



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



**NUEVOS ANTECEDENTES DE LOS PRODUCTOS
VOLCÁNICOS DE LAS IGNIMBRITAS MÁFICAS (13.4-12.7
KA) DEL VOLCÁN LLAIMA 38°42'S, 71°44'W, REGIÓN DE
LA ARAUCANÍA, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geóloga

Valeria Graciela Martínez Villablanca

Profesor Patrocinante:
Profesores Comisión:

Dr. José Luis Palma Lizana
Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo
Dra. María Verónica Pineda Mascayano

CONCEPCIÓN, 2019

ÍNDICE

Página

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO	2
1.3. OBJETIVOS	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4. UBICACIÓN Y ACCESOS	3
1.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	4
1.5.1. Metodología respectiva al primer objetivo específico	4
1.5.2. Metodología respectiva al segundo y cuarto objetivo específico	5
1.5.3. Metodología respectiva al tercer objetivo específico	5
1.5.3.1. Análisis granulométrico	5
1.5.3.2. Análisis de componentes	6
1.5.4. Metodología respectiva al quinto objetivo específico	6
1.6. GEOMORFOLOGÍA	7
1.7. TRABAJOS ANTERIORES	9
1.8. AGRADECIMIENTOS	10
2. MARCO GEOLÓGICO	12
2.1. BASAMENTO DEL VOLCÁN	12
2.1.1. Grupo Plutónico Melipeuco (Mn)	12
2.1.2. Formación Malleco (PPlim)	12
2.1.3. Complejo Volcánico Sierra Nevada (Plmsn)	14
2.2. GEOLOGÍA DEL VOLCÁN LLAIMA	14
2.2.1. Llaima Ancestral (La1 y La2)	14
2.2.2. Volcán Peñón (Plsp)	15
2.2.3. Ignimbrita Curacautín (Lilc)	15
2.2.4. Llaima Fisural (Llf)	20
2.2.5. Llaima Cono Principal (Llcp)	21
2.2.6. Secuencia Trifultriful (Llst)	22
2.2.7. Depósitos Indiferenciados de Caída de Escoria (Llce) ...	23
2.2.8. Depósitos Morrénicos Recientes Indiferenciados (Hm) .	24
2.2.9. Depósitos Laháricos Indiferenciados (Lllh)	24
2.2.10. Depósitos Aterrazados Poligénicos (Htp)	25

2.2.11. Depósitos Coluviales y Abanicos Aluviales (Hca)	25
2.2.12. Depósitos Fluviales Actuales (Hf)	25
2.2.13. Estructuras	26
2.2.13.1. Sistema De Falla Liquiñe-Ofqui	26
3. ESTRATIGRAFÍA IGNIMBRITA CURACAUTÍN	28
3.1. GENERALIDADES	28
3.2. UNIDAD INFERIOR CURACAUTÍN 1	31
3.3. UNIDAD SUPERIOR CURACAUTÍN 2	38
3.4. DEPÓSITOS RETRAJADOS	49
3.5. INTERTREPACIÓN DE FACIES	52
3.5.1. Facies de ceniza y lapilli masiva (mLT)	52
3.5.2. Facies de ceniza y lapilli difusamente estratificada (dsLT)	55
3.5.3. Facies de ceniza y lapilli masiva con pipas de desgasificación (mLTpip)	57
3.6. CORRELACIÓN DE LA IGNIMBRITA CURACAUTÍN	59
4. ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO	63
4.1. GENERALIDADES	63
4.2. VARIACIONES GRANULOMÉTRICAS	63
4.3. COMPONENTES	72
4.3.1. Cristales	73
4.3.2. Juveniles	73
4.3.3. Accidentales	73
4.4. VARIACIONES RADIALES	81
4.4.1. Variaciones radiales del sector E	82
4.4.2. Variaciones radiales del sector N	84
4.4.3. Variaciones radiales del sector W	87
5. DISTRIBUCIÓN Y VOLUMEN DE LA IGNIMBRITA CURACAUTÍN	89
5.1. GENERALIDADES	89
5.2. DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE LA IGNIMBRITA CURACAUTÍN	90
5.3. CÁLCULO DE VOLUMEN	94
5.4. CONSIDERACIONES DEL VOLUMEN ESTIMADO	95
5.5. PROYECCIONES DEL VOLUMEN ESTIMADO	96
6. DISCUSIÓN	98

6.1. MECANISMOS DE TRANSPORTE Y EMPLAZAMIENTO	98
6.2. EVOLUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL	101
6.3. EXPLOSIVIDAD Y MOVILIDAD DE LA IGNIMBRITA CURACAUTÍN	103
6.4. HISTORIA ERUPTIVA	105
7. CONCLUSIONES	108
8. REFERENCIAS	111
ANEXOS	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y acceso al área de estudio	3
2. 1. Mapa geológico del volcán Llaima	14
2. 2. Distribución de la Ignimbrita Curacautín	16
2. 3. Columnas estratigráficas de la Ignimbrita Curacautín	19
2. 4. Edades calibradas de la Ignimbrita Curacautín	20
3. 1. Mapa área de estudio	28
3. 2. Columna L13S y L14S de Curacautín 1 al sector E del volcán Llaima	33
3. 3. Columna L35/L36/L37 de Curacautín 1 al sector N del volcán Llaima	34
3. 4. Columna L38 de Curacautín 1 al sector N del volcán Llaima	35
3. 5. Columna L39 de Curacautín 1 al sector N del volcán Llaima	36
3. 6. Columna L40 de Curacautín 1 al sector W del volcán Llaima	37
3. 7. Columna de Curacautín 2 al sector E del volcán Llaima	39
3. 8. Columna L34 de Curacautín 2 al sector N del volcán Llaima	41
3. 9. Columna L30 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima	42
3. 10. Columna L31 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima	43
3. 11. Columna L41 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima	44
3. 12. Columna L42 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima	45
3. 13. Columna L43/L44 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima	47
3. 14. Columna L45 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima	49
3. 15. Facies mLT _{frich} de la unidad inferior C1	53
3. 16. Facies mLT de la unidad inferior C1	54
3. 17. Facies mLT de la unidad superior C2	55
3. 18. Facies dsLT de la Ignimbrita Curacautín	57
3. 19. Facies mLT _{pip} de la unidad inferior C1	58

3.	20.	Correlación de columnas estratigráficas de la Ignimbrita Curacautín	62
4.	1.	Mapa muestreo año 2016	64
4.	2.	Columnas estratigráficas generalizadas según localidad	66
4.	3.	Columnas estratigráfica generalizada sector E	75
4.	4.	Columnas estratigráfica generalizada sector N	76
4.	5.	Columnas estratigráfica generalizada sector W	77
4.	6.	Variaciones radiales en el sector E del volcán Llaima	84
4.	7.	Variaciones radiales en el sector N del volcán Llaima	86
4.	8.	Variaciones radiales en el sector W del volcán Llaima	88
5.	1.	Mapa de los depósitos retrabajados en zonas distales	90
5.	2.	Mapa de los depósitos actuales de la Ignimbrita Curacautín	92
5.	3.	Mapa de las zonas de acumulación de la Ignimbrita Curacautín	94
5.	4.	Mapa de las zonas de acumulación proyectadas de la Ignimbrita Curacautín	97
6.	1.	Zona limítrofe (ZLF o flow-boundary zone)	98
6.	2.	Transición desde una corriente de flujo diluida a una granular	100

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
2. 1. Características de terreno de los depósitos syn- y post-Ignimbrita Curacautín	17
3. 1. Afloramiento de la Ignimbrita Curacautín al sector E del volcán Llaima	30
3. 2. Afloramientos de la Ignimbrita Curacautín al sector W del volcán Llaima	30
3. 3. Carbón en el sector W del volcán Llaima	31
3. 4. Oleada piroclástica con estratificación paralela entre C1 y C2	32
3. 5. Contacto entre C2a y C2b	40
3. 6. Bloques escoriáceos en la base de Curacautín 2c	41
3. 7. Bloque de escoria con inclusión félsica	46
3. 8. Posible contacto entre C2a y C2b	48
3. 9. Laminación presente en los depósitos retrabajados	50
3. 10. Contacto entre depósito retrabajado y la Ignimbrita Curacautín	51
3. 11. Facies mLT de la Ignimbrita Curacautín	53
3. 12. Facies dsLT de la Ignimbrita Curacautín	56
3. 13. Depósito masivo enriquecido en material juvenil	59
3. 14. Depósito de C2 con estratificación difusa	60
3. 15. Depósito de C1 con variación de color	60

ÍNDICE DE FOTOMICROGRAFÍAS

Fotomicrografía	Página
4. 1. Mineralogía de la muestra L13S del sector E	83
4. 2. Mineralogía de las muestras del sector N	85
4. 3. Mineralogía de las muestras del sector W	87

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	Página
4. 1. Curvas de distribución del tamaño de grano en sector N	67
4. 2. Curvas de distribución del tamaño de grano en sector W	67
4. 3. Curvas de distribución del tamaño de grano en sector E	68
4. 4. Selección de las diferentes facies por sector	69
4. 5. Curvas de distribución del tamaño de grano de las unidades de la Ignimbrita Curacautín	71
4. 6. Selección de las unidades de la Ignimbrita Curacautín	71
4. 7. Diagrama ternario de la distribución del tamaño de grano para C1 y C2	72
4. 8. Diagrama de caja del material juvenil de cada facies según localidad	79
4. 9. Diagrama de caja del material accidental de cada facies según localidad	80
4. 10. Diagrama de caja del contenido de cristales de cada facies según localidad	81
4. 11. Relación F2/F1 versus la distancia de la fuente eruptiva	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
3. 1. Muestras de los depósitos visitados de la Ignimbrita Curacautín ...	29
4. 1. Muestras de los depósitos visitados de la Ignimbrita Curacautín durante el 2016	65
4. 2. Principales tipos de líticos reconocidos	74
4. 3. Detalle de conteo de componentes accidentales para las distintas muestras de la Ignimbrita Curacautín	74
5. 1. Cálculo del espesor para cada zona de acumulación de la Ignimbrita Curacautín	93
5. 2. Parámetros para el cálculo de volumen de la Ignimbrita Curacautín	95

RESUMEN

La actividad postglacial del volcán Llaima (38°42'S, 71°44'W) comienza con la Ignimbrita Curacautín cuyas secuencias máficas datan entre 13.460 ± 400 años A.P. (no calibrada) para la unidad inferior (asociada al origen de una caldera volcánica) y 12.760 ± 130 años A.P. (no calibrada) para la unidad superior. Basados en datos de terreno, ambas unidades fueron estudiadas por medio del desarrollo de columnas estratigráficas y análisis sedimentológicos (componentes y granulométricos) con el fin de establecer características distintivas entre ellas. Por medio de la estratigrafía, se identificó a Curacautín 1 (C1) como la unidad inferior y Curacautín 2 (C2) como la superior. Los depósitos masivos, ricos en material juvenil, sin gradación, con un espesor máximo de 11 m que se distribuyen principalmente por los flancos E y N del volcán corresponden a C1. Sus depósitos de color gris oscuro cambian a café claro cuando varían desde capas masivas hasta difusamente estratificadas, tienen bajo grado de compactación y son matriz soportados con fragmentos líticos (rocas volcánicas andesita-basálticas y granodioritas) inmersos en abundante matriz de ceniza fina y con algunas bombas escoriáceas de hasta 20 cm. Esta unidad es seguida por un depósito de oleada piroclástica que marca el inicio de Curacautín 2. En dicho contacto existen pipas de desgasificación. C2 predomina hacia el lado W con un mayor grado de alteración (coloración parduzca) y abundantes restos carbonosos. Sus depósitos tienen un espesor máximo de 8,5 m, son matriz soportados de pobre selección, disgregables, con piroclastos irregulares y finamente vesiculados de ceniza gruesa a lapilli medio, con un mayor porcentaje de bloques que C1. En el sector E del volcán se pueden reconocer hasta 3 subunidades de Curacautín 2 (C2a, C2b y C2c) separadas por una débil capa limosa de 1 a 5 cm. La mayoría de los afloramientos de C1 y C2, están cubiertos por un depósito de material volcanoclástico retrabajado, generado por la erosión de la misma ignimbrita. Además, se identificaron 3 facies: mLT, que pertenece a una facies masiva, con fragmentos tamaño lapilli y sin gradación. Presente en ambas unidades, pero enriquecidas en material juvenil en C1 nombradas como facies mLT(*frich*); mLTpip de menor importancia volumétrica, reconocida localmente y definida como una facies masiva con algunos niveles ricos en líticos tamaño lapilli y bloque, con pipas de desgasificación; dsLT presente en ambas unidades de la ignimbrita, correspondiente a una facies con estratificación difusa subparalela e incluso levemente cruzada con algunas variaciones gradacionales del tamaño de grano. Los resultados del análisis sedimentológico muestran que, en general, hacia el E los depósitos proximales masivos y de pobre selección no tuvieron mayor transporte (ruta más directa y corta), con una rápida depositación. Hacia el N, C1 tiene mejor selección de media más gruesa, indicando flujos más energéticos que viajaron por valles y esteros con una corriente menos concentrada de partículas. Mientras que C2 hacia el N, no muestra evidencia de elutriación o segregación de líticos, indicando una corriente altamente concentrada. Los depósitos más distales hacia el lado W tienen un aumento de lapilli grueso y bloques, mayor alteración, esfericidad y redondez por la rugosidad de la superficie. Debido a la consistencia en el espesor y la gran extensión areal indica una corriente con gran movilidad que corresponde a Curacautín 2, cuyos flujos fueron los más energéticos (mayores distancias). Finalmente, se realizó una estimación de volumen mínimo calculado en $0,88 \pm 0,07$ km³ (no-DRE) y un volumen original del material eruptado de 22,54 km³ (no-DRE), que permiten clasificar a la Ignimbrita Curacautín como una erupción de VEI 7 tipo pliniana de gran explosividad y con una columna eruptiva >25 km de altura, que además tiene una baja razón de aspecto o "low aspect ratio" (LARI) indicativa de flujos inusualmente energéticos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La actividad postglacial del volcán Llaima, reconocida por las secuencias ignimbríticas máficas de espesores variables, comienza con una erupción explosiva a gran escala asociada al origen de una caldera que actualmente está cubierta en su totalidad por el cono principal del volcán (Moreno y Naranjo, 1991).

Anteriormente, Moreno y Naranjo (1991) obtienen el rango de edad de 13.460 ± 400 años A.P. (no calibrada) para una ignimbrita máfica a 7 km al SE de Curacautín, y otra datación de 12.760 ± 130 años A.P. (no calibrada) para un afloramiento sobre depósitos morrénicos, sin realizar mayor distinción entre ambas secuencias más que su distribución areal, identificando a toda la unidad como un flujo piroclástico denominado Ignimbrita Curacautín. Luego, Lohmar (2008) establece que la ignimbrita corresponde a un conjunto de flujos y oleadas piroclásticas, constituido por dos unidades (Curacautín 1 y Curacautín 2). Sin embargo, sólo se tomaron 10 muestras de la Ignimbrita Curacautín para análisis de química mineral y de vidrio, razones isotópicas, elementos mayores y elementos trazas, las cuales, aunque están limitadas espacialmente, no fueron obtenidas de manera sistemática, por lo tanto, su caracterización estratigráfica no valida toda la secuencia piroclástica. Pese a estos antecedentes previos, no hay un estudio acabado para investigar la heterogeneidad de la composición de la Ignimbrita Curacautín.

La problemática radica en que la bibliografía actual presenta información poco detallada de estos productos volcánicos sobre la base de descripciones generales de terreno y con respaldo en análisis geoquímicos que no cuentan con un amplio espectro de muestreo. Por lo tanto, aún se desconocen las características del evento eruptivo máfico, y los factores que condicionan las grandes erupciones plinianas y sus consecuencias, que actualmente podrían afectar a la población aledaña.

1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Un análisis detallado de las características de los depósitos piroclásticos de la Ignimbrita Curacautín (Curacautín 1 y Curacautín 2) del volcán Llaima, permitirán conocer e interpretar sus dos eventos eruptivos (13.4-12.7 ka) y el emplazamiento de las corrientes de densidad piroclásticas de ambos episodios volcánicos.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Determinar las variaciones estratigráficas, petrográficas y volumétricas de la Ignimbrita Curacautín del volcán Llaima, e interpretar las condiciones eruptivas y de emplazamiento de sus productos piroclásticos.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar variaciones estratigráficas de la Ignimbrita Curacautín en zonas proximales mediante la integración de nuevos afloramientos.
2. Establecer las características estratigráficas y definir las facies de las distintas unidades de la Ignimbrita Curacautín.
3. Determinar la granulometría y componentes de las unidades de la Ignimbrita Curacautín e indicar las variaciones estratigráficas y espaciales (verticales, longitudinales y laterales) respecto al centro eruptivo.
4. Establecer los mecanismos de transporte y deposición más apropiados a partir del estudio estratigráfico, granulométrico y de componentes de la Ignimbrita Curacautín.
5. Obtener una estimación del volumen mínimo actual y del volumen original del material eruptado según los depósitos de la Ignimbrita Curacautín.

1.4. UBICACIÓN Y ACCESOS

El volcán Llaima se ubica en el sector precordillerano de la provincia de Cautín en las coordenadas 38°42'S, 71°44'W, dentro de la IX Región de la Araucanía, 85 km en línea recta al E de la ciudad de Temuco, dentro del Parque Nacional Conguillío y entre las comunas de Curacautín, Melipeuco, Cunco y Vilcún. El área estudiada comprende el edificio volcánico principal, centros eruptivos adventicios y los productos emitidos dentro de un radio de 20 km desde la cima, lo que abarca una superficie irregular de unos 751 km². Desde Concepción, Temuco y Santiago, se puede acceder a la zona de estudio por cuatro vías que la conectan con la ruta 5 Sur (Figura 1.1).

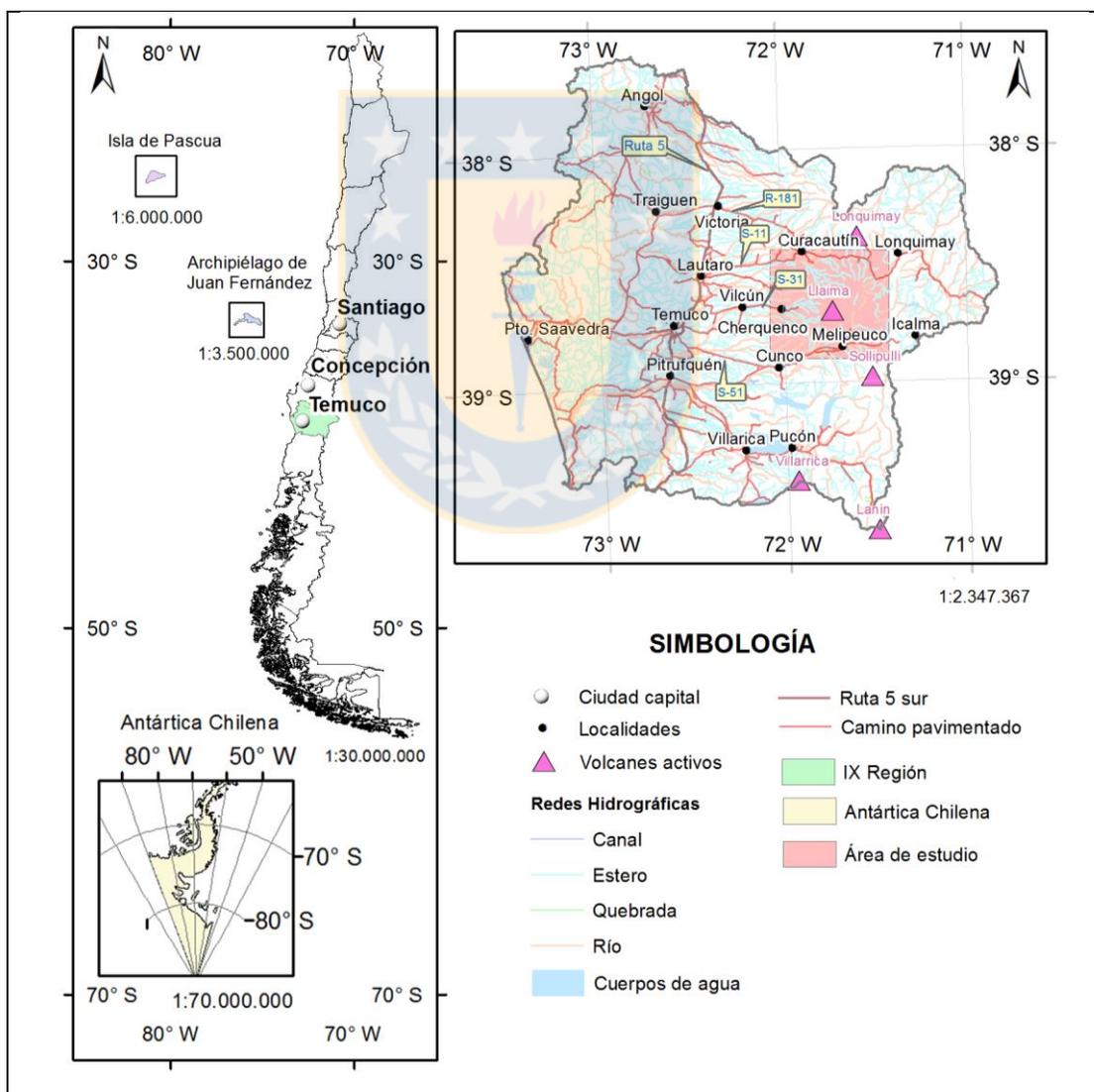


Figura 1.1: Mapa de ubicación y acceso al área de estudio. Coordenadas geográficas dentro del huso 19S en sistema WGS84.

