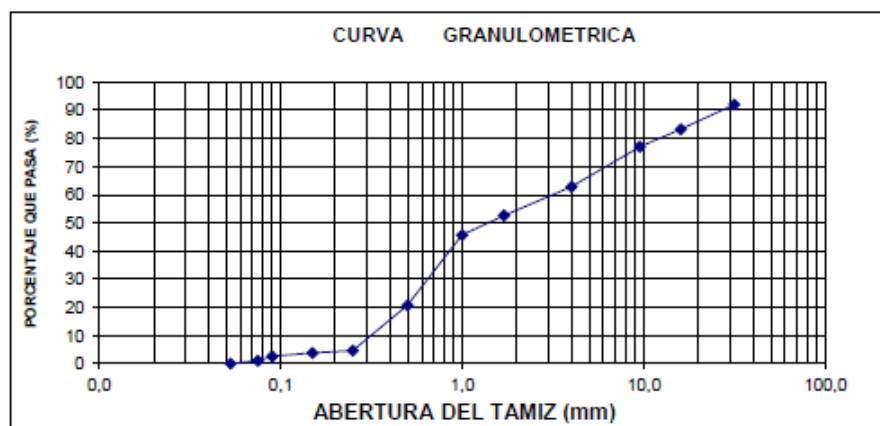
ANALISIS GRANULOMETRICO

INF. No. 14-0349

SOLICITADO: MINARD L. HALL
PROYECTO: TUNGURAHUA INSTITUTO GEOFISICO
FISCALIZADOR: INSTITUTO GEOFISICO
MUESTRA: 16-MOTHES CVL-CVL AT EAST LORNA-LOMA (LOWER MR LAHAR)
NORMA: INEN 696, ASTM C 33

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
1 1/4"	31,500	80,3	8,0	8,0	92,0
5/8"	16,000	87,2	8,7	16,8	83,2
3/8"	9,500	62,1	6,2	23,0	77,0
5	4,000	141,8	14,2	37,2	62,8
12	1,700	102,0	10,2	47,4	52,6
18	1,000	68,8	6,9	54,3	45,7
35	0,500	249,7	25,0	79,3	20,7
60	0,250	160,4	16,1	95,3	4,7
100	0,150	8,5	0,8	96,2	3,8
170	0,090	12,0	1,2	97,4	2,6
200	0,075	15,7	1,6	98,9	1,1
270	0,053	10,2	1,0	100,0	0,0
BANDEJA		0,4	0,0	100,0	0,0
TOTAL		999,2			

Observaciones: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente.



ANEXO IV. TABLA DE COORDENADAS DE LAS MUESTRAS

Muestra	UTM X	UTM Y	Z	POTENCIA
M-1	789029.4	9953120.0	2987	-
P-2	789367.2	9932154.9	3850	-
M-3	789375.6	9952223.6	3062	-
P-4	789534.3	9932178.0	3847	-
M-5	780496.3	9940944.9	3517	2 m
M-6	775558.6	9945088.8	3003	1.9 m
M-7	780572.8	9967728.1	2511	2.3 m
M-8	780572.8	9967728.1	2511	2.3 m
M-9	780572.8	9967728.1	2511	2.3 m
M-10	781366.2	9960623.8	2530	2 m
M-11	788279.4	9955288.8	2937	-
P-12	784947.1	9933469.2	3812	2 m
P-13	784865.9	9933599.8	3805	2 m
P-14	784865.9	9933599.8	3805	2 m
M-15	771268.7	9949508.1	2813	2.2 m
D-16	785335.2	9977661.5	2386	2.1 m
D-17	789631.2	9976407.2	2327	1.5 m
P-18	783606.6	9934529.8	3767	-
M-19	786191.1	9963750.3	2551	1.8 m
M-20	786191.1	9963750.3	2551	1.8 m
M-21	781700.0	9943500.0	3401	2 m
M-22	781700.0	9943500.0	3401	2 m
P-23	785335.7	9935637.6	3705	-

ANEXO V. HISTOGRAMAS DE DISTRIBUCIÓN PARA LAS MUESTRAS DEL LAHAR OSCEOLA (Vallance y Scott, 1997).