Mediante la ruta 181 o la ruta S-11, se tiene acceso a la entrada N, desde Curacautín vía camino de ripio, cerca de 27 km en dirección al Parque Nacional Conguillío. El acceso a la entrada S es por medio de la ruta S-51 de camino asfaltado que llega a la ciudad de Cunco, y luego unos 30 km hasta llegar a Melipeuco, siguiendo hasta el interior del Parque Nacional Conguillío pudiendo recorrer el lado E del edificio volcánico. Desde la ciudad de Vilcún, el acceso central es por la ruta S-31, siguiendo un camino asfaltado hasta la localidad de Cherquenco, que luego recorre el flanco W del volcán por medio de un camino de ripio de aproximadamente 28 km que llega hasta Melipeuco. Los afloramientos estudiados corresponden principalmente a cortes de camino, riberas de los ríos y zanjas.

1.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

1.5.1. Metodología respectiva al primer objetivo específico

Revisión bibliográfica de trabajos anteriores que aborden a la Ignimbrita Curacautín y las características geológicas del volcán Llaima, sus erupciones históricas e implicancias volcanológicas y metalogenéticas. Recopilación de datos.

Delimitación del área de estudio y análisis de imágenes satelitales para la definición de puntos de interés basados en la morfología de la zona (Landsat y Google Earth).

Realizar visitas a terreno para identificar y describir los productos volcánicos de la ignimbrita máfica. En cada afloramiento se efectúa una descripción estratigráfica a detalle que comprende las características composicionales, granulometría, matriz, presencia de restos carbonosos, desarrollo de paleosuelo, estructuras, entre otras. Además, se lleva a cabo una toma de muestras de manera sistemática, y con control estratigráfico, de las distintas secuencias piroclásticas para análisis de laboratorio. Parte del muestreo consiste en tamizar la granulometría mayor a 8 mm durante la campaña de terreno, separando los componentes entre material accidental y juvenil con el fin de obtener información preliminar relevante.

1.5.2. Metodología respectiva al segundo y cuarto objetivo específico

Con base en las características de los depósitos, se definen las diferentes unidades (Curacautín 1 y Curacautín 2) de la Ignimbrita Curacautín, detallando la estratigrafía observada en terreno con el apoyo de columnas estratigráficas. Las cuales se correlacionan lateralmente y son vinculadas con los datos bibliográficos recopilados para establecer relaciones espaciales; cómo se distribuyen los depósitos respecto a los flancos del volcán, su estado de conservación, características texturales, entre otros.

Luego, siguiendo las descripciones de Branney y Kokelaar (2002) se realizó una interpretación de facies, permitiendo comprender los distintos mecanismos de depositación de los diferentes flujos piroclásticos.

1.5.3. Metodología respectiva al tercer objetivo específico

El análisis sedimentológico de las muestras obtenidas en terreno fue desarrollado en dos etapas.

1.5.3.1. Análisis granulométrico

Se realizó tamizaje de muestras, tanto mecánico como manual, para separar las diferentes fracciones granulométricas. Durante la campaña de terreno se tamizó de forma manual utilizando desde la malla número 2 1/2" (No. ASTM) hasta 5/16" (No. ASTM), equivalentes a valores de ϕ entre -6 (64 mm) y -3 (8 mm) a intervalos de 1 ϕ . Las fracciones fueron pesadas en una balanza con precisión de 0,01 g para posteriormente ser etiquetadas y guardadas en bolsas plásticas.

Para el tamizaje de granulometría menor a 8 mm, las muestras fueron secadas en un horno a 85°C durante 24 a 48 horas. Luego, se utilizó un agitador mecánico durante 10 minutos ocupando tamices desde el número 5 (No. ASTM) hasta la malla 230 (No. ASTM), equivalente a valores de ϕ entre -2 (4 mm) y 4 (0,062 mm), a intervalos de 1 ϕ . Las diferentes fracciones se pesaron en una balanza con precisión de 0,01 g y se obtuvo el porcentaje en peso y en volumen perteneciente a cada una. El resultado de este procedimiento es una curva de distribución de tamaños de partículas.

Se construyeron histogramas y curvas acumulativas de frecuencias de la distribución del tamaño de grano para cada muestra obtenida en terreno, considerando los porcentajes del peso individual y peso acumulativo versus el valor de ϕ , donde

$$\phi = -\log_2(d)$$

y d es el diámetro de la partícula en milímetros (Krumbein, 1938). Las curvas acumulativas de frecuencias permiten obtener de forma gráfica los parámetros granulométricos, tales como mediana, desviación estándar y asimetría (Inman, 1952). Además, se construyeron gráficos de desviación estándar versus mediana, para visualizar las características de tamaño de grano en diferentes tipos de depósitos piroclásticos (Walker, 1971). Adicionalmente, siguiendo el método de Brand *et al.* (2014) se analiza el grado de empobrecimiento en finos de los depósitos de flujo piroclástico, mediante gráficos de F2 (wt% < 0,06 mm) versus F1 (wt% < 1 mm).

1.5.3.2. Análisis de componentes

Con el propósito de cuantificar y cualificar sus componentes juveniles y accidentales, se llevó a cabo un conteo litológico en las diferentes fracciones granulométricas para valores de ϕ desde -6 (64 mm) hasta 3 (0,125 mm), para luego clasificar las partículas según composición, describir su forma, vesicularidad, alteración y otras características texturales importantes mediante la observación en lupa binocular. Se llevó a cabo un conteo de al menos 300 partículas para cada tamaño de grano que garantiza un 5% de error en la precisión de las distribuciones de los componentes (Mackaman-Lofland *et al.*, 2014), cuyo posterior análisis permite interpretar variaciones espaciales de la Ignimbrita Curacautín.

1.5.4. Metodología respectiva al quinto objetivo específico

Para llevar a cabo una estimación de volumen, se utilizó una metodología similar a la de Troncoso (2012), quien realizó una estimación del volumen en depósitos de la Ignimbrita Pudahuel en Chile. Se consideraron todas las exposiciones actuales de la Ignimbrita Curacautín, basándose en datos incluidos en mapas geológicos del área de estudio y en trabajos previos, sumados a las

observaciones realizadas en la actual investigación. De esta forma, se interpretó el área cubierta originalmente por los depósitos, asumiendo que estos eran continuos en los valles. Se definieron áreas específicas de acumulación de material piroclástico que corresponden a las zonas cubiertas por los depósitos con un espesor determinado, el cual se asume como relativamente constante para cada una de estas áreas.

Además, se realizó la estimación del volumen original del material eruptado de los depósitos de la ignimbrita. Se conservó el valor del espesor promedio expuesto actual, y se proyectó el área cubierta total de los depósitos originales, permitiendo el cálculo de una nueva estimación del volumen de la Ignimbrita Curacautín.

1.6. GEOMORFOLOGÍA

El área de estudio está inmersa en el sector andino, con relieves accidentados propios de la intensa acción erosiva glacial durante el Pleistoceno y la posterior actividad fluvial (Naranjo y Moreno, 2005). Börgel (1983 en Rodríguez, 2015), según rasgos geomorfológicos a escala nacional, posiciona el volcán Llaima en parte de la Precordillera y la Cordillera Andina; extendiendo la Precordillera desde el límite occidental del Llaima hacia el Valle Central, conformándose en este sector por la Cordillera de Melo (1.305 m s.n.m.), los cerros Negro (1.286 m s.n.m.), Los Paraguas, Pelado y Los Mellizos. La zona presenta abruptas laderas, ríos encajonados y acumulación de sedimentos glacio-fluvio-volcánicos al norte del río Allipén.

La Cordillera Andina queda relegada al volcán Llaima dentro del área de estudio, que constituye la cota superior con 3.179 m s.n.m. gradando en altitud hacia el sector oriental por una serie de cumbres como la Cordillera Los Truenos (1.967 m s.n.m.) y del Cordón de Cheñez (1.918 m s.n.m.), separadas del volcán por el valle del río Trifultriful, de dirección NS y que desemboca en el río Allipén (Rodríguez, 2015).

Los alzamientos tectónicos ocurridos desde el Terciario (Lara *et al.*, 2008) han influenciado la accidentada morfología, así como la acción glacial, fluvial, eólica y volcánica durante el Cuaternario, cuyos procesos generaron el actual relieve regional.

Hacia el límite E del volcán se manifiesta la traza principal del Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO, Hervé *et al.*, 1979 en Salas, 2014). El valle del río Trifultruful se encuentra rodeado por amplios campos de lava y depósitos de escoria y laháricos del volcán Llaima, cuyos materiales rellenaron el valle, denominado “Valle de la Luna”. Hacia el S, separando el volcán Llaima del volcán Sollipulli (2.283 m s.n.m.) y del cordón Nevados de Sollipulli (1.915 m s.n.m.), se encuentra un extenso valle glacial E-W del río Allipén (Naranjo y Moreno, 2005).

Naranjo y Moreno (2005) indican que la acción glacial tiene una intensa influencia en la configuración del relieve, tales como las abruptas paredes verticales de la Cordillera Los Truenos y el Cordón de Cheñez, además reconocen al NNW y S del volcán variadas formas glaciares como valles en forma de “U” de los ríos Captrén y Allipén, y al NE y SW, el macizo erosionado con circos glaciares del volcán Sierra Nevada y la Cordillera de Melo. Los cursos fluviales, como los ríos Allipén y Captrén, que han colmatado con sedimentos los valles por los que se encausan, también han influenciado el modelado del relieve. Rodríguez (2015) destaca el río Cabeza de Indio, que ha generado una profunda incisión fluvial en el valle de China Muerta.

Debido a su intensa actividad, el volcán Llaima es uno de los agentes más importantes en la configuración del relieve, creando extensos campos de lava y depósitos de escoria y lahares, y también represando con lavas los lagos Conguillío, Verde, Captrén y Arcoiris. Los flancos S y E del volcán son drenados por esteros y ríos afluentes del río Allipén, los cuales corresponden a el Trifultruful, Peuco-El Membrillo, El Canelo, El Manzano, Negro y El Salto (Naranjo y Moreno, 2005).

Estudios de los glaciares del volcán Llaima realizados por Naranjo y Moreno (2005), señalan la presencia de glaciares extensos en los flancos occidentales y suroccidentales, con una superficie total de 19 km², además de uno oriental de menor área que muestra 4 lenguas glaciales que cubren un área total de aproximadamente 10 km². El hielo presenta una gruesa cobertura piroclástica (en particular hacia el E), que ha actuado como un aislante térmico de los glaciares y disminuido la velocidad de la ablación. La existencia de cordones morrénicos en los antiguos frentes glaciales, constituyen grandes volúmenes de detritos fácilmente removibles durante eventos eruptivos.

1.7. TRABAJOS ANTERIORES

El primer acercamiento a las secuencias ignimbríticas máficas que se encuentran alrededor del volcán Llaima corresponde al trabajo de Moreno y Naranjo (1991) quienes otorgan a estos depósitos el nombre de Ignimbrita Curacautín, estimando un volumen de 24 km^3 (no-DRE) y una extensión de 2.000 km^2 sobrepasando hacia el W las ciudades de Temuco y Quepe. Esta ignimbrita marca el inicio de una etapa explosiva asociada a un evento eruptivo de gran magnitud hace 13.460 años A.P (no calibrada), produciendo el colapso del edificio volcánico y la generación de una caldera de 8 km de diámetro que actualmente está cubierta por los depósitos más jóvenes del volcán.

Dentro del mismo año, Naranjo y Moreno (1991) investigan la sucesión de depósitos generados por las erupciones explosivas postglaciales, de mayor magnitud que ha tenido el volcán Llaima, en el cual dividen esta secuencia en depósitos de flujo piroclástico (Ignimbrita Curacautín), depósitos de caída (airfall) pliniana y de oleada (surge) piroclástica, estableciendo que los últimos dos son más jóvenes que la ignimbrita. Señalan que los espesores máximos registrados de la Ignimbrita Curacautín llegan a 50 m a 15 km del volcán y en los sectores más occidentales (Quepe) del orden de 1.5 m. La describen como internamente homogénea y masiva, matriz soportada y, cuyos fragmentos juveniles, a menudo bien redondeados, corresponden a bombas y lapilli escoriáceos de composición basáltica a andesítica (51-58% SiO_2), con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno. Los fragmentos accidentales son principalmente granitoides (hasta 30% de los clastos) y la matriz se presenta parcialmente consolidada, algo alterada con abundante ceniza y, en menor proporción lapilli fino, con un color ocre característico. Además, estos autores identificaron dos unidades de flujo separadas por un contacto nítido, pero sin realizar una mayor distinción entre ambas. Obtuvieron una edad media por radiocarbono del rango de 13.170 años A.P. (no calibrada) para el depósito. En el año 2005, publican la geología del volcán Llaima en el marco de la carta geológica de Chile No. 88, cuyas descripciones y análisis de la Ignimbrita Curacautín no varían mucho de sus trabajos previos.

En 2008, Lohmar realiza su trabajo de tesis doctoral donde combina petrología, análisis de roca total y de isótopos radiogénicos (Sr y Nd) para evaluar el rol de la cristalización fraccionada, mezcla

de magma y asimilación de corteza en las unidades eruptivas del Llaima, abarcando desde períodos anteriores y posteriores a la secuencia Curacautín. Lohmar combina las dos unidades de la Ignimbrita Curacautín en una sola al analizar sus muestras, señalando que el material juvenil de ésta incluye un grupo basáltico (51-54% SiO₂) y otro grupo de andesita basáltica a andesita (56-58% SiO₂), con un gap composicional entre 54-56% de sílice, atribuible a la cristalización fraccionada y mezcla con un magma riódacítico, sin embargo, no se identificaron enclaves de riódacitas. Además, según las bajas razones de isótopos Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: 0.703976-0.704004; $2\sigma = 1 \times 10^{-5}$) y relativamente altos de Nd ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: 0.512868-0.512881; $2\sigma = 1 \times 10^{-5}$), este autor deduce poca o ninguna asimilación de las rocas plutónicas a la corteza, interpretando que los líticos de granodiorita se derivan de la brechización syn-eruptiva de la corteza superior durante el colapso de la caldera. Debido a que el objetivo de su trabajo era estudiar las características generales de las unidades eruptivas del Llaima, se tomaron 10 muestras de la secuencia Curacautín.

Schindlbeck *et al.* (2014) buscan restringir las condiciones de almacenamiento de las unidades eruptivas postglaciales del volcán Llaima, utilizando geotermobarometría de olivino y clinopiroxeno. Al igual que en investigaciones anteriores, este trabajo se centró principalmente en caracterizar las condiciones generales de almacenamiento, y utilizaron *solo una muestra* perteneciente a la Ignimbrita Curacautín, cuya presión y temperatura son de 430-580 MPa (18 km de profundidad) y 1100-1110°C respectivamente. Si bien esto sugiere un rango limitado de presión y temperatura, al obtener estas estimaciones desde análisis de una sola muestra, es probable que no sean representativas de toda la erupción, sesgando las interpretaciones de la evolución del magma y las condiciones de almacenamiento.

1.8. AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradezco a mi profesor patrocinante, José Luis Palma, por invitarme a participar del proyecto “Exploring the Magmatic, Crustal, and Conduit Conditions Required for Mafic, Plinian Volcanism” de la Universidad Estatal de Boise, Estados Unidos, a cargo de un equipo multidisciplinario guiado por Brittany Brand, dándome la oportunidad de ser parte de esta investigación dentro del marco de mi memoria de título.

Se agradece a todos los docentes y funcionarios del Departamento Ciencias de la Tierra que han aportado con su conocimiento y experiencia para la elaboración de esta investigación. En especial, a los señores Pedro Bravo, Iván Orellana y Luis Vásquez, por su labor y apoyo, tanto dentro y fuera de los laboratorios y talleres de Geología. De igual modo se agradece la colaboración de don Raúl Núñez y la señora Lucy Henríquez. A las docentes de la comisión Verónica Oliveros y Verónica Pineda, por sus aportes y sugerencias.

Finalmente, a modo personal agradezco a Constanza Perales por su disponibilidad a prestar ayuda, sobretodo en la etapa de terreno. De la misma forma, agradecer el constante apoyo y guía de Aaron Marshall, por su valiosa contribución para completar con éxito el término de este trabajo.



2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. BASAMENTO DEL VOLCÁN

2.1.1. Grupo Plutónico Melipeuco (Mm) Mioceno

Suárez y Emparán (1997) definen esta unidad como rocas graníticas que se ubican en torno a la localidad de Melipeuco con extensos afloramientos, los cuales infrayacen en inconformidad a las formaciones Malleco, Curamallín y las secuencias volcánicas pleistocenas y holocenas e intruyen a la Formación Curamallín, al Complejo Vizcacha-Cumilao y al Grupo Plutónico Galletué. La litología predominante corresponde a monzogranitos, granodioritas y tonalitas, identificando otros tipos petrográficos minoritarios de monzonitas cuarcíferas, monzodioritas y dioritas cuarcíferas. Se dispone a los alrededores del volcán Llaima, aflorando de forma intermitente al N, y E-W, y de manera continua al E y S del volcán (Figura 2.1).

Los valores radiométricos K-Ar obtenidos por Suárez y Emparán (1997) acotan entre 15 y 4.5 Ma las edades de cristalización, y considerando las relaciones de contacto con la Formación Curamallín (Moreno y Lara, 2008), esta unidad tendría una edad miocena media.

2.1.2. Formación Malleco (PPlim) Plioceno-Pleistoceno inferior

Definida por Suárez y Emparán (1997) como una secuencia volcánica continental compuesta por diferentes facies volcánicas con predominio de lavas andesítico-basálticas e intercalaciones de rocas volcanoclásticas y sedimentarias ocasionales, con extensión hacia el borde occidental de la Cordillera Principal y que se distribuye al W del volcán Llaima (Figura 2.1). Esta unidad sobryace con discordancia angular al Complejo Vizcacha-Cumilao y a la Formación Curamallín, y sobre el Grupo Plutónico Melipeuco, yace en inconformidad. A su vez, está cubierta por las rocas volcánicas pleistocenas, holocenas y los depósitos actuales no consolidados.

Exhibe potencias de 5 a 10 m, y localmente en el sector de la Cordillera de Melo, Naranjo y Moreno (2005) estiman espesores de hasta 1500 m. Según Suárez y Emparán (1997), esta formación se acumuló en un ambiente subaéreo, a partir de centros volcánicos, cuyas rocas volcanoclásticas se habrían depositado en abanicos volcanoclásticos coalescentes, mientras que las rocas sedimentarias corresponden a sistemas fluviales representados por las intercalaciones de ortoconglomerados y areniscas.

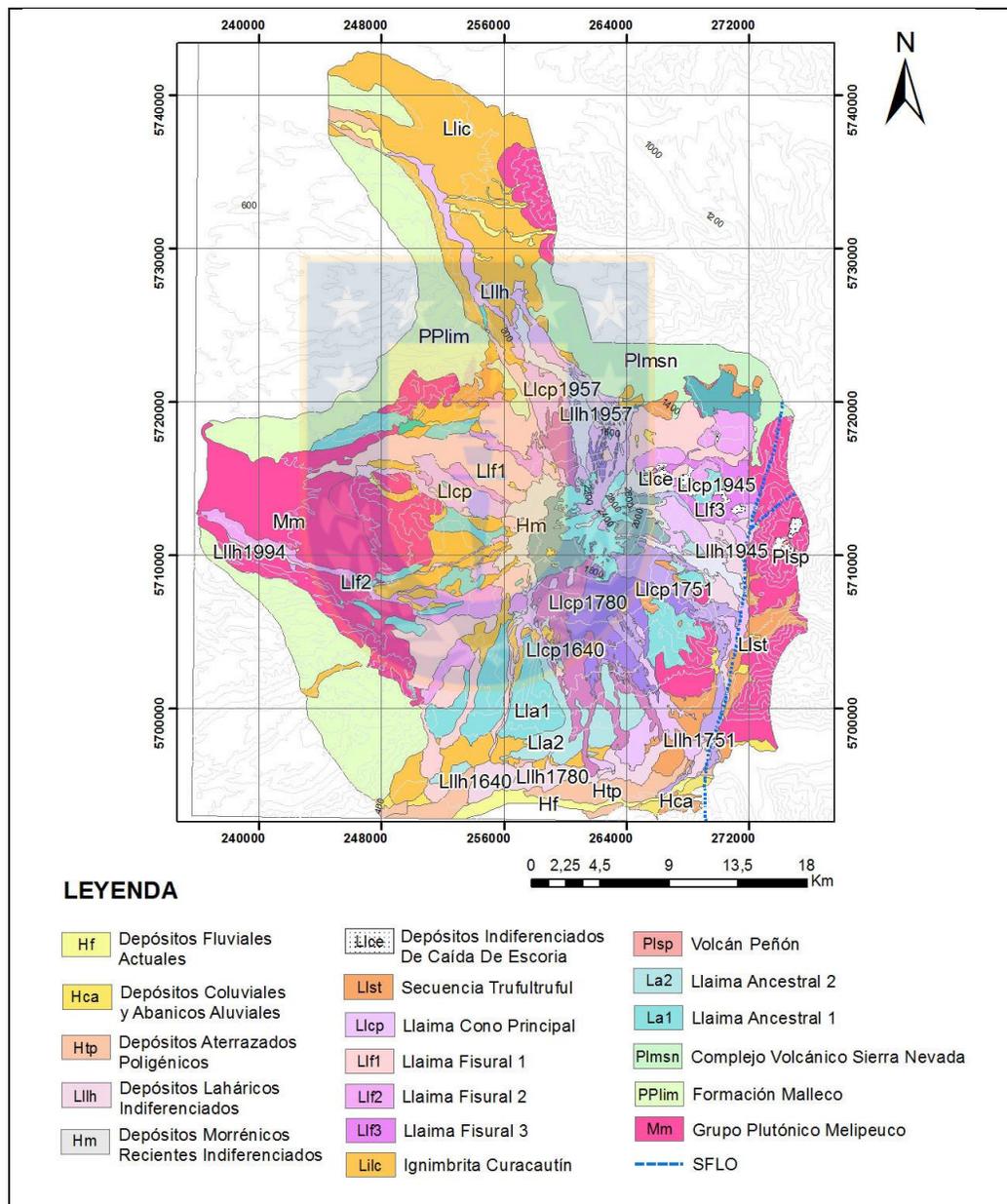


Figura 2.1: Mapa geológico del volcán Llaima. Geología del volcán. Coordenadas geográficas en UTM dentro del huso 19S en sistema WGS84. Modificado de la carta geológica elaborada por Naranjo y Moreno (2005).