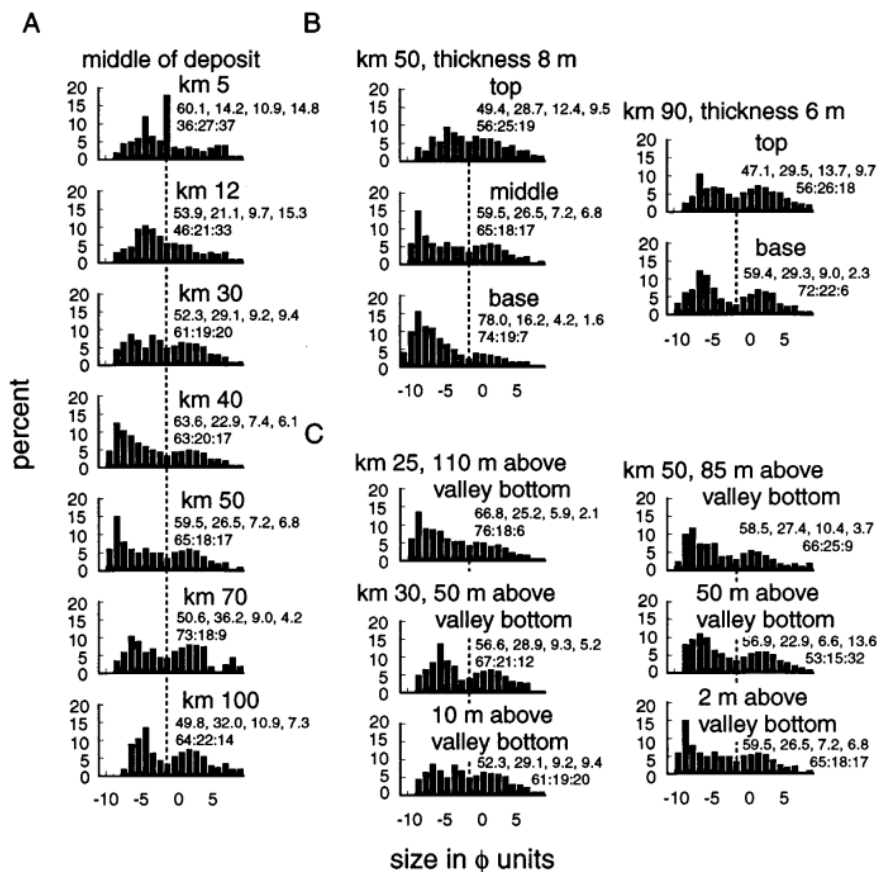


Figure 9. Histograms showing textural changes of samples of Osceola Mudflow. (A) changes in axial facies with downstream distance, each sampled from the mid-thickness of deposit. (B) Changes in axial facies with stratigraphic position. (C) Changes with position in the valley. Percent of gravel, sand, silt, and clay and ratio of sand: silt:clay are given at the right of each histogram.

ANEXO VI. MUESTRAS DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS PARA EL LAHAR DE 1877 EN EL VALLE DE CHILLOS (Mothes et al., 2004).

Sample No.	Pita/S. Pedro rivers Sample Name	Dist. downstream from crater (km)	wt % Gravel	wt % Sand	wt % Silt/Clay	Mean Grain Size, Mz (mm)
1	GuardhouseAA	8	80.00	18.00	2.00	6.01
2	Proano1	12	74.54	22.33	3.14	33.00
3	Hospital2	15	55.79	38.42	5.79	4.32
4	HdaRafael3	17	39.92	53.05	7.06	4.00
5	Bocatoma4	20	55.54	38.41	6.05	4.72
6	Porterillos5	22	61.36	31.89	6.75	3.30
7	LaCaldera6	25	58.98	37.85	3.17	5.00
8	La Caldera1N	26	50.60	45.15	4.20	1.50
9	Patichubamba7	30	52.31	43.13	4.56	5.00
10	HdaValencia	34	35.19	61.00	3.70	0.70
11	Cashapamba8	39	25.16	72.39	2.45	1.70
12	Excafe	40	43.80	51.80	4.20	0.64
13	Megamaxi15	44	68.23	27.69	4.08	6.10
14	23San Rafael-Triangul	45	31.50	55.95	12.90	1.16
15	24San Rafael-MallAmazo	46	43.33	45.85	10.82	2.18
16	La Armenia	47	27.60	70.00	2.40	0.75
17	Guangopolo	52	50.00	48.50	1.60	1.40
18	Nayon26	70	56.23	37.42	6.26	3.00