Dataciones K-Ar entregan edades que varían entre 4.4 y 0.8 Ma, acotando la unidad al Plioceno-Pleistoceno inferior y correlacionándose con la Formación Cola de Zorro (Suárez y Emparán, 1997).

2.1.3. Complejo Volcánico Sierra Nevada (Plmsn) Pleistoceno Medio a Superior?

Naranjo y Moreno (2005) mencionan este complejo ubicado al NNE del volcán Llaima (Figura 2.1) como una estructura volcánica compuesta por un estratovolcán principal extinto y un cordón volcánico fisural de orientación N65°E. El borde occidental está conformado por intercalaciones de basaltos y andesitas con potencias de 3 a 15 m, con texturas masivas y brechozas (Naranjo y Moreno, 2005). Alcanza una altura de 2.554 m s.n.m. y presenta evidencias de pervasiva erosión glacial pleistocena (Suárez y Emparán, 1997).

Suárez y Emparán (1997) señalan que la base alcanza los 30 km de diámetro, cuyos materiales cubren con discordancia a rocas estratificadas del Mioceno y a rocas graníticas. Hacia el norte del complejo volcánico, Naranjo y Moreno (2005) reconocen una zona de alteración hidrotermal que da origen a fuentes termales aún activas, tales como las Termas del río Blanco.

2.2. GEOLOGÍA DEL VOLCÁN LLAIMA

2.2.1. Llaima Ancestral (La1 y La2) Pleistoceno Medio?-Superior

Sucesión de lavas basálticas a andesíticas, con intercalaciones de brechas e intrusiones subordinadas de lacolitos que conforman dos unidades: Llaima Ancestral 1 y Llaima Ancestral 2, que son interpretadas como relictos de un sistema volcánico previo al Llaima, con lavas distribuidas en relieves que mantean radialmente (Naranjo y Moreno, 2005).

Llaima Ancestral 1 es el nivel más elevado y potente, con espesor máximo de 600 m, en cambio, el nivel más joven y topográficamente bajo, corresponde a Llaima Ancestral 2 con espesor de hasta 300 m. Estas lavas cubren concordantemente a la Formación Malleco y yacen en inconformidad

sobre el Grupo Plutónico Melipeuco en los cerros Los Paraguas, Pangueco y Negro. Las unidades ancestrales se distribuyen al S del volcán de forma radial y alrededor de este, conformando las paredes de profundos valles en “U” debido a la intensa acción erosiva de la última glaciación. En los valles de los ríos Calbuco y Captrén existen coladas tipo “aa” sin patrón de erosión posterior y cubiertas por depósitos piroclásticos (Naranjo y Moreno, 2005).

Dos dataciones K-Ar en lavas de la unidad Llaima Ancestral 1, realizadas por Naranjo y Moreno (2005), entregan valores entre 68 y 60 ka, indicando una edad Pleistoceno Superior. Valores concordantes con la posición morfoestratigráfica de la unidad Llaima Ancestral 2.

2.2.2. Volcán Peñón (Plsp) Pleistoceno Superior?

Estructura de una chimenea volcánica extinta con evidencias de una fuerte erosión glacial, la cual aflora al E del río Trifultruful y al oriente del volcán Llaima (Figura 2.1), abarcando un área de 1 km² entre lavas basálticas y depósitos de bombas escoriáceas de hasta 1,5 m de diámetro. Se dispone sobre el Grupo Plutónico Melipeuco, cubierto parcialmente por un manto de escorias de caída de erupciones históricas del Llaima (Naranjo y Moreno, 2005).

El desarrollo de este volcán fue independiente del Llaima, y es por el grado intenso de erosión glacial que Naranjo y Moreno (2005) estiman una edad Pleistoceno Superior para esta unidad.

2.2.3. Ignimbrita Curacautín (Lilc) Pleistoceno Superior

Naranjo y Moreno (1991) definen así al depósito piroclástico, tipo escoria y ceniza, ubicado sobre el fondo de los valles radiales en los alrededores del volcán Llaima. Esta sucesión sobreyace a las unidades ancestrales y al basamento del volcán, e infrayace a las unidades fisurales y del cono principal al igual que subyace a la sucesión de depósitos piroclásticos de la Secuencia Trifultruful según Naranjo y Moreno (2005).

La Ignimbrita Curacautín se distribuye principalmente al W del volcán Llaima (Figura 2.1), según Moreno y Naranjo (1991) tiene una extensión cercana a 2.200 km², alcanzando la ciudad de

Temuco y Quepe a más de 100 km hacia el W del volcán (Figura 2.2). Los afloramientos tienen espesores máximos de 50 m a 15 km del volcán Llaima (sector laguna Quepe) y espesores de 1,5 m en la localidad de Quepe. El volumen total estimado sin considerar la densidad de roca equivalente (no-DRE) es de 24 km³. La Ignimbrita Curacautín presenta una textura homogénea y maciza, en tonos gris medio a oscuro, y es matriz soportada de ceniza y lapilli fino de color ocre. Sus fragmentos juveniles de composición andesítica a basáltica, corresponden a bombas, lapilli escoriáceos y cenizas de grano medio a grueso, también se reconocen líticos de rocas intrusivas (Naranjo y Moreno, 1991). Resultados barométricos de Schindlbeck *et al.* (2014) respecto a una sola muestra de la Ignimbrita Curacautín señalan que la andesita-basáltica presenta condiciones de almacenamiento de 430-580 MPa y 1100-1110°C respectivamente, por lo que el reservorio magmático estaría a unos 18 km de profundidad.

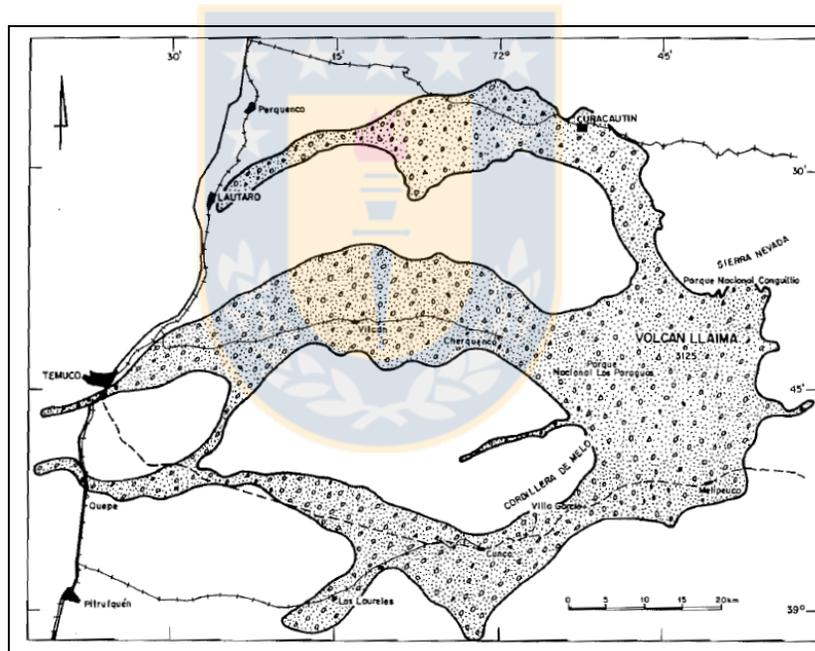


Figura 2.2: Distribución de la Ignimbrita Curacautín. Depósitos piroclásticos en los alrededores del volcán Llaima. Elaborado por Moreno y Naranjo (1991).

Lohmar (2008) establece que la Ignimbrita Curacautín está conformada por dos unidades principales: Curacautín 1 (unidad inferior) y Curacautín 2 (unidad superior). La unidad inferior (Fotografía 2.1a) corresponde a un depósito masivo y sin estructuras (con capas de hasta 10 m de espesor), constituido principalmente por bombas escoriáceas (tamaño máximo de 20 cm; 51-58% SiO₂) y en menor proporción, presenta fragmentos líticos de rocas volcánicas andesítica-basálticas

y granitoides inmersos en abundante matriz (Fotografía 2.1b). Sobre el nivel masivo de Curacautín 1 se posicionan depósitos de oleadas piroclásticas que pertenecen a la unidad superior. En el contacto entre ambas unidades (Fotografía 2.1c) se reconocen pipas de desgasificación que comienzan en la parte maciza y terminan abruptamente en el contacto con estas oleadas. Curacautín 2 se destaca por exhibir estratificación cruzada y lentes de material fino, bien seleccionado formado por lapilli y ceniza, con estratificación difusa hacia techo (Fotografía 2.1d), gradando transicionalmente a un último depósito de oleada piroclástica. En el río Captrén, Lohmar (2008) reconoce la existencia de depósitos de retrabajo y una discordancia que indica un intervalo de tiempo significativo entre la erupción de las unidades 1 y 2. Estos depósitos retrabajados alcanzan 4 m de espesor, presentan estratificación paralela y los clastos de tamaño lapilli y ceniza exhiben formas redondeadas características.



Fotografía 2.1: Características de terreno de los depósitos syn- y post-Ignimbrita Curacautín.
 a) Unidad inferior (río Trifultriful, al E del volcán) con 20 m de espesor, bajo una secuencia de material retrabajado, tefras de caída (1), depósito de pómez pliniana (2) y oleadas piroclásticas (3). b) Curacautín 1 sector laguna Quepe (W del volcán), con pipas de desgasificación hacia techo (c) y bajo Curacautín 2. d) Depósitos de flujos gradando a niveles con estratificación difusa (Curacautín 2). Fuente Lohmar (2008).

Independiente de las observaciones de terreno, el trabajo de Lohmar respecto a la Ignimbrita Curacautín se limita a 10 muestras de la unidad. Esto se debe a que el autor tiene como objetivo establecer una comparativa entre la petrología de las ignimbritas Licán y Pucón (volcán Villarrica) respecto a la Curacautín (volcán Llaima), por lo que centra su estudio en 5 muestras del grupo básico (51-54% SiO₂) y 5 muestras del grupo ácido (56-58% SiO₂) pertenecientes a la Ignimbrita Curacautín. Estas muestras fueron sometidas a análisis de química mineral y de vidrio, razones isotópicas, elementos mayores y elementos trazas, obteniendo como resultado que la Ignimbrita Curacautín tiene una evolución totalmente independiente del resto del volcán, cuyas composiciones de menor contenido en sílice están empobrecidas en Mg, Cr y Ni, y enriquecidas en Fe y Ti con respecto a las lavas posteriores de igual grado de diferenciación. Esta diferenciación propia de la ignimbrita podría ser producto de un proceso de cristalización fraccionada, sin embargo, Lohmar interpreta que, a diferencia del resto del volcán, el sistema habría estado abierto. Además, concluye que los pequeños enriquecimientos durante la cristalización de elementos tales como Rb, K y algunas tierras raras, asociados a valores isotópicos de O bajos ($\delta^{18}\text{O} < 5,5\text{‰}$) sugieren contaminación por rocas plutónicas del basamento. Finalmente, los productos menos diferenciados de ambas unidades (51-54% SiO₂: grupo básico) reflejan evolución por fraccionamiento convectivo, mientras que las rocas de mayor contenido de sílice (56-58% SiO₂; grupo ácido) tienen evidencias mineralógicas y geoquímicas tanto de cristalización fraccionada como de mezcla con un magma de composición riodacítica.

La estratigrafía propuesta por Lohmar (2008) se resume en una serie de columnas estratigráficas de la figura 2.3, en la cual hacia el sector E del edificio volcánico, se puede observar la continuidad de la Ignimbrita Curacautín y las unidades posteriores, en este caso, el contacto con la Secuencia Truftruf. Luego, con dirección W del volcán, se reconocen las pipas de desgasificación que separan a Curacautín 1 y Curacautín 2, y por sobre estas, un depósito piroclástico con estratificación cruzada y paralela. Más hacia el SW, se encuentran depósitos de la unidad superior con un espesor acotado (menor a 4 m) y con restos de material carbonoso.

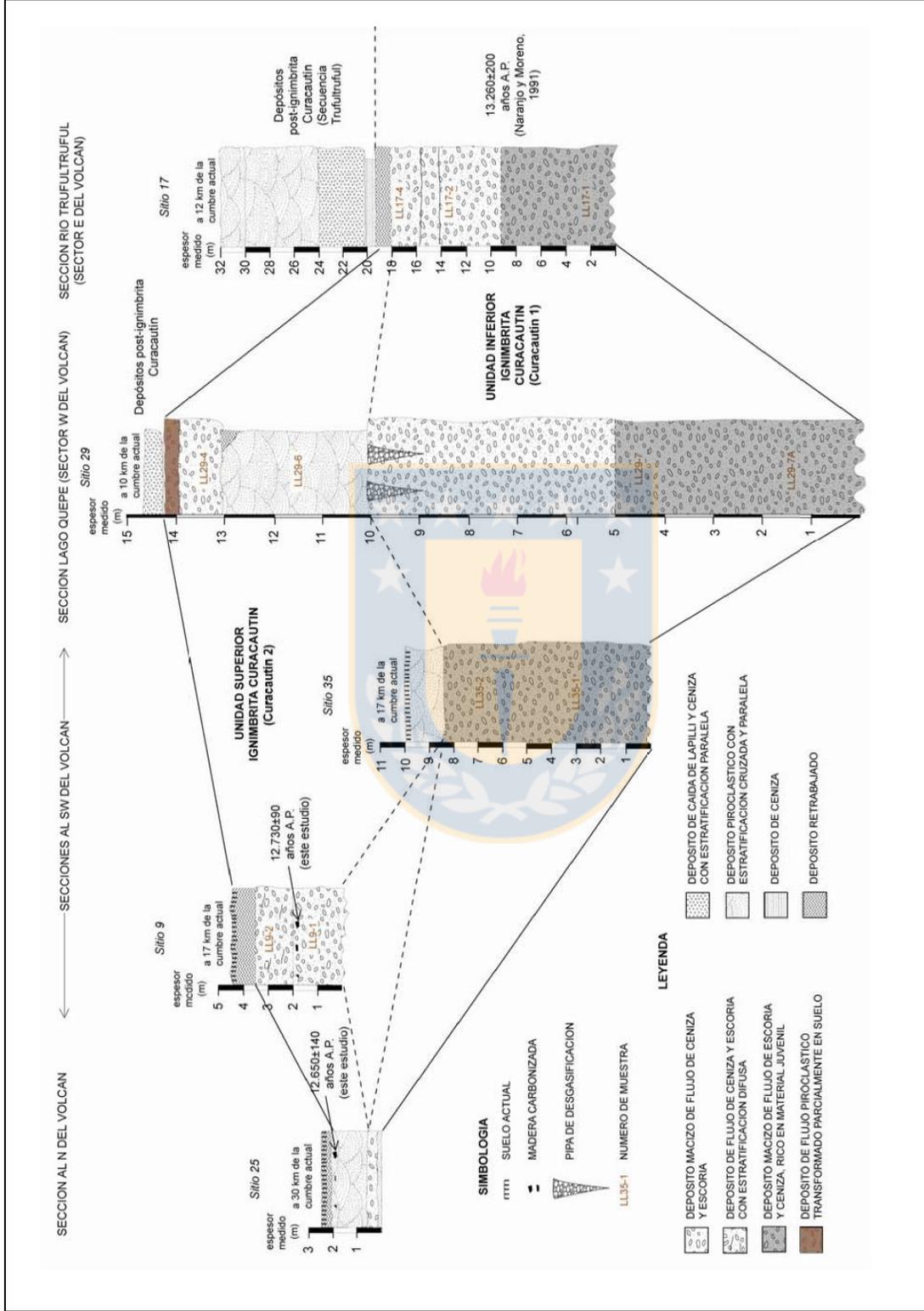


Figura 2.3: Columnas estratigráficas de la Ignimbrita Curacaútin. Descripción estratigráfica de los depósitos piroclásticos de la Ignimbrita Curacaútin observados al N, SW, W y E del volcán. Se destacan las pipas de desgasefacción observadas en el sector de la laguna Quepe. Fuente Lohmar (2008).

Naranjo y Moreno (1991) realizan dataciones ^{14}C en madera carbonizada dentro de la ignimbrita y otorgan edades que fluctúan entre 13.460 y 12.760 años A.P. (no calibrada), por lo tanto, esta unidad fue eyectada a comienzos del postglacial, a través de una erupción con posible vinculación al origen de una caldera con 6 a 8 km de diámetro, que actualmente estaría cubierta en su totalidad por el cono principal del volcán Llaima (Naranjo y Moreno, 2005). Por otra parte, las edades calibradas obtenidas por Lohmar (2008) de la figura 2.4, sugieren que la unidad inferior corresponde a un evento que ocurrió unos 15.700 años A.P., mientras que la erupción de los flujos superiores se produjo hace unos 14.800 años A.P.

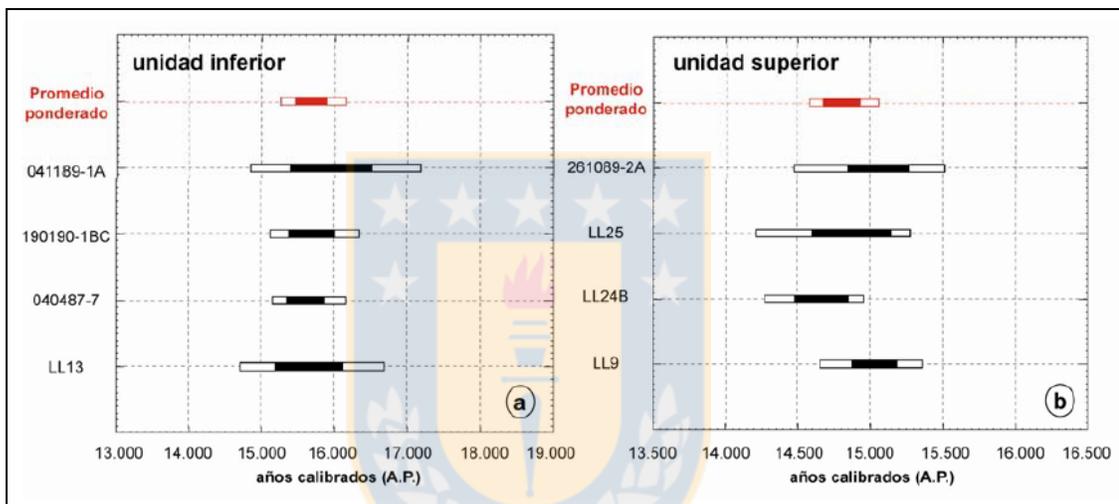


Figura 2.4: Edades calibradas de la Ignimbrita Curacautín. a) Edades de la unidad inferior. b) Edades de la unidad superior. Las barras corresponden a 1σ y 2σ . Fuente Lohmar (2008).

2.2.4. Llaima Fisural (Llf) Holoceno

Naranjo y Moreno (2005) señalan que está conformada por tres unidades estratigráficamente sucesivas: Llaima Fisural 1, Llaima Fisural 2 y Llaima Fisural 3, situadas en el flanco NE y en toda la falda occidental del volcán (Figura 2.1), constituida por conos piroclásticos de escorias y coladas de lava de tipo “aa”, de composición andesítica a andesítica-basáltica. Según Rodríguez (2015), los centros de emisión forman lineamientos con tendencia NE-SW a E-W, alcanzando distancias de hasta 20 km y siendo responsables de haber embalsado las lagunas Conguillío, Verde y Arcoíris, yaciendo concordantes sobre la Ignimbrita Curacautín y la Secuencia Trifultruful.

La unidad Llaima Fisural 1 y 2 están formadas por coladas de lava tipo “aa” y conos piroclásticos de escorias, ubicados sobre un mismo lineamiento en arco de orientación N45°E. Individualmente, la unidad Fisural 1 presenta coladas de lava de 3 a 5 m de espesor que alcanzan hasta 15 km en el río Quepe. Los conos piroclásticos de escoria de la unidad Fisural 2 muestran formas basales circulares y también alargadas en dirección de la fisura, las que pueden alcanzar desde 1,5 hasta 2,5 km de largo. En general, las lavas de esta unidad se ubican en un intervalo composicional relativamente restringido entre andesíticas basálticas y andesitas (~54.6-56.5% SiO₂) casi el mismo que la unidad Fisural 1 (~54-58.6% SiO₂). Por su parte, la unidad Llaima Fisural 3 se sobrepone a los conos de las unidades fisurales 1 y 2, como un rosario de pequeños conos y cráteres alineados a lo largo de una fisura de 1 km de longitud, entre lineamientos paralelos con orientación ENE, cuya composición corresponde a andesitas basálticas (52.2-52.8% SiO₂) y, sus coladas de 5 m de espesor, que alcanzan longitudes de hasta 6 km en dirección al lago Verde (Naranjo y Moreno, 2005).