ANEXO VII. AFLORAMIENTOS DEL CVL

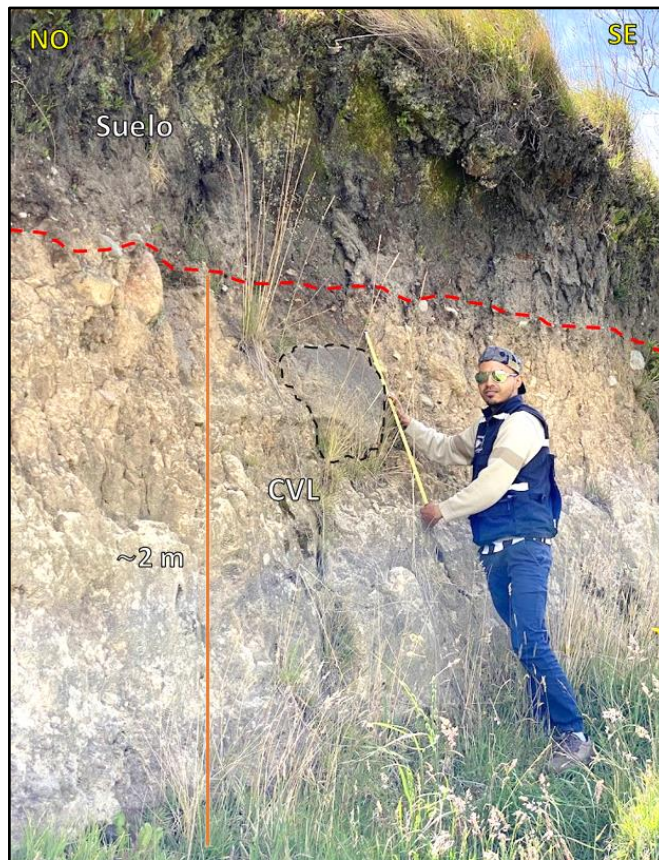


Figura A2. Afloramiento del CVL en la vía a Machachi, punto de muestreo M-5.

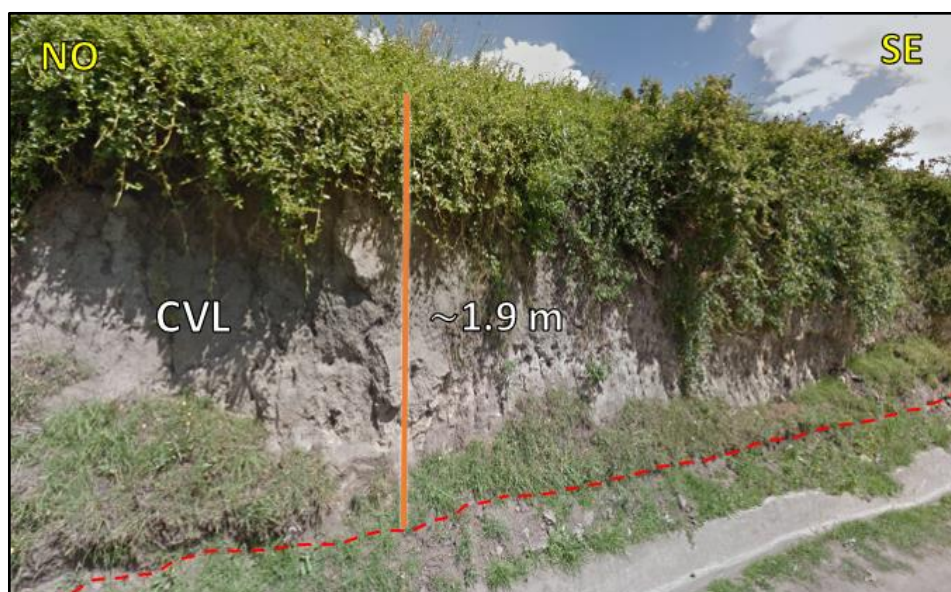


Figura A3. Afloramiento del CVL en Gütig Alto, punto de muestreo M-6.