Dataciones ¹⁴C a partir de madera carbonizada otorgan edades entre 3.440 y 2.949 A.P. para Llaima Fisural 1, entre 2.949 y 770 A.P. para la unidad Llaima Fisural 2, y de 320 A.P. para la unidad Llaima Fisural 3 (Naranjo y Moreno, 2005).

2.2.5. Llaima Cono Principal (Llcp) Holoceno-Histórico

Esta unidad incluye las rocas volcánicas que han construido la estructura cónica del edificio volcánico del Llaima, siendo emitidas desde los cráteres y fisuras radiales. Sus productos más antiguos sobreyacen a la unidad Llaima Fisural 2, y los más jóvenes fueron expulsados durante las Erupciones Históricas. Estas lavas tipo “aa” de composición basáltica y andesítica-basáltica, han fluido radialmente alrededor del volcán, alcanzando distancias que sobrepasan los 27 km desde el centro de emisión (Figura 2.1) y con espesores de hasta 10 m en su frente (Naranjo y Moreno, 2005).

En el trabajo de Naranjo y Moreno (2005) se realizaron dataciones ¹⁴C en restos de carbón bajo las coladas, cuyas edades están entre 1.160 a 410 A.P. Sin embargo, al ser obtenidas en productos superficiales y sin edades más antiguas de las mismas, se infiere que la edad máxima de la unidad

se extiende hasta el límite superior de las coladas de lava infrayacentes de la unidad Llaima Fisural 2, es decir, a 2.940 A.P.

Ambos autores identifican seis subunidades dentro de la unidad Llaima Cono Principal, correspondientes a las Erupciones Históricas, en orden cronológico de más antigua a más moderna; la erupción de 1640 d.C., que fue emitida a través de dos fisuras, una en el flanco NW, y la otra en la ladera SW del volcán y, según antecedentes documentados, es la erupción de mayor magnitud del volcán Llaima durante tiempos históricos. La erupción de 1751 d.C., cuyas lavas tipo “aa” se originaron en la cima S del volcán para luego descender por el valle del Trifultruful hacia Melipeuco, con espesores de hasta 6 m en el extremo distal a 23 km de la fuente. La erupción de 1780 d.C., durante la cual las lavas emergieron a través de fisuras ubicadas en el flanco N y S del volcán, llegando a escasos 4,5 km de la actual localidad de Melipeuco (escoriales de Pangueco). La erupción de 1945 d.C., cuyas lavas tipo “aa” fueron expulsadas desde el cráter principal, bajo el hielo hacia el E, con una potencia de 13 m en su frente, encauzada en una quebrada y alcanzando 10 km de largo. La erupción de 1957 d.C., en la cual desde el flanco N y parte oriental de la cima S del volcán, se emitieron lavas tipo “aa” de frentes de hasta 8 m de espesor, con algunos flujos de rasgos *pahoehoe* (lavas cordadas) desde una abertura de túnel de lava local. La erupción de 1994 d.C., donde las lavas fueron extruídas desde el cráter principal, y fluyeron bajo el hielo generando un lahar hacia el río Calbuco. La erupción de 2008 d.C., con lavas expulsadas desde el cráter principal del Llaima (Bouvet de Maisonneuve *et al.*, 2012). Composicionalmente las rocas emitidas en las Erupciones Históricas corresponden andesítica-basáltica y basaltos con textura porfídica (Naranjo y Moreno, 2005).

2.2.6. Secuencia Trifultruful (Llst) Holoceno-Histórico

Originalmente descrita por Naranjo y Moreno (1991) como una sucesión estratificada holocena compuesta por depósitos piroclásticos de flujo, caída y oleada propias de erupciones explosivas del volcán Llaima. La Secuencia Trifultruful sobreyace a la Ignimbrita Curacautín, al Grupo Plutónico Melipeuco y a las unidades ancestrales del Llaima. Se dispone principalmente al E y SE del volcán (Figura 2.1), debido a la dispersión producida por los vientos NW y W, y en menor medida aflora al NE en el sector de los lagos Captrén y Conguillío. A lo largo del valle del río Trifultruful,

alcanza una potencia máxima de 35 m, con 70 niveles de caída de piroclastos y flujos, alternados con delgados horizontes de paleosuelos. Particularmente, Naranjo y Moreno (2005) distinguen 40 niveles de caída de escorias, 2 niveles de caída de pómez y 25 niveles de flujos u oleadas piroclásticas.

La base de esta unidad está compuesta por una sucesión de tefras de 3 m de espesor, la sobreyace un depósito de caída de piroclastos pliniano de pómez dacíticas, bien seleccionado, alcanzando 4 m de potencia. Hacia techo aparecen dos depósitos de oleada piroclástica, localmente separados entre sí por una discordancia de erosión; el basal de 4 m de espesor que alcanza una distancia de 12 km de la cima del volcán, con una distribución restringida a la desembocadura de los valles ubicados al E y S del Llaima, se presenta mal seleccionado y con estratificación cruzada y laminación paralela; el superior aflora solo parcialmente en el corte oriental del río Trifultriful, 9 km al ESE de la cima del volcán, y corresponde a una sucesión interestratificada de lapilli y ceniza gruesa, con bandas de gradación normal, alcanzando un espesor de 5 m e incluye improntas de hojas. Las intercalaciones de caída de escorias tienen fracciones desde ceniza hasta lapilli grueso, potencia variable entre 5 y 55 cm, y gradación interna inversa o normal (Naranjo y Moreno, 2005).

Dataciones ^{14}C en restos de madera carbonizada, directo de niveles de flujo y oleada, indican una edad entre 10.530 y 280 A.P., donde los más jóvenes se pueden vincular a las contrapartes efusivas descritas en la unidad Llaima Cono Principal de lavas propias de las Erupciones Históricas. Por su parte, los depósitos de caída, sugieren un predominio de erupciones estrombolianas a subplinianas durante el desarrollo de esta unidad (Naranjo y Moreno, 2005).

2.2.7. Depósitos Indiferenciados de Caída de Escoria (Llce) Histórico

De acuerdo a Naranjo y Moreno (2005), esta unidad se constituye por depósitos de caída de piroclastos escoriáceos acumulados al E del volcán Llaima, aflorando en forma de un manto aislado (Figura 2.1). Su potencia varía entre 1 a 2 m e incluye fragmentos de lapilli y bombas escasas, emitidos por el cráter principal o por los conos adventicios de las unidades fisurales.

Esta unidad cubre el flanco oriental del Llaima, en los alrededores de las unidades Llaima Fisural 2 y 3, y sobre el Grupo Plutónico Melipeuco, en cercanía al volcán Peñón, extendiéndose hasta 12 km al E del volcán. Se infiere que estos depósitos son producto de las principales Erupciones Históricas del volcán (Naranjo y Moreno, 2005).

2.2.8. Depósitos Morrénicos Recientes Indiferenciados (Hm) Holoceno

Corresponden a depósitos glaciales y sedimentos, trasladados debido al escurrimiento (“outwash”) de aguas fundidas de los glaciares del volcán. Se componen de detritos matriz soportados, con mala selección, formados principalmente por limos, arenas, bloques y bolones de materiales volcánicos. Alcanzan potencias de 10 a 30 m, y cubren a la unidad Llaima Cono Principal en los flancos NE y W del volcán (Naranjo y Moreno, 2005).

2.2.9. Depósitos Laháricos Indiferenciados (Llh) Histórico

Según Naranjo y Moreno (2005), esta unidad está compuesta por depósitos de flujo de detritos no consolidados de origen lahárico, empobrecidos en arcilla y con abundantes fragmentos de tamaño grava, mal seleccionados, inmersos en una matriz arenosa. Estos depósitos son los rellenos de casi todos los valles alrededor del volcán Llaima (Quinteros, 1991 en Naranjo y Moreno, 2005). Su potencia varía de 5 a 10 m, y son principalmente monolitológicos, con baja proporción de fragmentos de rocas del basamento y constituyentes comunes de fragmentos de troncos.

Las facies de estos depósitos se caracterizan por ser acumulaciones masivas sin gradación o parcialmente gradadas, de forma inversa a base y normal hacia techo. Las facies distales presentan características intermedias entre flujos de detritos y aluviales, con estratificación débil, mostrando mayor dilución del flujo; mientras que las facies de canal son generalmente bimodales clastosoportadas con clastos de grava y bolones rodeados por una matriz limoarenosa. Las facies de inundación, tienen superficies planas y potencias entre 5 y 8 m, con arenas, gravas, bolones o bloques flotando (Naranjo y Moreno, 2005).

El material constituyente de esta unidad proviene de los depósitos morrénicos removidos de zonas con pendiente pronunciada y también de los productos generados durante la erupción que los causa (Naranjo y Moreno, 2005).

2.2.10. Depósitos Aterrazados Poligénicos (Htp) Holoceno tardío-Histórico

Comprenden depósitos aluviales de arenas, gravas y limos que rellenan los grandes valles, cuyos afloramientos son reconocidos al N, en el valle del río Cautín y, al S en las terrazas del río Allipén. El encajonamiento de los causes activos de inundación de estos ríos, dio origen a las terrazas que han sido cubiertas por material erosionado de flujos laháricos y aluviales previamente depositados, debido a la acción de lluvias torrenciales (Naranjo y Moreno, 2005).

Estos depósitos tienen características intermedias entre depósitos de flujos de detritos y aluviales; existen masivos, pero también con estratificación (hasta 1 m) definida por intercalación de gravas y bolones con arenas limosas. Durante las erupciones asociadas al desarrollo de la unidad Llaima Cono Principal, ocurrieron remociones de depósitos laháricos que dieron origen a la mayor acumulación de los Depósitos Aterrazados Poligénicos (Naranjo y Moreno, 2005).

2.2.11. Depósitos Coluviales y Abanicos Aluviales (Hca) Holoceno

Constituido por gravas y bloques clastosoportados, con mala selección, generados por el colapso gravitacional de taludes afectados por lluvias torrenciales. Estos depósitos se distribuyen sobre los faldeos del volcán Llaima, en un área reducida en forma de abanicos, formados por la remoción de depósitos piroclásticos y morrénicos, ocasionalmente mezclados con taludes rocosos del basamento (Naranjo y Moreno, 2005).

2.2.12. Depósitos Fluviales Actuales (Hf) Holoceno

Esta unidad está formada por los depósitos de gravas, bolones y arenas acumulados en las terrazas de inundación de los lechos de los ríos y esteros activos, trenzados y a veces efímeros. Los depósitos poseen carácter polilitológico, con un predominio de rodados volcánicos, principalmente

si su origen está asociado a los afluentes que drenan depósitos laháricos y piroclásticos del volcán Llaima (Naranjo y Moreno, 2005).

2.2.13. Estructuras

2.2.13.1. Sistema De Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO)

Se reconoce un lineamiento de orientación NNE al E del volcán Llaima (Figura 2.1) y a lo largo del río Trifultruful, que corresponde a una de las ramas del Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (Hervé, 1976). Este es el primer rasgo estructural del basamento, manteniendo su tendencia regional NNE con más de 1.000 km de longitud a lo largo de la Zona Volcánica Sur (ZVS), y se manifiesta en zonas de cizalle dúctil y fallas frágiles de tendencia NS (López *et al.*, 1995 b, en Naranjo y Moreno, 2005). En la ZVS, el Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui acomoda la deformación tectónica causada por la convergencia oblicua (22-30° NE) de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, generando transpresión y una configuración de extensión de arco-ortogonal que controla la migración de magma en la región (Schonwalder-Angel *et al.*, 2018).

El emplazamiento de edificios volcánicos neógenos tardíos como el volcán Llaima, pudo haber sido controlado por una reactivación pleistocena de la SFLO (Lavenu y Cembrano, 1999). Igualmente, el volcán Peñón presenta características similares en sus productos eruptivos y, sumado a su cercanía con esta falla, permiten inferir que su emplazamiento también estuvo controlado por alguna estructura asociada al Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (Naranjo y Moreno, 2005). La traza de falla de este sistema se reconoce claramente al E del volcán Llaima por la alineación del río Trifultruful y la pendiente (~200 m de altura) entre las granodioritas del Mioceno del Grupo Plutónico Melipeuco y el valle Trifultruful, siguiendo su traza incluso más allá del lago Conguillío hacia el S del edificio volcánico (Schonwalder-Angel *et al.*, 2018).

La cinemática del SFLO es el resultado de una combinación de deslizamiento y acortamiento dextrales a través del arco, donde el esfuerzo de compresión máximo (σ_1) es NE, mientras que el esfuerzo de compresión mínimo (σ_3) es principalmente sub-horizontal y NW (Cembrano y Lara, 2009).

Schonwalder-Angel *et al.* (2018) señalan que la tectónica local y regional promueve el desarrollo de conos de escoria monogenéticos en los alrededores del volcán Llaima. La ocurrencia de estos conos hacia el flanco NE del volcán se debe a que sus diques alimentadores están controlados por el estrés regional, emplazándose de forma paralela al σ_1 regional, y perpendicular al eje de extensión de la corteza local. Mientras que los conos ubicados al NW y SW se deben a que el emplazamiento de diques está controlado principalmente por el estrés ejercido por la carga del edificio volcánico, donde el estrés compresional dificulta el ascenso del magma, permitiendo el fraccionamiento y la acumulación de una sobrepresión en volátiles. La falta de conos de escoria hacia el flanco SE del volcán se atribuye al estrés local de compresión horizontal causado por la deformación tectónica local asociada a la zona de falla Liquiñe-Ofqui, razón por la cual se obstruye el emplazamiento de diques verticales.



3. ESTRATIGRAFÍA IGNIMBRITA CURACAUTÍN

3.1. GENERALIDADES

La Ignimbrita Curacautín está conformada por dos unidades; Curacautín 1 (C1) correspondiente a la parte inferior y Curacautín 2 (C2) como la parte superior. Según Lohmar (2008), ambas tienen un rango composicional similar (51-58% SiO₂). En la figura 3.1 se muestran los afloramientos visitados de estas unidades, los cuales presentan una tendencia a cubrir los valles radialmente como un manto en torno el centro eruptivo y se disponen cubriendo la topografía preexistente. Los depósitos son no soldados y, en su gran mayoría, medianamente consolidados, presentando retrabajo aluvial hacia techo.

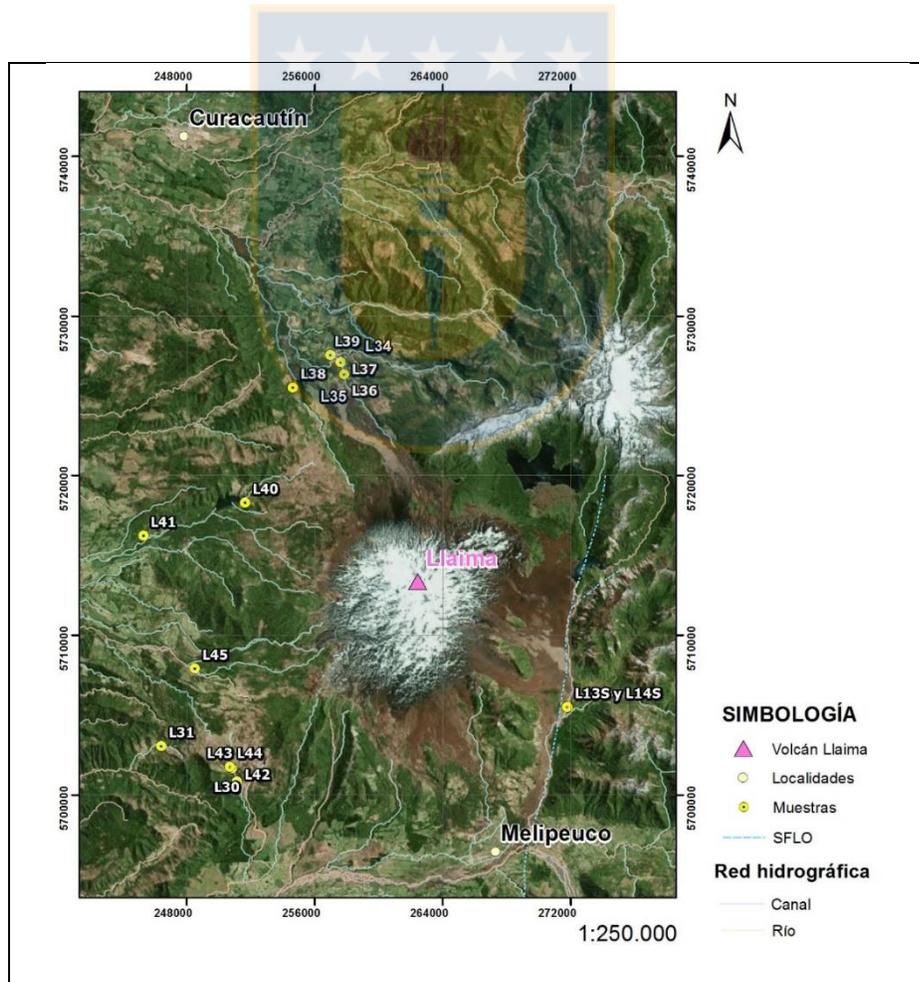


Figura 3.1: Mapa área de estudio. Ubicación de las muestras obtenidas en la campaña de terreno del 2019. Coordenadas geográficas en UTM dentro del huso 19S en sistema WGS84.

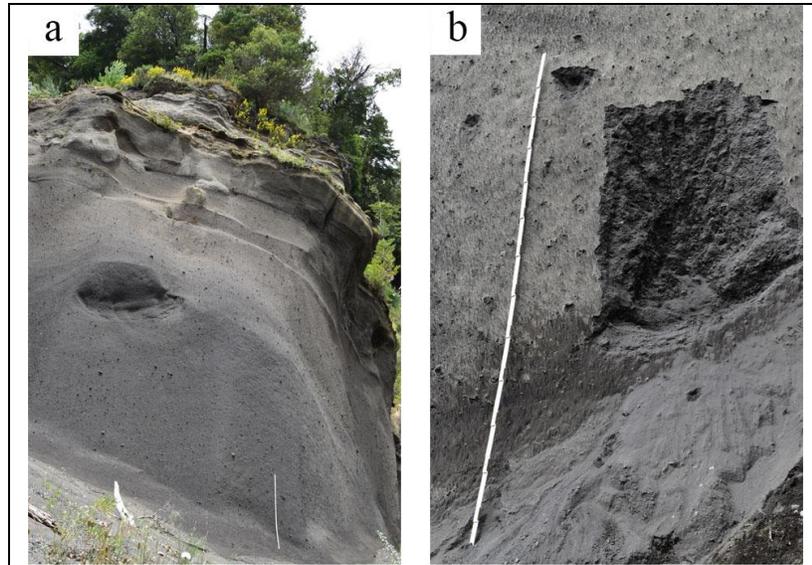
Con la idea de tener una mejor referencia respecto a las unidades de la ignimbrita, en la tabla 3.1 se resumen los puntos visitados con sus respectivas coordenadas y distancia al volcán.

Tabla 3.1: Muestras de los depósitos visitados de la Ignimbrita Curacautín.

Muestra	Unidad	Coordenadas	Distancia del volcán (km)	Sector
L13S	C1	19H 0271804 5705515	12,20	E
L14S	C1	19H 0271804 5705515	12,20	E
L30	C2	19H 0250840 5701665	16,53	W
L31	C2	19H 0246420 5703080	19,10	W
L40	C1	19H 0251676 5718323	11,88	W
L41	C2	19H 0245296 5716247	17,36	W
L42	C2	19H 0251158 5700831	16,93	W
L43	C2	19H 0250698 5701758	16,57	W
L44	C2	19H 0250698 5701758	16,57	W
L45	C2	19H 0248529 5707924	15,01	W
L34	C2	19H 0257641 5727122	14,55	N
L35	C1	19H 0257848 5726337	13,74	N
L36	C1	19H 0257848 5726337	13,74	N
L37	C1	19H 0257848 5726337	13,74	N
L38	C1	19H 0254662 5725503	14,38	N
L39	C1	19H 0256997 5727546	15,14	N

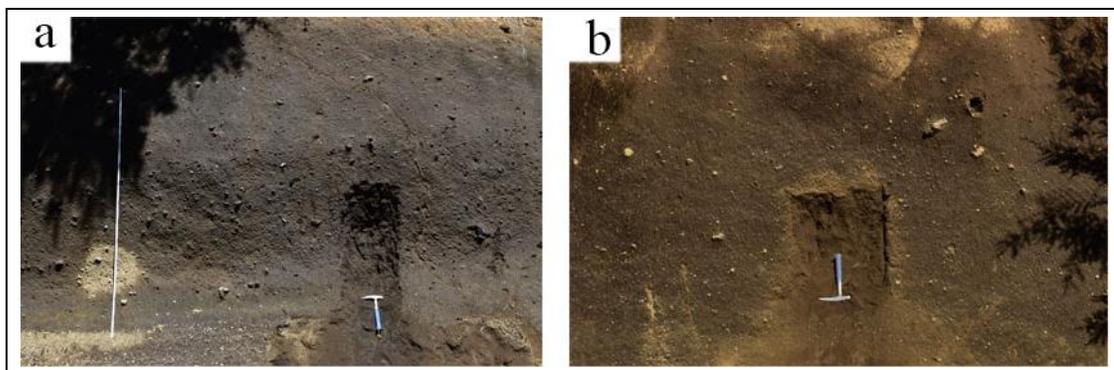
En el Anexo 2 se detalla la descripción de las columnas estratigráficas por tramo junto con las fotografías en mayor tamaño. A continuación, se mencionan las diferencias texturales utilizadas para distinguir entre Curacautín 1 y 2 en terreno:

Curacautín 1 (Fotografía 3.1) es de color gris oscuro y no exhibe ningún tipo de gradación en el tamaño de grano, es un depósito matriz soportado que presenta entre un 85% y un 90% de matriz tamaño ceniza, compuesta principalmente de fragmentos juveniles y escasos líticos (rocas volcánicas andesita-basálticas y granitoides). Los fragmentos mayores en su mayoría son tamaño lapilli medio a grueso, con moda lapilli grueso y con algunos escasos tamaño bloque. Sus partículas tienen esfericidad baja a moderada y un bajo grado de compactación. El detalle de los componentes se presentará más adelante en la sección 4.3. En algunos casos, esta unidad exhibe un cambio de color de gris oscuro a café claro (Fotografía 3.1a) que a su vez está correlacionado con una transición desde capas masivas a difusamente estratificadas acompañada de un aumento en el porcentaje de bombas escoriáceas de hasta ~20 cm.



Fotografía 3.1: Afloramiento de la Ignimbrita Curacautín al sector E del volcán Llaima. a) Se observa cambio paulatino de color desde base a techo. b) Superficie fresca del afloramiento. Detalle toma de muestra L13S. Escala de 2 m en ambas fotografías.

En contraste, Curacautín 2 (Fotografía 3.2) tiene una coloración parduzca y es parcialmente consolidado, es decir, los sedimentos han sido compactados y cementados hasta el punto de convertirse en un depósito relativamente sólido. Es matriz soportado con ceniza gruesa a lapilli medio, de pobre selección y disgregable. Sus piroclastos son irregulares y finamente vesiculados, con un mayor grado de esfericidad y redondez. Sus partículas son más livianas y presentan un alto porcentaje de vesículas a simple vista, por lo tanto, son menos densos que los depósitos de Curacautín 1. La presencia de bloques es más recurrente y tiene una mayor concentración de líticos hacia techo.



Fotografía 3.2: Afloramientos de la Ignimbrita Curacautín al sector W del volcán Llaima. Depósitos de color parduzco. a) y b) corresponden a la toma de muestra L30 y L31 respectivamente. Escala de 2 m en la fotografía de a).

Una de las características que destaca a C2 es la abundante presencia de material carbonoso, incluso se encontraron algunos especímenes de más de 20 cm en depósitos masivos del flanco W del edificio volcánico (Fotografía 3.3). Existe una capa delgada de limo y arcilla que divide a Curacautín 2 en 3 subunidades, sin embargo, estas capas sólo se reconocen en el flanco E del volcán.



Fotografía 3.3: Carbón en el sector W del volcán Llaima. Escala de 10 cm en la fotografía.

No fue posible identificar en este trabajo ni en anteriores como el de Naranjo y Moreno (1991) depósitos de caída o de brecha. Además, no se observó ningún contacto dentro de la secuencia de C1.

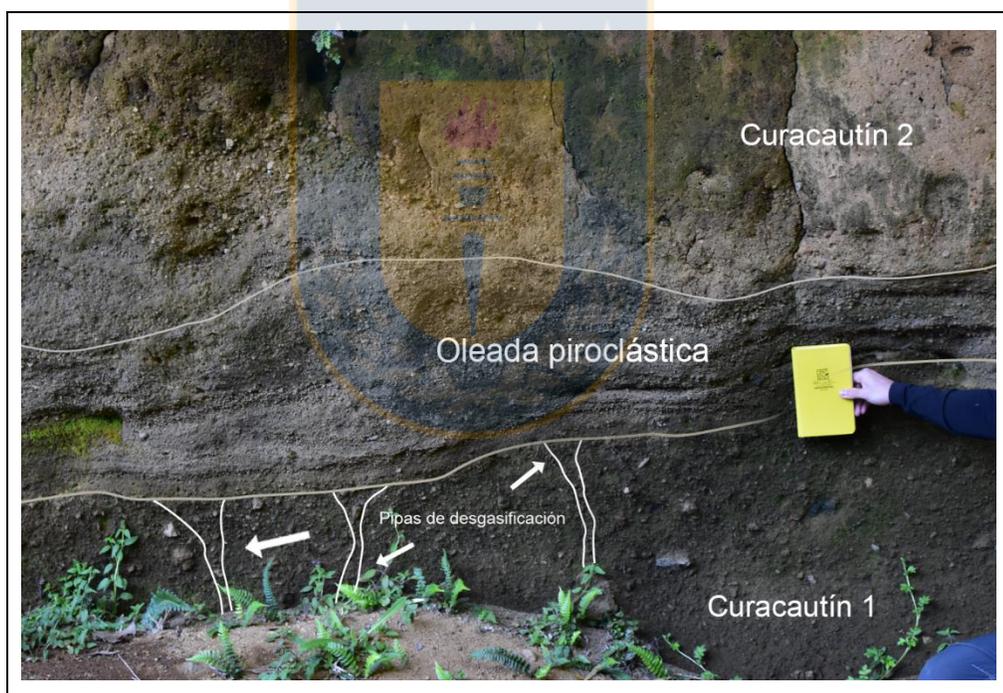
Las dataciones de radiocarbono obtenidas en este trabajo se calibraron (corrección de la concentración de carbono atmosférico) mediante el software *OxCal 4.3* (Bronk Ramsey, 2017) de la curva atmosférica del hemisferio sur, llamada SHCall13 (Hogg *et al.*, 2013). Los respectivos análisis fueron realizados por *National Isotope Centre*, GNS Science en Nueva Zelanda.

3.2. UNIDAD INFERIOR CURACAUTÍN 1

La unidad inferior de la Ignimbrita Curacautín, denominada Curacautín 1 (C1) tiene un espesor de 12 m y se encuentra ampliamente distribuida alrededor del volcán. Es un depósito mayormente

masivo, constituido principalmente por escorias y cenizas, con bombas escoriáceas de tamaño cercano a 20 cm. En menor proporción, presenta fragmentos líticos inmersos en abundante matriz de ceniza fina y a menudo endurecida. Dentro de estos fragmentos líticos destacan rocas volcánicas andesita-basálticas y granitoides. Sus afloramientos son matriz soportados y varían desde masivas hasta difusamente estratificadas. A grandes rasgos, los componentes de C1 en todas las localidades estudiadas incluyen en diferentes proporciones a piroclastos juveniles y líticos accidentales, principalmente clastos de granodiorita, clastos alterados hidrotermalmente y clastos máficos.

A C1 le sobryace un depósito de oleada piroclástica (con un bajo contenido en partículas sólidas y gran variedad de estructuras sedimentarias). Además, se exhiben estructuras “pipes” o pipas por desgasificación en el contacto con la oleada (Fotografía 3.4).



Fotografía 3.4: Oleada piroclástica con estratificación paralela entre C1 y C2. Depósito en los alrededores de la laguna Quepe.

En terreno, Curacautín 1 puede presentar un cambio de color desde gris oscuro a café claro, que está correlacionada a su vez, con una transición desde capas masivas a difusamente estratificadas. Los depósitos de C1 visitados durante este trabajo se detallan a continuación:

En el sector E del volcán, C1 aflora con cerca de 12 m de espesor (Figura 3.2). La principal característica es su abundante material juvenil y el cambio de color mencionado anteriormente. Se presenta de forma masiva y con la ausencia de estructuras sedimentarias.

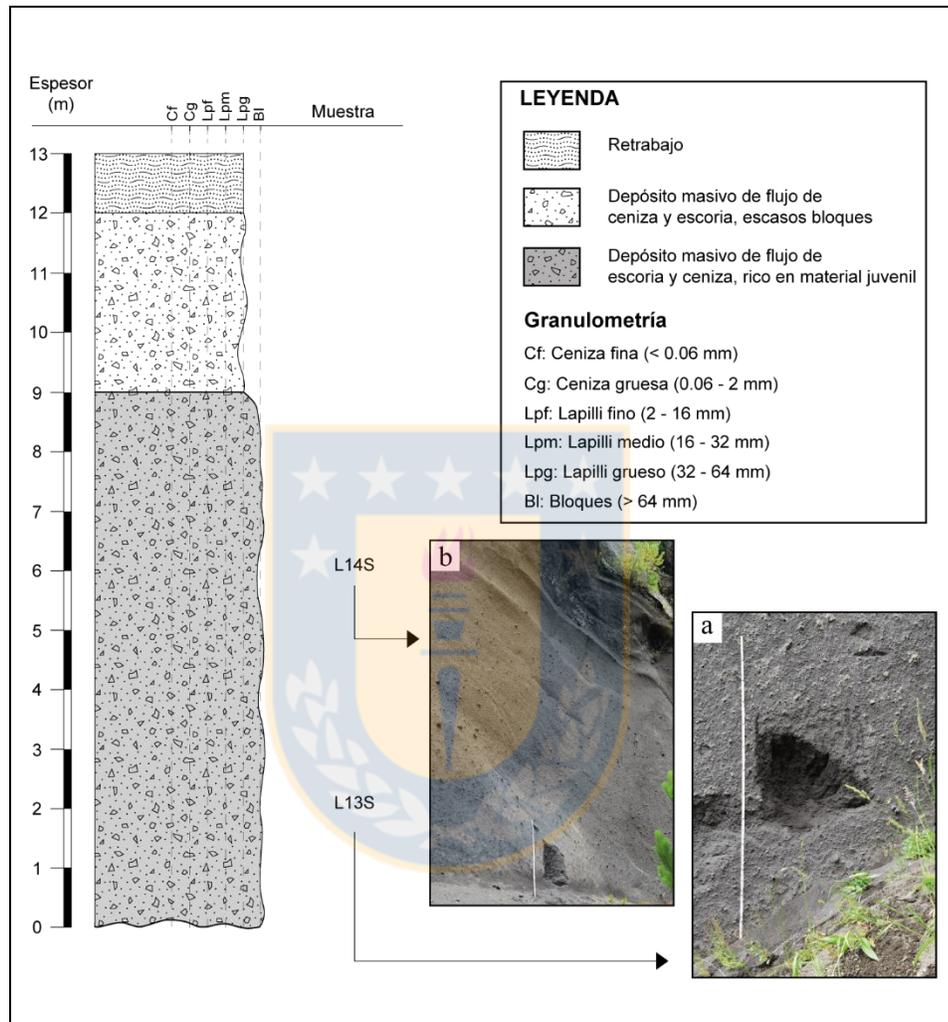


Figura 3.2: Columna L13S y L14S de Curacautín 1 al sector E del volcán Llaima. a) Toma de muestra L13S, parte inferior color gris oscuro. b) Toma de muestra L14S, parte superior color café claro. Escala de 2 m en las fotografías.

Hacia el N en cambio, Curacautín 1 aflora en 3 lugares diferentes. En la figura 3.3 se observa el mayor espesor expuesto de C1 cercano a los 11 m, cuya particularidad es la presencia de varios lentes de bloques de diferentes tamaños. Los bloques de mayor granulometría, cercanos a los 20 cm, se ubican a unos 6 m en C1, y luego reaparecen en menor tamaño hacia los 9 m, justo en el momento en que el depósito presenta una estratificación difusa. No se tuvo acceso al contacto entre la estratificación difusa y la capa masiva sobreyacente.

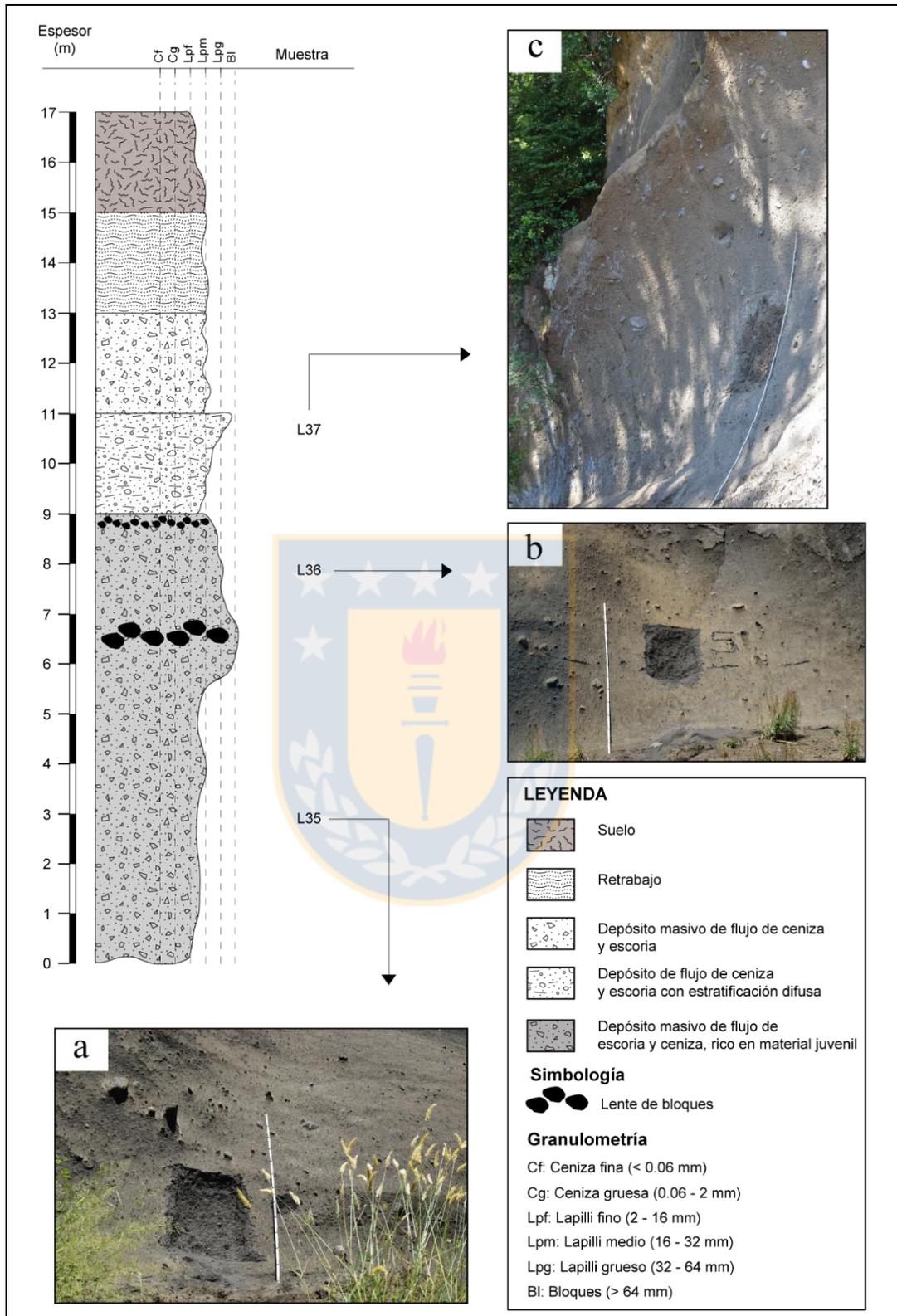


Figura 3.3: Columna L35/L36/L37 de Curacautín 1 al sector N del volcán Llaima. a) Toma de muestra L35, parte inferior color gris oscuro, rico en material juvenil. b) Toma de muestra L36, parte superior color café claro, por sobre bloques de gran tamaño. c) Toma de muestra L37, en depósito con estratificación difusa. Escala de 2 m en las fotografías.

Luego, le siguen espesores de menos de 3 m, representados en las figuras 3.4 y 3.5. La presencia de bloques, pero esta vez de forma esporádica, se reconoce sólo en la figura 3.4 cuyos tamaños siguen siendo sobre los 20 cm. En este lugar no hay indicios de retrabajo, a excepción de más hacia el W del afloramiento, pero sin aseverar que en este caso si exista algún contacto con C1. El depósito es matriz soportado con clastos félsicos y tamaño de material desde ceniza fina a lapilli grueso, con moda de lapilli grueso. La redondez es baja con partículas angulares a subangulares y esfericidad baja a moderada. En general, el depósito cuenta con un bajo grado de compactación.

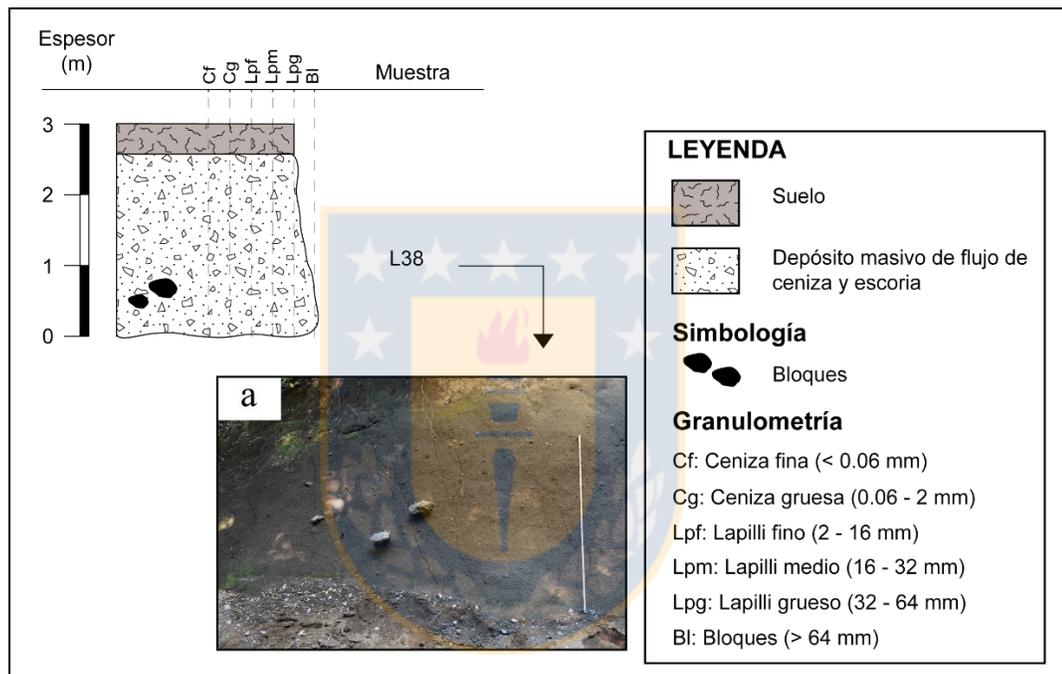


Figura 3.4: Columna L38 de Curacautín 1 al sector N del volcán Llaima. a) Toma de muestra L38. Escala de 2 m en la fotografía.

Por su parte, el depósito masivo de flujo de escoria y ceniza, rico en material juvenil de la figura 3.5 que aflora en un corte de camino, se encuentra cubierto por una abundante capa de retrabajo cercana a los 12 m de espesor (los depósitos retrabajados son descritos a detalle en la sección 3.4). Sin embargo, C1 cuenta con casi 2 metros de exposición, reconocida por su abundante porcentaje de partículas juveniles, ubicada en la base del afloramiento. En este lugar no fue posible observar la presencia de lentes de bloques, pero sí se reconocieron algunos bloques aislados de menos de 12 cm. El depósito tiene un mayor grado de compactación, es matriz soportado de ceniza fina a lapilli grueso con media de lapilli fino, tiene líticos félsicos cercanos a los 5 cm (granodiorita típica de C1). No se ve contacto ni estructuras sedimentarias.