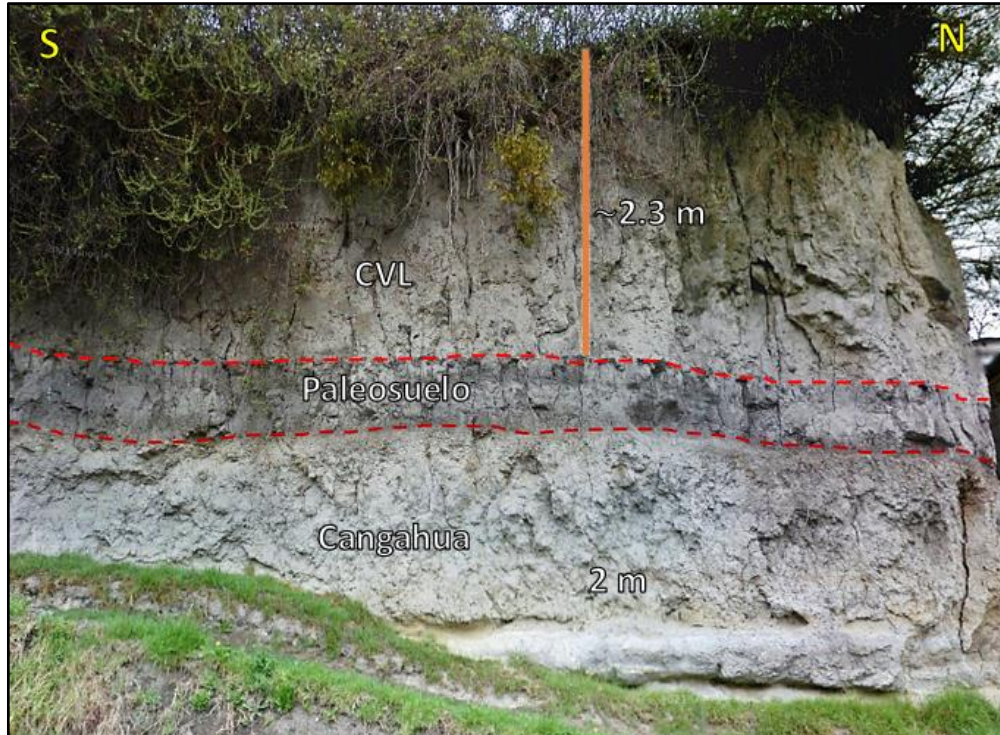


Figura A4. Afloramiento del CVL en Conocoto, punto de muestreo M-7, M-8 y M-9.

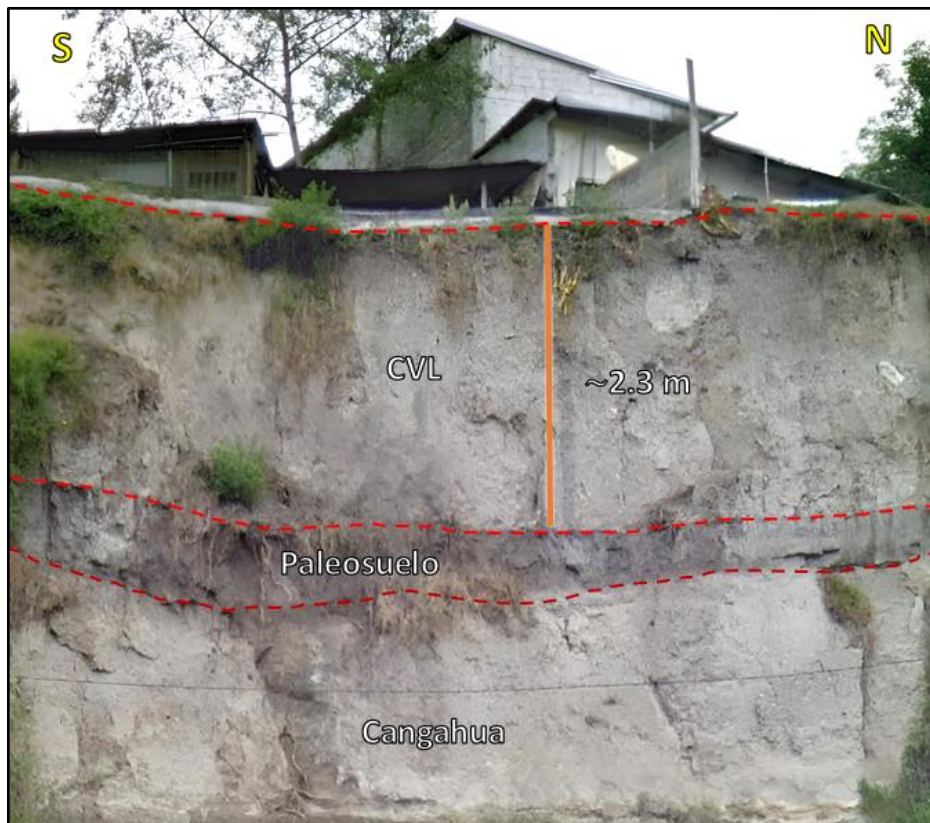


Figura A5. Afloramiento del CVL en la quebrada Punhuaycu – Conocoto.



Figura A6. Afloramiento del CVL en La Balvina, punto de muestreo M-10.