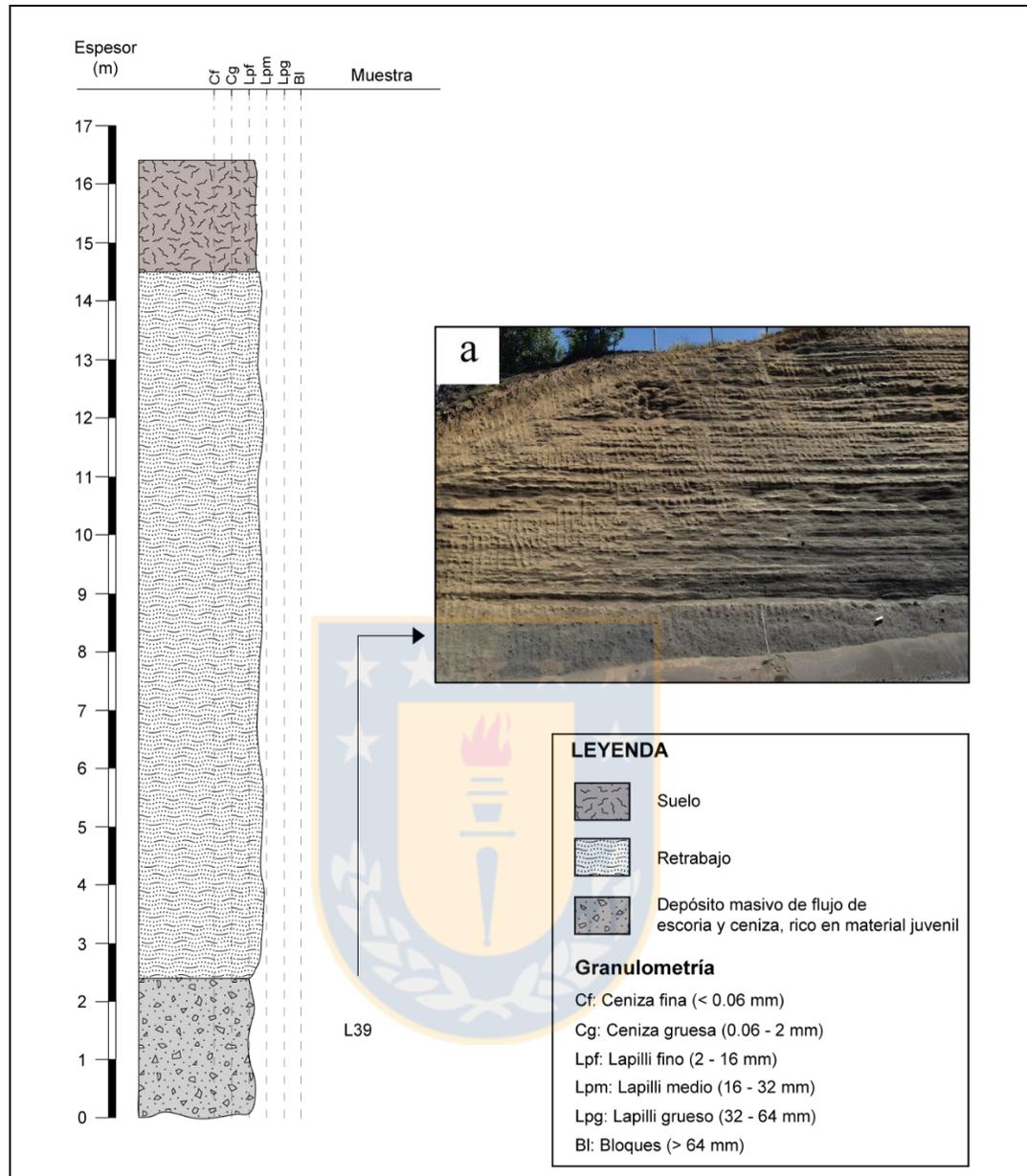


Figura 3.5: Columna L39 de Curacautín 1 al sector N del volcán Llaima. a) Toma de muestra L39, depósito cubierto por una amplia capa de retrabajo. Escala de 2 m en la fotografía.

Hacia el sector W del volcán Llaima, C1 solo se observó en un afloramiento ubicado en las cercanías de la laguna Quepe (Figura 3.6). Naranjo y Moreno (1991) mencionan que C1 exhibe su espesor máximo de 50 m en este lugar, sin embargo, en terreno sólo se encontraron afloramientos de Curacautín 1 con espesores menores a 5 m. El depósito de C1 estudiado en este sector es matriz soportado con un grado mayor de compactación (indurado), la matriz es de ceniza fina a lapilli medio y grueso, cuya moda en el tamaño de sus partículas es de lapilli medio. Los piroclastos son angulares a subangulares con esfericidad moderada. El porcentaje de líticos de tamaño bloque no

parece seguir una tendencia decreciente hacia techo, los cuales tienen un tamaño máximo de 10 cm. La parte superior del depósito es cubierta por el suelo.

En la fotografía b) de la figura 3.6 se muestra un pulso diferente de oleada luego del evento principal que separa a la unidad inferior (C1) con la unidad superior (C2) de la Ignimbrita Curacautín. Este depósito piroclástico con estratificación cruzada y paralela es indicativo de la transición hacia C2. Además, la presencia de pipas de desgasificación en la parte masiva que terminan abruptamente en el contacto con los depósitos de oleadas, indican que se trata de una unidad de flujo diferente.

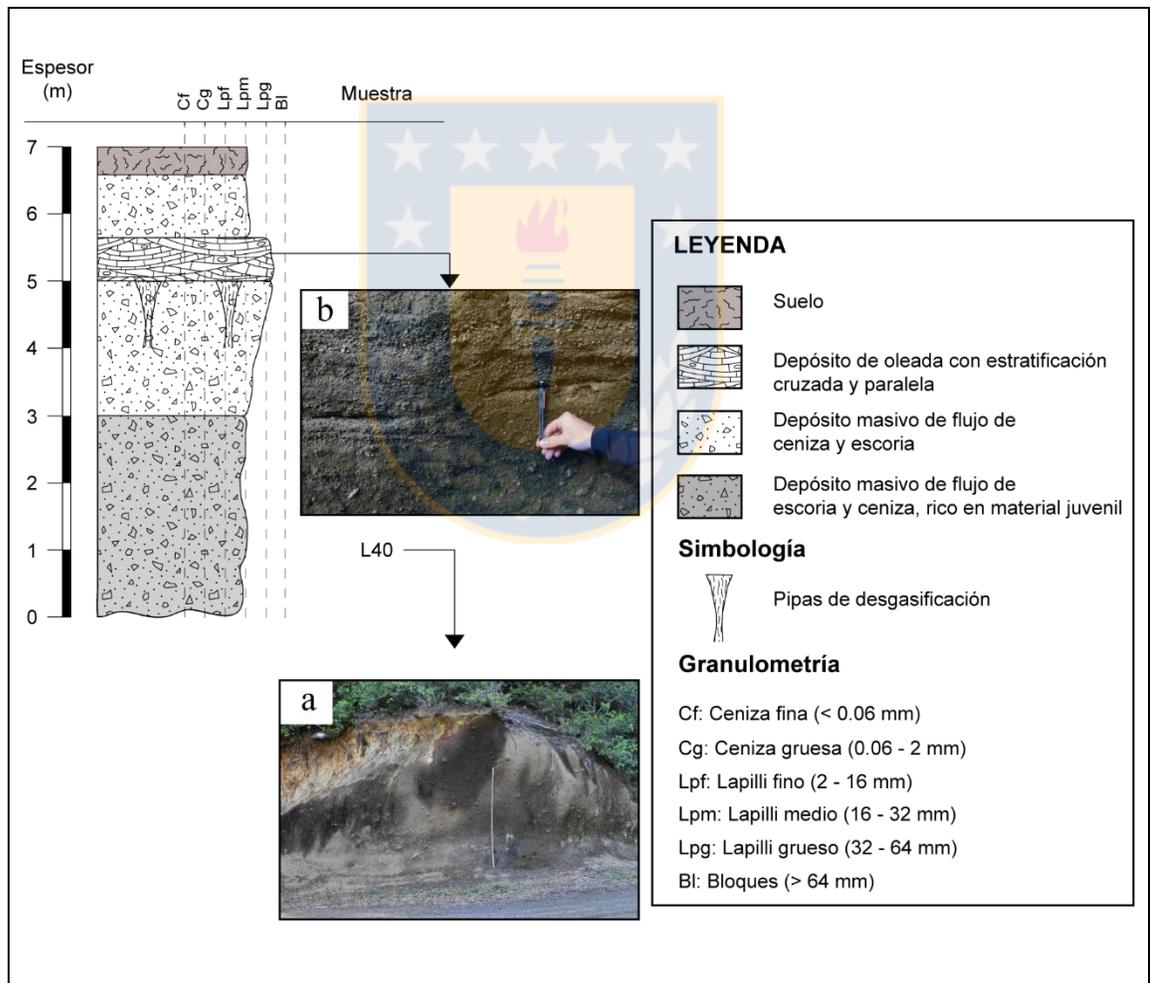


Figura 3.6: Columna L40 de Curacautín 1 al sector W del volcán Llaima. a) Toma de muestra L40, se reconoce depósito piroclástico en contacto con C1. Escala de 2 m en la fotografía. b) Depósito piroclástico que representa un pulso diferente de C1.

3.3. UNIDAD SUPERIOR CURACAUTÍN 2

La unidad superior de la Ignimbrita Curacautín, denominada Curacautín 2 (C2) preserva sus depósitos con predominancia hacia el sector W del volcán Llaima. A su vez, el grado de alteración de las partículas aumenta en esta dirección. La alteración se reconoce en terreno a simple vista por una coloración parduzca y sus partículas exhiben un alto grado de redondez y esfericidad, son muy disgregables y están recubiertas por una abundante capa de limo y arcilla, los clastos son más livianos debido a un mayor porcentaje de vesículas y el depósito en general es poco consolidado. Los depósitos de C2 son matriz soportados, parcialmente consolidados, con diferentes grados de alteración y comprenden una fracción de ceniza mayoritaria, además de lapilli fino que muestra un color pardo característico. Sus espesores máximos expuestos son de hasta 6 m.

Los fragmentos carbonizados de ramas y troncos, localmente predominan en la unidad superior de la Ignimbrita Curacautín. En este trabajo se realizaron 4 dataciones de C2. En la mayoría de los afloramientos, la ignimbrita está cubierta por un depósito de material volcanoclástico re TRABAJADO que está compuesto por piroclastos de la misma ignimbrita, sugiriendo que su formación se debe a la erosión de ésta.

La unidad superior (C2) es separada de C1 mediante 10-30 cm de arena y grava fluvial con una diferencia de edad ^{14}C de ~800 años (Lohmar, 2008). C2 está conformada por 3 subunidades (C2a, C2b y C2c), y cada una de ellas está separada por una débil capa de limo y arcilla de 1 a 5 cm de espesor que sugiere una pausa en la actividad eruptiva. Estas 3 subunidades son matriz soportada, pobremente seleccionada, con espesores de 2 a 2,5 m y compuestas por ceniza gruesa a lapilli medio con una variabilidad en el porcentaje de bloques. Al igual que Curacautín 1, los piroclastos de C2 tienen forma irregular y son finamente vesiculados (ver descripción detallada en Anexo 1).

Durante la campaña de terreno, las 3 subunidades de C2 fueron reconocidas en una sola localidad hacia el lado E del volcán, siguiendo el río Allipén dentro del Parque Nacional Conguillío. En este lugar se levantó una columna estratigráfica descriptiva (Figura 3.7), la cual tiene como base a la subunidad C2a (tramo 0 a 3 m) de color gris oscuro en superficie alterada y color negro en su cara fresca, matriz soportada, disgregable y masiva. Tiene clastos de granodiorita y otros líticos, es de

mala selección con tamaño ceniza fina hasta bloques que en promedio son cercanos a los 6 cm, sus partículas tienen poca esfericidad y los clastos son subangulosos a subredondeados.

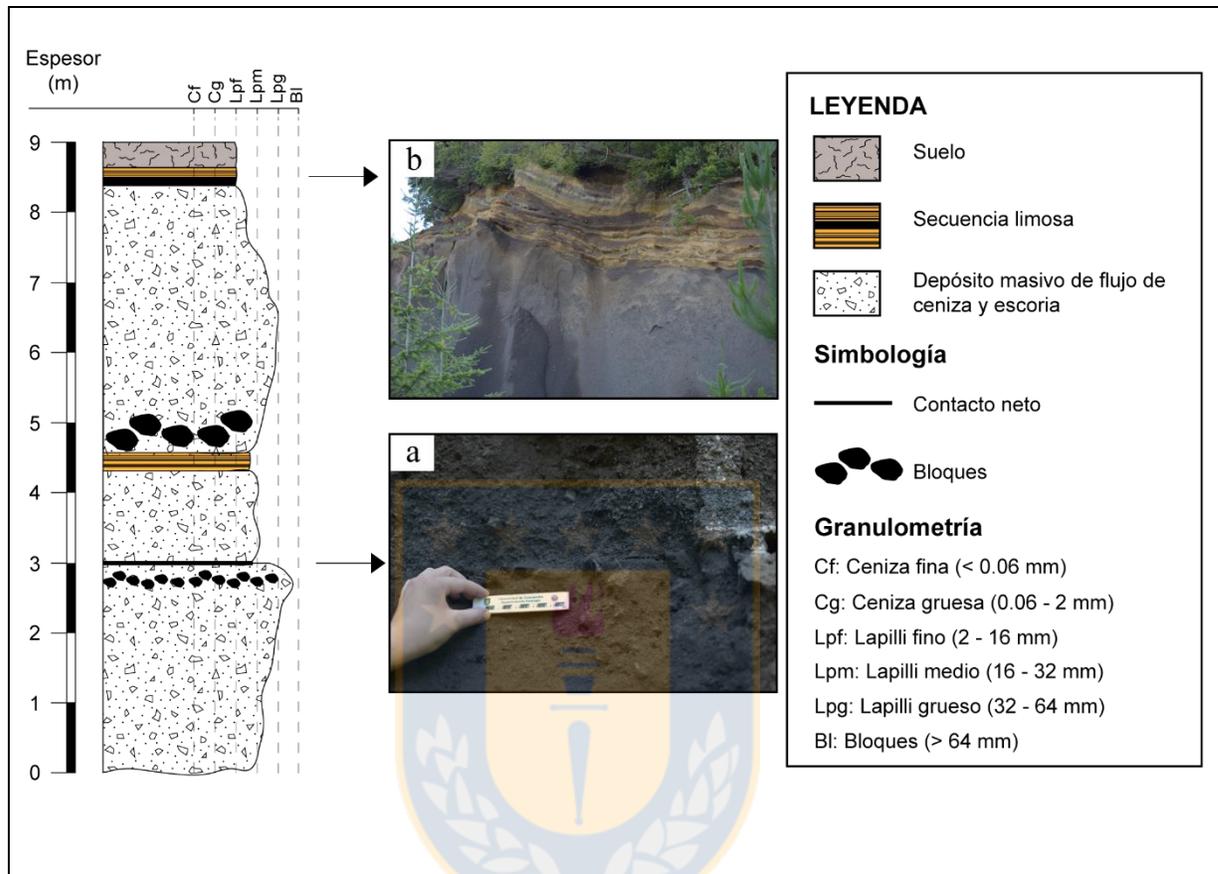


Figura 3.7: Columna de Curacautín 2 al sector E del volcán Llaima. a) Fotografía del contacto neto concordante entre C2a y C2b. Escala de 10 cm en la fotografía. b) Parte superior del depósito que exhibe la secuencia de retrabajo limosa que separa las subunidades C2b y C2c. Zona 19H coordenada 0271717 E y coordenada 5705328 S.

Hacia techo, cercano a los 3 m desde la base del afloramiento (Figura 3.7), se observa un contacto, neto y concordante, que separa a las subunidades C2a y C2b. La parte inferior de C2b, el depósito es bien seleccionado y a medida que se asciende estratigráficamente la selección disminuye (Fotografía 3.5). En el contacto hay un porcentaje de bloques importante, pero son de menor tamaño que el contacto entre C2b y C2c. Esto da la impresión de que sea más “clasto soportada”.



Fotografía 3.5: Contacto entre C2a y C2b. Cambio de granulometría, la base es bien seleccionada y hacia arriba la selección disminuye. Escala de 10 cm en la fotografía.

Luego del contacto queda expuesta la subunidad C2b con un espesor de 1,30 m. Esta subunidad es matriz soportada con ceniza fina a gruesa y una moda de lapilli medio, con mediana selección y piroclastos de escorias subangulosos hacia techo, donde disminuye el porcentaje de los mismos, formando una capa de 4 a 5 cm de ceniza fina. En general, Curacautín 2b es de granulometría más fina y, por lo tanto, podría acumular menos precipitación atmosférica, permitiendo que sea más competente que la parte inferior del depósito. Hacia techo, se encuentra una secuencia de retrabajo limoso que la separan de C2c.

Esta última subunidad con cerca de 4 m de espesor, corresponde al techo de la secuencia completa de Curacautín 2, se destaca por tener en su base un aumento en el porcentaje de bloques. Estos, a diferencia de los exhibidos en la parte inferior, tienen un tamaño mayor, superando los 10 cm (Fotografía 3.6). El depósito mantiene sus características anteriores; matriz soportada, mala selección, partículas juveniles subangulosas y con esfericidad moderada a baja, que van desde ceniza gruesa a fina hasta lapilli grueso, con media de lapilli fino.



Fotografía 3.6: Bloques escoriáceos en la base de Curacautín 2c.
Aumento del tamaño y porcentaje de bloques en la base de la secuencia. Escala de 10 cm en la fotografía.

C2 aflora de forma incompleta en otras localidades alrededor del volcán. En el sector N fue reconocida en un solo lugar (Figura 3.8), donde al igual que en el lado E, el depósito presenta una mayor abundancia de bloques y un aumento de su granulometría en general, con una media de lapilli grueso. No se reconoce laminación ni gradación del tamaño de grano, sus partículas juveniles son de color gris oscuro con material accidental de líticos con coloración más clara. Los clastos en general son angulares a subangulares de esfericidad baja a media. El depósito es matriz soportado, exhibiendo más concentración de líticos hacia techo.

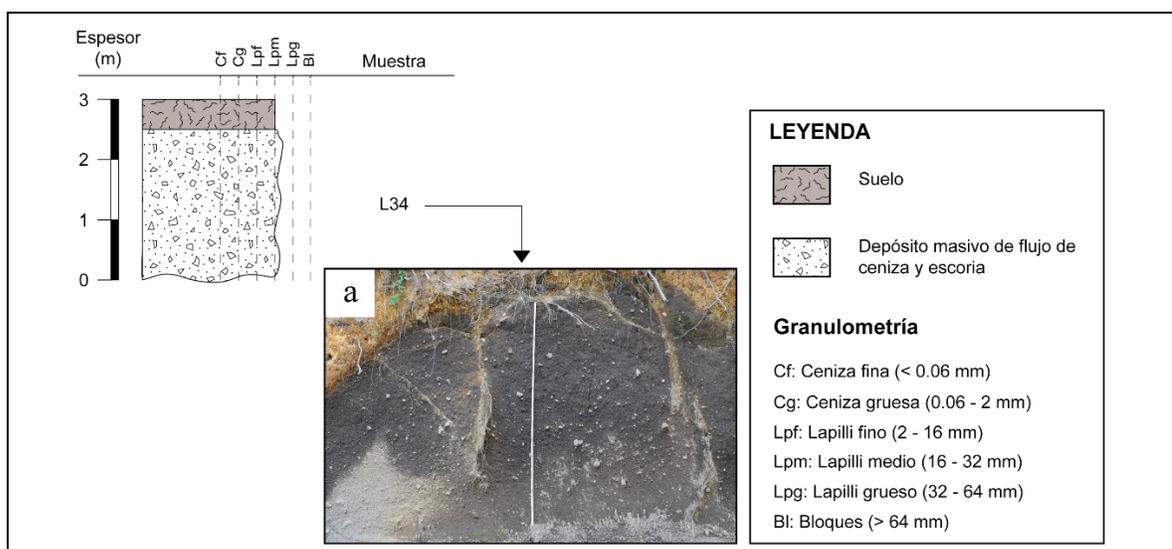


Figura 3.8: Columna L34 de Curacautín 2 al sector N del volcán Llama. a) Toma de muestra L34, exhibe raíces a lo largo de todo el depósito. Escala de 2 m en la fotografía.

La mayor presencia de Curacautín 2 se encuentra en el lado W del volcán, específicamente hacia el SW. La presencia de carbón es muy recurrente en los depósitos de esta zona. Sin embargo, pese a ser reconocido en más localidades, no se pudo encontrar algún contacto entre las subunidades de C2, ni tampoco los depósitos piroclásticos de oleadas que son tan característicos de la unidad superior de la Ignimbrita Curacautín.

En la figura 3.9 se observa un afloramiento de Curacautín 2 que mantiene el mayor porcentaje de lapilli y bloques, pero con la particularidad de que se pueden ver a simple vista las vesículas en los fragmentos juveniles, por lo tanto, es menos densa que la ignimbrita presente en el lado E del Llaima. Estos fragmentos son angulares a subangulares, algunos tienen una coloración parduzca por sobre el color negro típico del material juvenil y, además, tiene partículas accidentales con bajo redondeamiento. El depósito cuenta con un espesor que rodea los 2 m, es matriz soportado y no se reconocen estructuras sedimentarias.

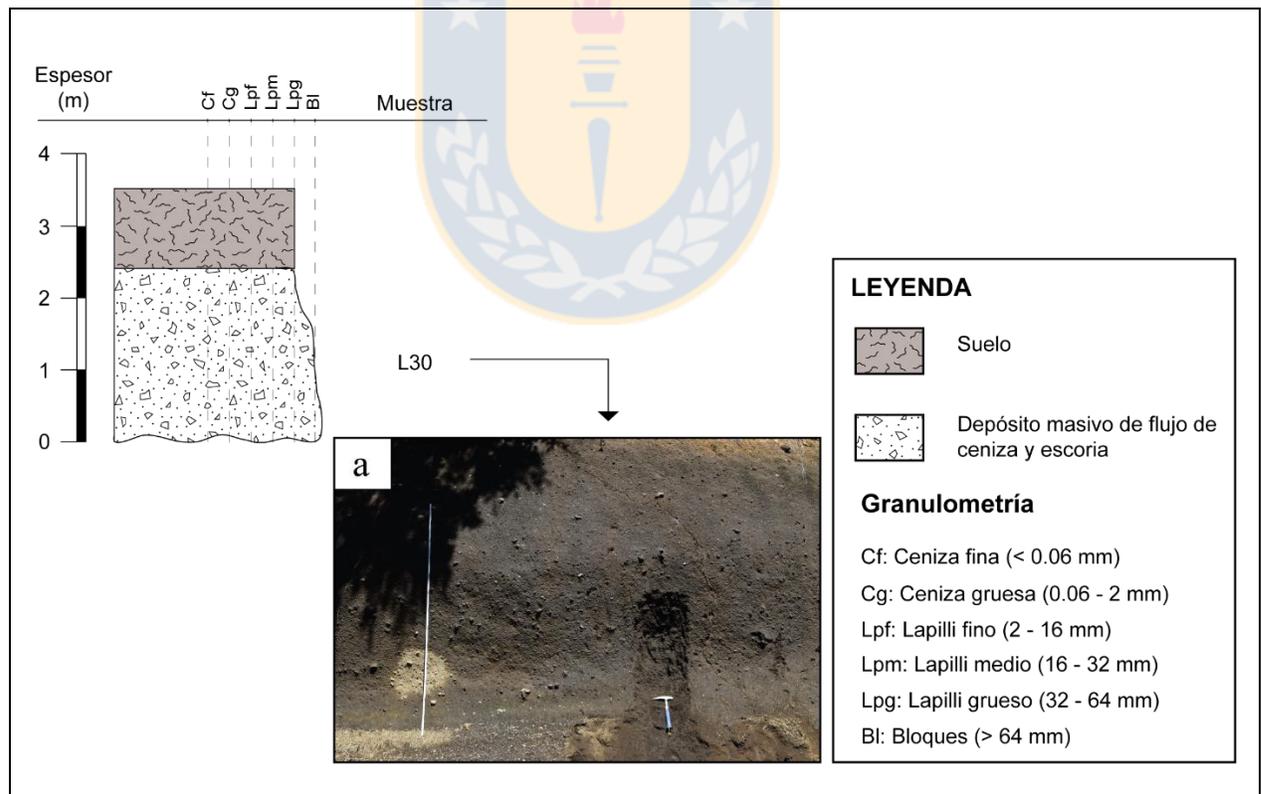


Figura 3.9: Columna L30 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima. a) Toma de muestra L30. Escala de 2 m en la fotografía.

Por otro lado, algunos depósitos sí presentan estratificación difusa, como en el caso de la figura 3.10, cuyo afloramiento de C2 incluye una capa estratificada cercana a 1 m de espesor por sobre un depósito masivo. En este lugar abundan restos de carbón, acotados a la capa masiva de ceniza y escoria (0 a 3 m en la columna L31 de la Figura 3.10) a partir de los cuales se obtuvo una datación de radiocarbono de 12.696 ± 56 años A.P. (no calibrada), rango que concuerda con las dataciones de Lohmar (2008) y Naranjo y Moreno (1991) para la unidad superior de la Ignimbrita Curacautín. Esta edad calibrada corresponde a 14.755-15.256 años A.P.

El nivel inferior es grano creciente hacia techo, con un tamaño de grano mayor que el nivel superior. Tiende a ser más grano soportado con una media de lapilli fino. Las partículas son más vesiculares, subangulosas a redondeadas y con esfericidad moderada. Pese a tener bloques, estos son menos frecuentes que en el afloramiento anterior (columna L30). Por su parte, El nivel superior del afloramiento tiene una medida de tamaño de grano de ceniza gruesa a lapilli grueso, con mala selección, disgregable y matriz soportado. Tiene un aumento del tamaño de grano hacia base con clastos más angulosos a subangulosos entre 0,5 a 10 cm. Se observan líticos vesiculares y en general es grano decreciente. Este depósito presenta una coloración parduzca, atribuida al alto grado de alteración que en su mayoría presenta C2 en el sector W del volcán.

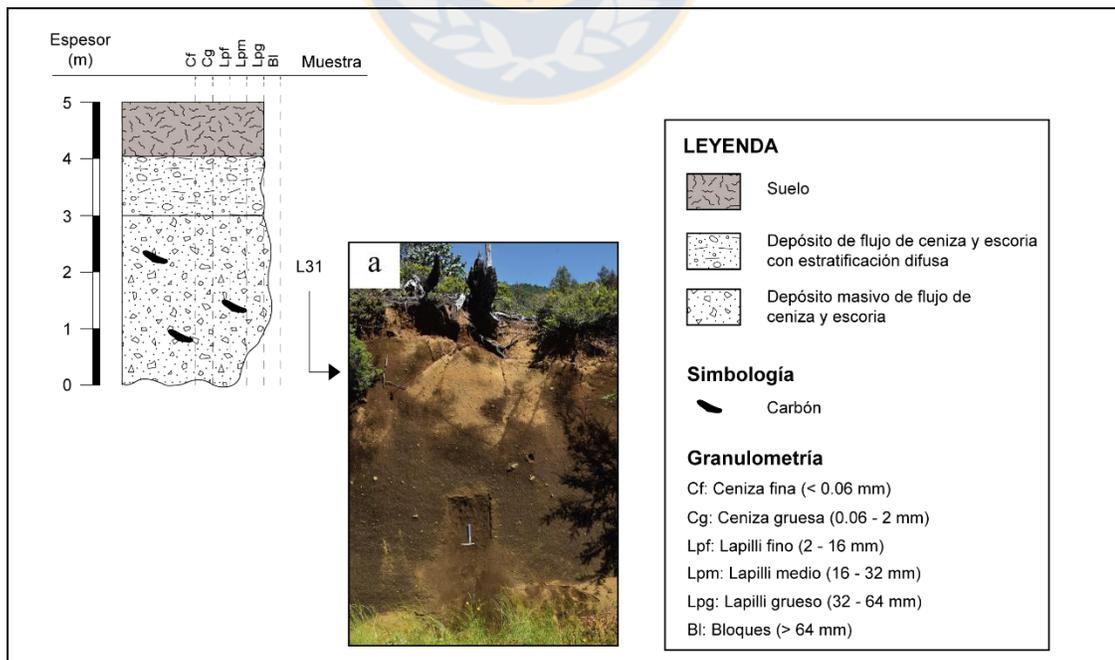


Figura 3.10: Columna L31 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima. a) Toma de muestra L31, fotografía no incluye capa estratificada. Escala de 34 cm (martillo geológico) en la fotografía.

Uno de los depósitos de Curacautín 2 que se encuentra cercano a la localidad de Santa María con dirección NW del volcán, exhibe unos escasos metros de espesor al costado de un camino de ripio (Figura 3.11). No presenta estructuras ni carbón, es cubierto por una capa delgada de retrabajo que en otros sectores del camino cubre por completo a la unidad.

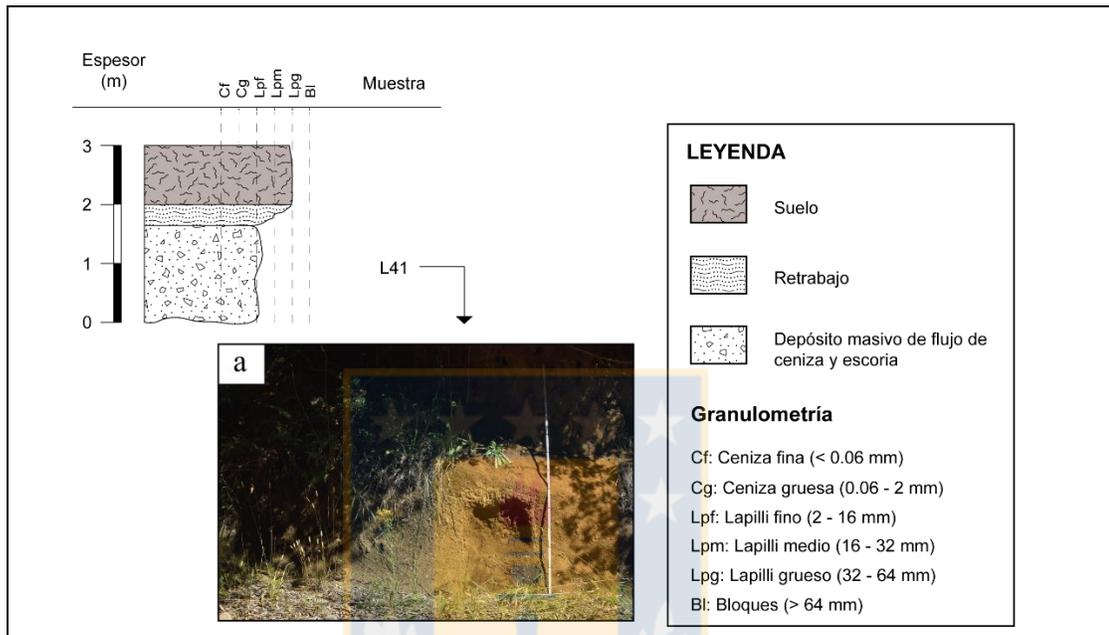


Figura 3.11: Columna L41 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima. a) Toma de muestra L41. Escala de 2 m en la fotografía.

El depósito tiene un alto grado de alteración con los tonos parduzcos típicos, sin embargo, cuenta con un alto porcentaje de material accidental. Los fragmentos juveniles predominan con abundante ceniza fina a gruesa, hasta lapilli fino, matriz soportado, disgregable y cubiertos por una capa de suelo que dificulta el reconocimiento de los componentes. Algunos clastos presentan inclusiones y xenocristales o cumulos cercanos a los 4 mm de largo.

Hacia el SW del volcán, C2 vuelve a exhibir abundante carbón y es posible reconocer capas con estratificación difusa. Este es el caso del depósito representado en la columna L42 (Figura 3.12), cuyo espesor de 6 m cuenta con un nivel masivo por sobre una capa con estratificación difusa. El depósito masivo presenta escasos bloques, en un porcentaje menos abundante que en los otros afloramientos, pero estos tienden a aumentar hacia techo. Al observar sus componentes no se puede definir si es grano creciente o decreciente, pero sí se reconoce una matriz con ceniza fina a lapilli fino y clastos angulares a subangulares, con una moda de tamaño de grano de lapilli medio. Es

matriz soportado con fragmentos juveniles de color gris oscuro y redondez media. Tiene un grado de compactación bajo (disgregable) y es mal seleccionado. Hacia techo, la unidad queda cubierta por una capa de retrabajo cercana a los 2 m de espesor.



Figura 3.12: Columna L42 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima. a) Toma de muestra L42, destaca la presencia de carbón y una capa con estratificación. Escala de 2 m en la fotografía.

En uno de los bloques de mayor tamaño de este depósito, se encontró una vesícula rellena de un material más félsico (Fotografía 3.7). Este hallazgo es importante porque podría ser evidencia de una mezcla de magmas. Fenómeno que ha sido mencionado antes por Lohmar (2008) para explicar las diferentes señales geoquímicas y petrológicas en desequilibrio mineral, que fueron documentadas en la unidad superior de la Ignimbrita Curacautín. Las dataciones para la capa masiva (1 a 6 m en la columna L42 de la Figura 3.12) resultó en una edad convencional de radiocarbono de 12.754 ± 56 años A.P., cuya edad calibrada se calculó en 14.865-15.335 años A.P.



Fotografía 3.7: Bloque de escoria con inclusión félsica. Mezcla de material de dos composiciones diferentes.

Siguiendo la ruta S-353 por el flanco SW del volcán, pero más hacia el N respecto del afloramiento anterior, se encuentra otro depósito de Curacautín 2 (Figura 3.13). Lo particular de este depósito es el evidente cambio de color justo a la mitad del perfil expuesto. Esta variación de tonalidades pardas claras y oscuras se conservan de igual forma en las superficies frescas del afloramiento, razón por la cual se decide establecer la existencia de una parte inferior y otra superior.

En ambas secciones se reconoce una abundante presencia de carbón, cuyas dataciones resultaron en edades convencionales de radiocarbono que van de 12.774 ± 57 años A.P. para la parte inferior (0 a 2 m en la columna L43/L44 de la Figura 3.13) y de 12.555 ± 55 años A.P en la parte superior (2 a 3 m en la columna L43/L44 de la Figura 3.13). Estas edades calibradas son 14.903-15.371 años A.P. y 14.326-15.090 años A.P. respectivamente, lo que concuerda con el rango de edades de Curacautín 2 mencionadas en trabajos anteriores.

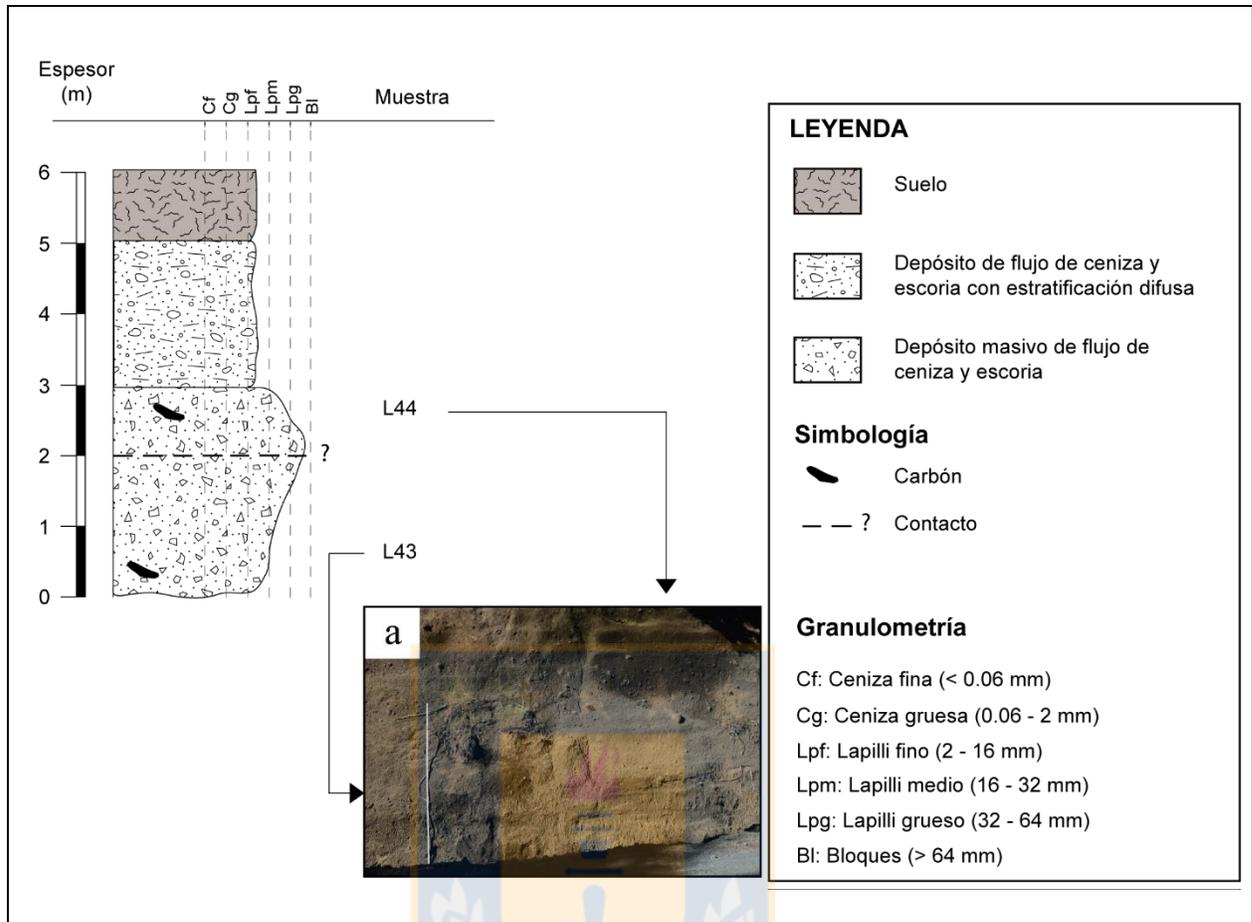
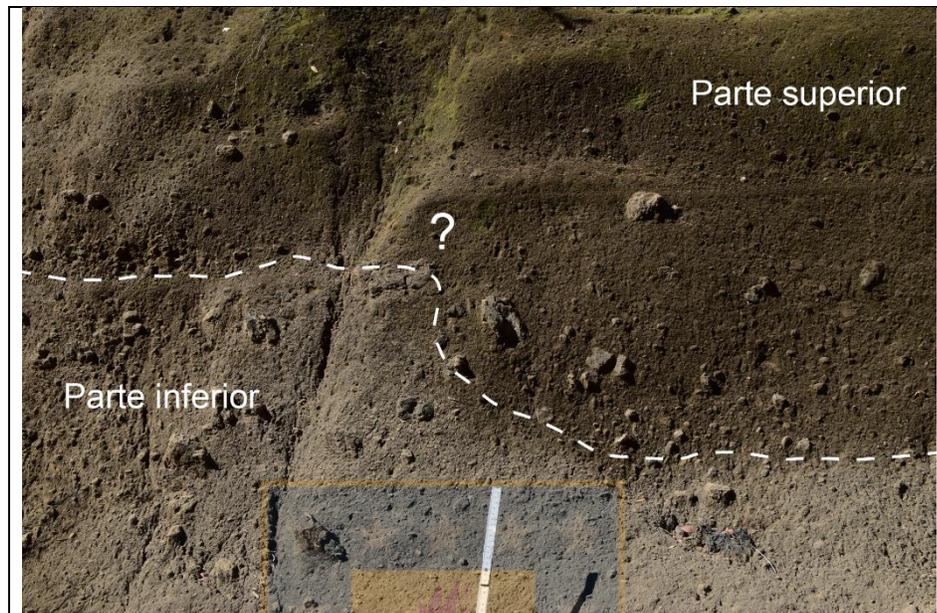


Figura 3.13: Columna L43/L44 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima. a) Toma de muestra L43 en la base del afloramiento, coloración pardo claro. b) Toma de muestra L44 hacia techo del depósito masivo con color pardo oscuro. Escala de 2 m en la fotografía.

Para facilitar la descripción de este depósito se considera la posibilidad de un posible contacto (Fotografía 3.8), reconocido principalmente por un cambio de color desde tonos pardos claros a oscuros, pero carente de una superficie de erosión o no depositación. Debido a que el rango de edades se traslapa y a la poca evidencia de diferencias texturales significativas, no se tienen argumentos para aseverar la existencia de 2 subunidades diferentes de C2. De todas formas, se mantendrá la división entre una parte inferior y superior para señalar las diferencias observadas en terreno. Este depósito en general es matriz soportado, grano creciente con un aumento del porcentaje de bloques hacia techo en la parte inferior. Luego del contacto difuso, el tamaño de grano y la presencia de bloques disminuye. Los fragmentos juveniles varían entre ceniza fina a lapilli fino con moda de lapilli grueso y se encuentran muy alterados, incluso la matriz tiene un color parduzco. La alteración disminuye al observar la superficie fresca sobre el contacto, aunque las partículas juveniles siguen siendo muy redondeadas. Esta redondez de los componentes propios

del evento eruptivo, sumado a la presencia de cristales en el borde de algunos bloques, podrían indicar una alteración debido a la interacción magma-agua más que a la acción del clima.



Fotografía 3.8: Posible contacto entre C2a y C2b. Determinado por diferentes edades de radiocarbono y cambio en la coloración.

La capa inferior tiene mala selección, es matriz soportado con ceniza gruesa y material escoriáceo en abundancia muy vesicular. Los clastos predominantes son de tamaño lapilli, habiendo 2 modas: lapilli fino y lapilli grueso. Algunas partículas juveniles son angulosas y otras redondeadas, se reconocen líticos angulosos de andesita y basalto en la matriz. Los bloques más grandes alcanzan hasta los 10 cm con algunas inclusiones líticas de 3 mm. El depósito es masivo, sin estructuras sedimentarias ni gradación evidente.

La capa superior tiene de forma muy local una leve estratificación con zonas clastosoportadas, esto podría ser parte del contacto entre subunidades de C2, tal como se observó en el depósito de Curacautín 2 del sector E del volcán (Figura 3.7). En general, la parte superior sigue siendo matriz soportado, con una matriz de ceniza fina a gruesa y, con una disminución en el tamaño de grano de su material juvenil. La presencia de bloques también disminuye hacia el techo del depósito.

El último afloramiento de Curacautín 2 en el sector W del volcán se muestra en la columna L45 (Figura 3.14), cuyo depósito no se observa ni la base ni el techo. Tiene un espesor cercano a los 2

m y exhibe un mayor porcentaje de bloques juveniles. Algunos de sus clastos aún conservan cristales fáciles de reconocer a simple vista. En superficie fresca se observa que es matriz soportado, con fragmentos juveniles subredondeados y vesiculares de color gris oscuro a negro, que a veces presentan inclusiones líticas. Tiene un importante porcentaje de material accidental, es masivo y con una mala selección. Los fragmentos accidentales son subangulares, y de composiciones intermedias a félsicas con cerca de 5 cm de largo.