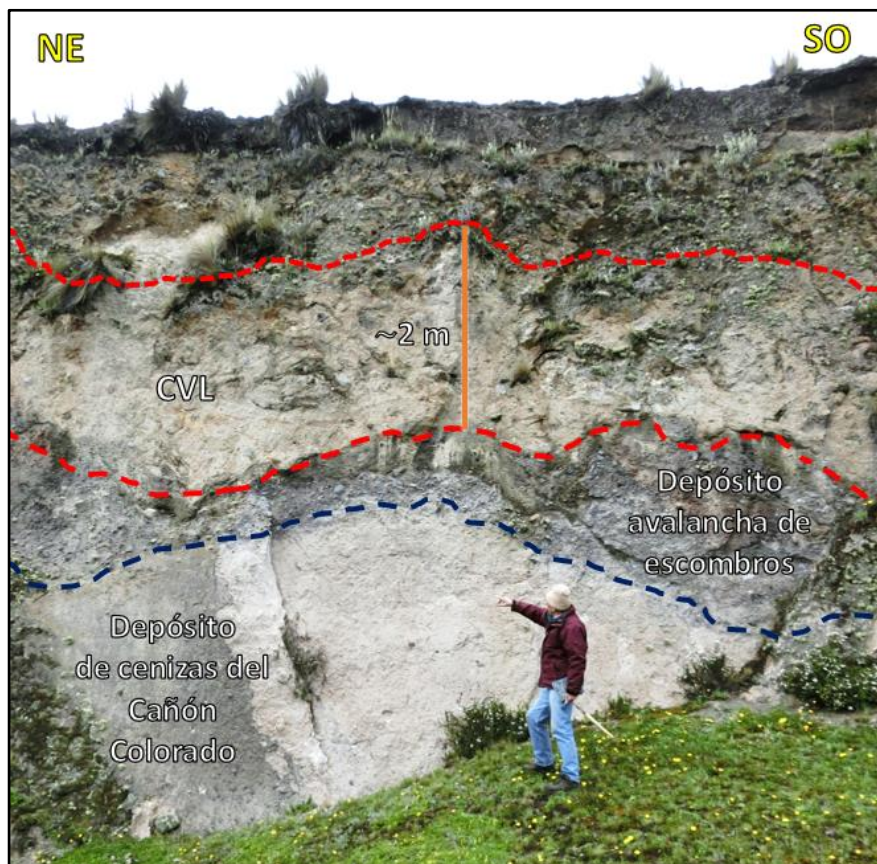


Figura A7. Afloramiento del CVL y series del Cañón Colorado al oeste de Ingaloma. (Fotografía: P. Mothes).



Figura A8. Afloramiento del CVL en Aloag, punto de muestreo M-15.

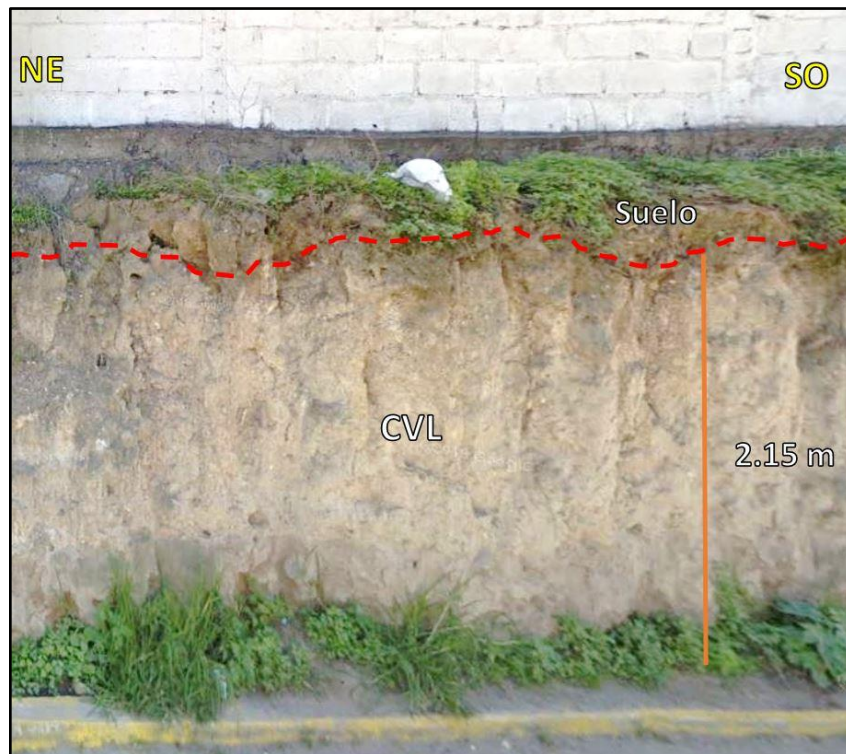


Figura A9. Afloramiento del CVL en Cumbayá, punto de muestreo D-16.



Figura A10. Afloramiento del CVL en Tumbaco, cercano al punto de muestreo D-17.



Figura A11. Afloramiento del CVL en Cashapamba, punto de muestreo M-19 y M-20.