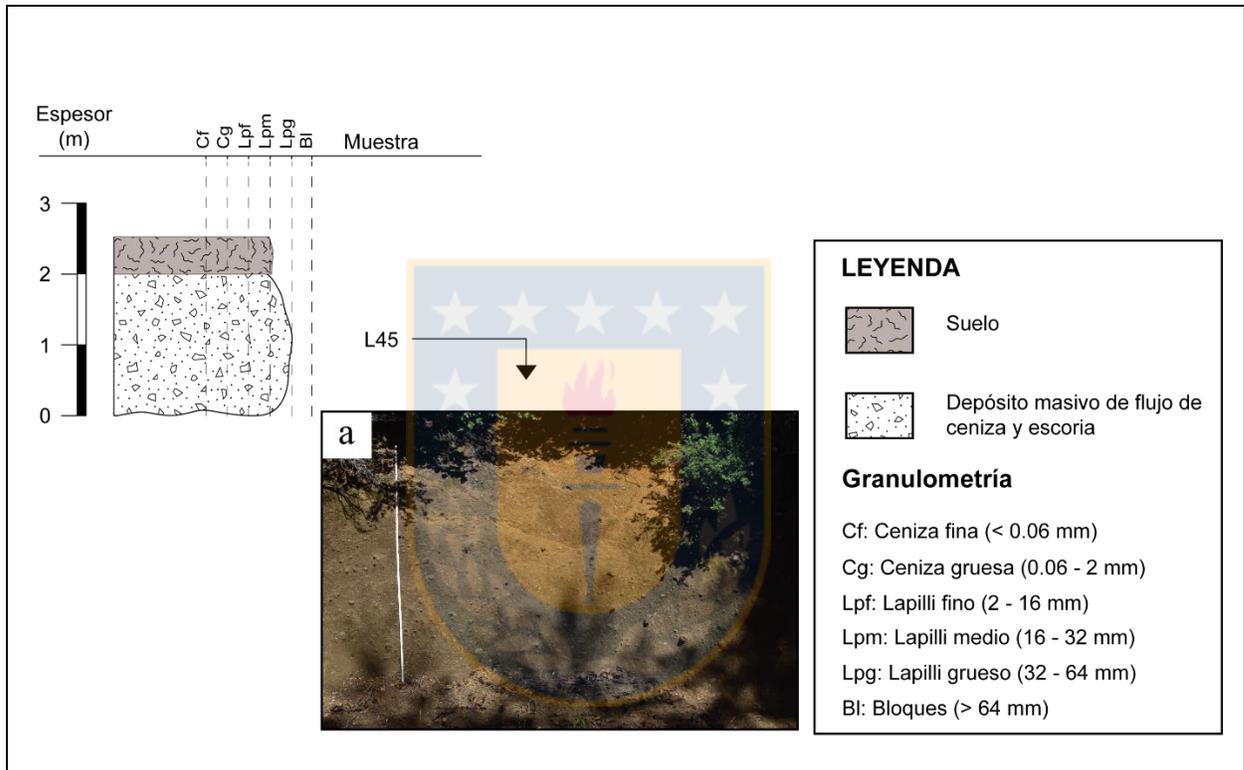


Figura 3.14: Columna L45 de Curacautín 2 al sector W del volcán Llaima. a) Toma de muestra L45 en la base del afloramiento. Escala de 2 m en la fotografía.

3.4. DEPÓSITOS RETRABAJADOS

Los depósitos retrabajados asociados a la Ignimbrita Curacautín se encuentran en las zonas proximales con espesores moderados (2 a 3 m) y también en las áreas más distales con una mayor superficie expuesta. Estos depósitos, en general, presentan poco material juvenil, sus clastos son muy redondeados y son de una coloración marrón característica debido a sus componentes. Tienen una matriz de limo con material volcanoclástico retrabajado, producto de la erosión de la misma ignimbrita. Su composición es similar a la de los depósitos de corrientes de densidad piroclástica

que les subyacen. Se presentan como no consolidados, con niveles de estratificación, ya sea paralela y/o cruzada (Fotografía 3.9), siendo la laminación paralela la más recurrente en la mayoría de los afloramientos. Las secuencias pueden formar lentes y canales, en su mayoría con fragmentos juveniles escoriáceos de tamaño variable entre limo y grava, presentando localmente lentes de bloques de líticos o bombas escoriáceas, imbricación de los clastos, algunos cubiertos por mantos de arcilla. Estos depósitos se interdigitan con el material piroclástico primario, lo que según Litvak y Poma (2005) es evidencia de una simultaneidad entre la actividad volcánica y los agentes exógenos que retrabajaron y acumularon el material depositado en primera instancia.



Fotografía 3.9: Laminación presente en los depósitos retrabajados. Por sobre el contacto se reconoce laminación paralela correspondiente a la capa de retrabajo. Escala de 2 m en la fotografía.

Existen dos ocurrencias principales de depósitos syn-eruptivos localizados en afloramientos dentro de los valles. El retrabajo syn-eruptivo ocurre entre acumulaciones de drenaje de C1 en el flanco N y E del volcán. Estos depósitos tienen cerca de 2 m de espesor, se encuentran empobrecido en

finos, con escoria tamaño lapilli cubiertos de limo y arcilla, y en mayor proporción de ceniza volcánica, probablemente removilizados desde una escoria basal subyacente y diferentes depósitos de C1. La disposición de estos depósitos en capas o laminación paralela muestra que el agua estaba disponible para la movilización y el transporte de piroclastos durante la fase eruptiva temprana. Hacia el sector W, los depósitos con material retrabajado son más cohesivos y sus espesores superan los 2 m. Estos son depósitos no consolidados, polimícticos, masivos y pobremente seleccionados con matriz de limo y arcilla o matriz empobrecida en finos, que sobreyacen a la Ignimbrita Curacautín por medio de un contacto abrupto (Fotografía 3.10). En algunos sectores se observaron depósitos de retrabajo que cubren al flujo de ceniza y escoria de C1, formando parte de la unidad inferior. Estos contienen escoria y algunas inclusiones graníticas propias de C1. Los depósitos retrabajados post-eruptivos son más voluminosos que las facies syn-eruptivas y ocurren en la parte superior de C2, en canales, capas intermitentes (laminación paralela o estratificación difusa), desde unos pocos cm hasta unos m de largo y con espesores de hasta 12 m (Figura 3.5) en el lado N del volcán, sobre C1. Tienen superficies erosivas que cortan longitudinalmente a la Ignimbrita Curacautín.



Fotografía 3.10: Contacto entre depósito retrabajado y la Ignimbrita Curacautín. a) Se observa el contacto abrupto erosivo entre ambos depósitos. b) Vista de cerca a la superficie de contacto con acumulación de bloques de líticos y bombas escoriáceas inmersos en una matriz de ceniza removilizada y arcilla. Localmente presenta clastos imbricados.

Las características típicas de los depósitos retrabajados incluyen la induración, estratificación cruzada y paralela en escala de cm a m, la gran redondez del material comparada con las partículas subangulosas de la ignimbrita, ya sean escorias o líticos, imbricación, acumulaciones de clastos cubiertos de limo y arcilla empobrecidos en finos y una superficie erosional en su base.

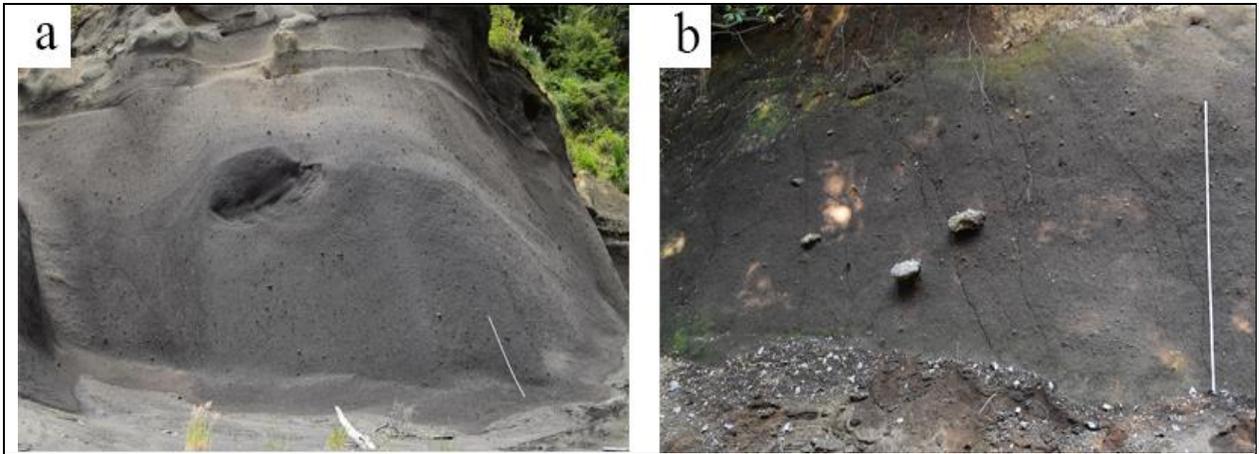
3.5. INTERPRETACIÓN DE FACIES

A partir de las características de los depósitos, se definieron tres facies basándose en la nomenclatura utilizada por Branney y Kokelaar (2002). Las facies definidas son presentadas a continuación:

3.5.1. Facies de ceniza y lapilli masiva (mLT)

Estos depósitos son masivos e isótropos (sin orientación preferencial de las partículas). No se observa ningún tipo de gradación en el tamaño de grano. La única variación vertical evidente es respecto a la coloración y se reconoce en el lado E, en donde varía de gris oscuro en base a tonos parduzcos hacia techo en un depósito perteneciente a Curacautín 1. En general, los depósitos de esta facies son finos y de pobre selección, presentando entre un 85% y un 90% de matriz tamaño ceniza, compuesta principalmente de fragmentos juveniles, algunos líticos y escasos cristales (ver descripción detallada en Anexo 1). Los fragmentos mayores tienen una moda tamaño lapilli, con algunos escasos tamaño bloque.

Esta facies (Fotografía 3.11) se presenta hacia la base de Curacautín 1 como enriquecida en finos (mLT_{frich}) y se reconocen en el sector W a una distancia de 11,88 km del centro eruptivo (Figura 3.15a), en el sector N a unos 15,14 km del volcán (Figura 3.15b) y otro depósito a 13,74 km (Figura 3.15c). Hacia el flanco E, esta facies se observa en un depósito a 12,20 km del volcán en las cercanías del río Allipén (Figura 3.15d). El espesor expuesto de las capas de mLT_{frich} varían entre 3 m en el flanco W, 2,5 y 9 m en el N y 9 m en el lado E.



Fotografía 3.11: Facies mLT de la Ignimbrita Curacautín. a) Facies mLT enriquecida en finos color gris oscuro en la base. Sector E del volcán. b) Facies mLT del lado N del volcán con escasos bloques.

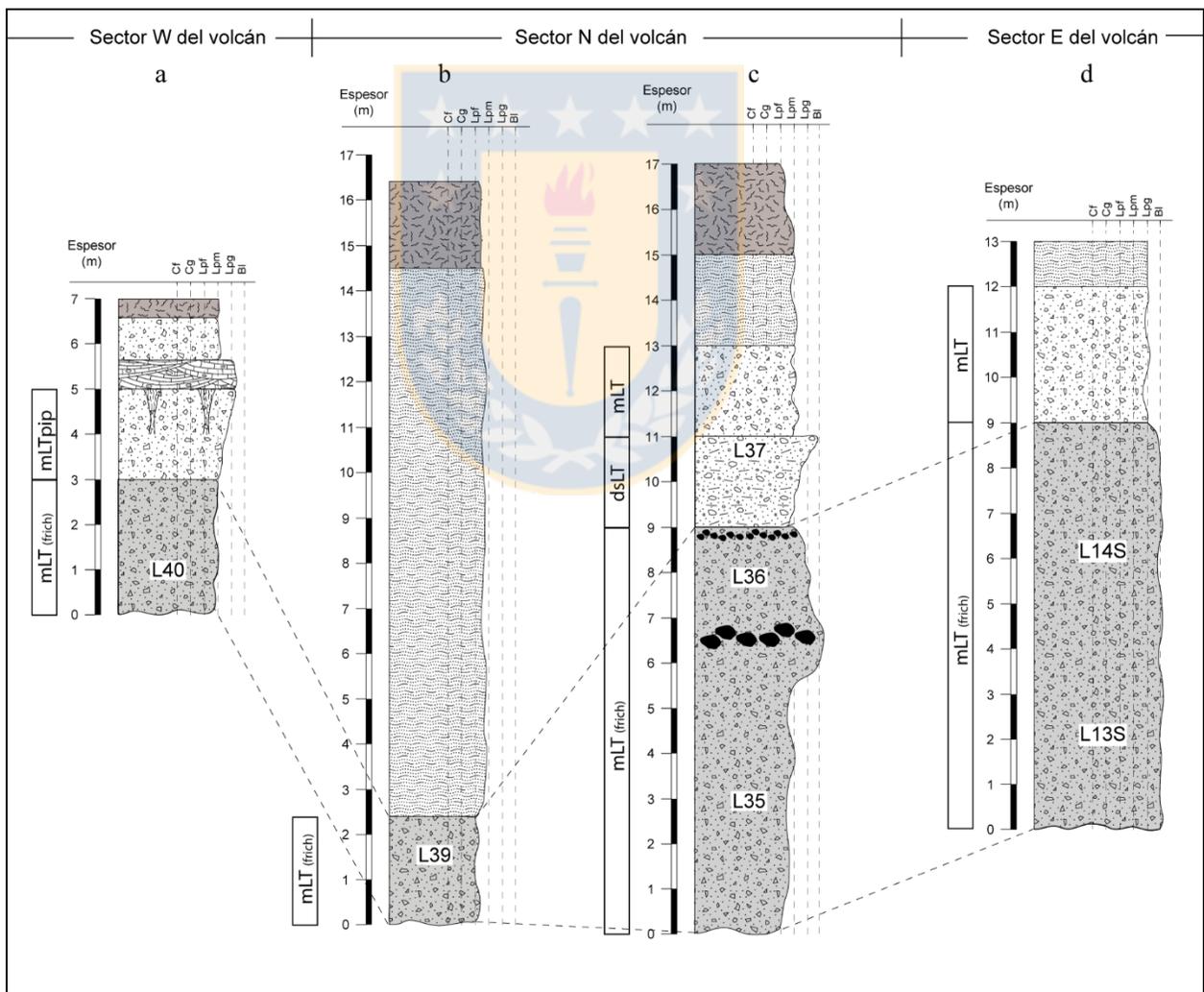


Figura 3.15: Facies mLT_{frich} de la unidad inferior C1. a) Depósito sector laguna Quepe. b) Depósito sector N camino a Curacautín. c) Depósito sector “Llaima Camp”. d) Depósito sector E, laderas río Allipén. El espesor varía entre 2,5 y 9 m.

Los depósitos de la facies que no están enriquecidos en finos (mLT) y que también pertenecen a C1 se reconocen en el N (columna L38) con 2,5 m de espesor expuesto a unos 14,38 km del centro eruptivo (Figura 3.16a) y, hacia el lado E del volcán a una distancia de 12,20 km con 3 m de espesor, sobreyaciendo al depósito masivo enriquecido en material juvenil en la base de Curacautín 1 (Figura 3.16b). El depósito del flanco N tiene la particularidad de presentar bloques aislados de gran tamaño que superan los 20 cm.

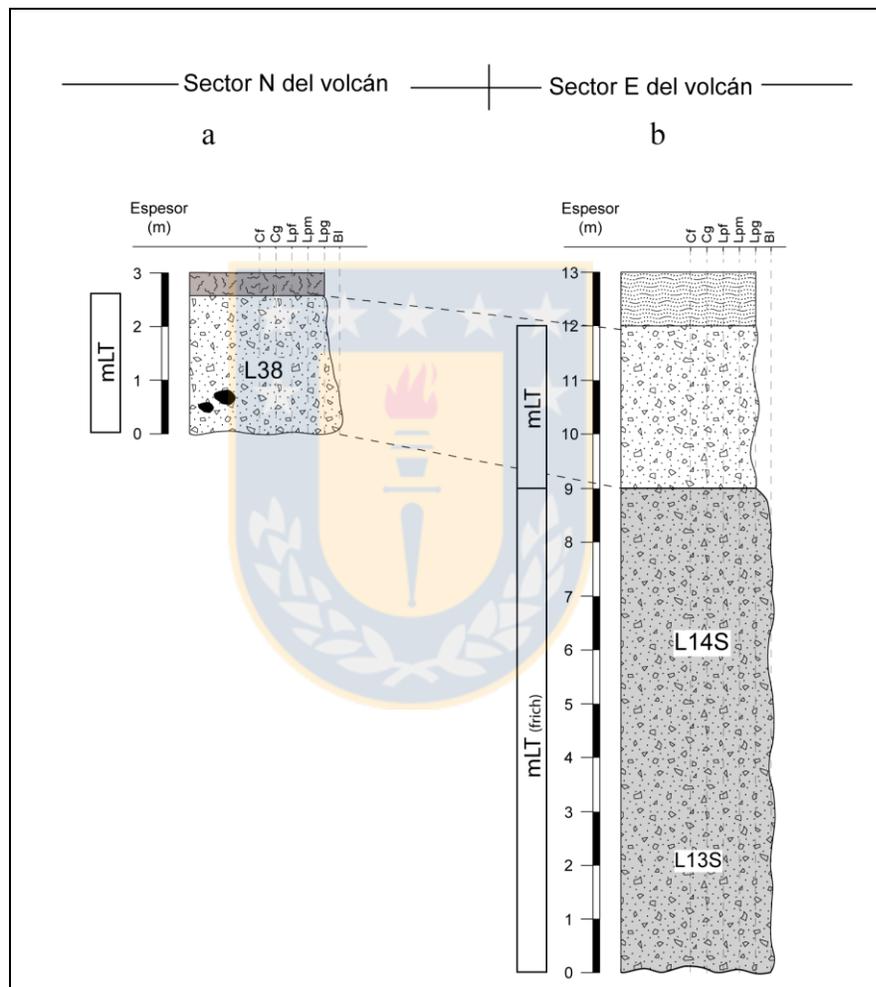


Figura 3.16: Facies mLT de la unidad inferior C1. a) Depósito al N del volcán camino Curacautín con bloques aislados de gran tamaño. b) Depósito sector E, laderas río Allipén.

Los depósitos con facies mLT que se encuentran en C2 se ubican al lado W y N del edificio volcánico. Hacia el sector W, se encuentra el más distante a 19,10 km con 3 m de espesor en la columna L31 (Figura 13.17a), luego a 16,93 km con 5 m de espesor en la columna L42 (Figura 13.17b) y a 16,57 km con 3 m de exposición en la columna L43/L44 (Figura 13.17c). También se

reconoció mLT perteneciente a C2 en el flanco N a 13,74 km del volcán en la columna L35/L36/L37 (Figura 3.17d) cuya capa es de 2 m de espesor, a una distancia de 14,55 km en la columna L34 (Figura 3.17e) y a 16,53 km en la columna L30 (Figura 3.17f), ambas con 2,5 m de espesor.

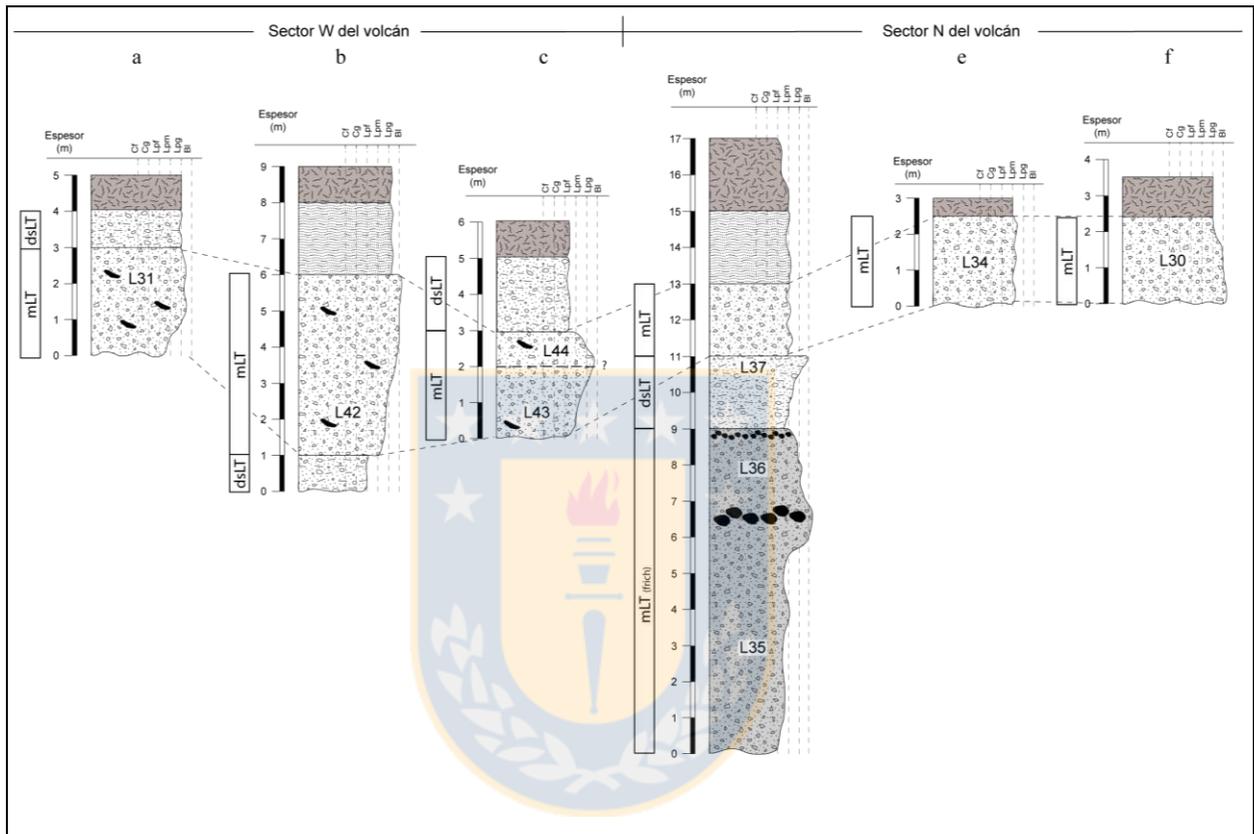
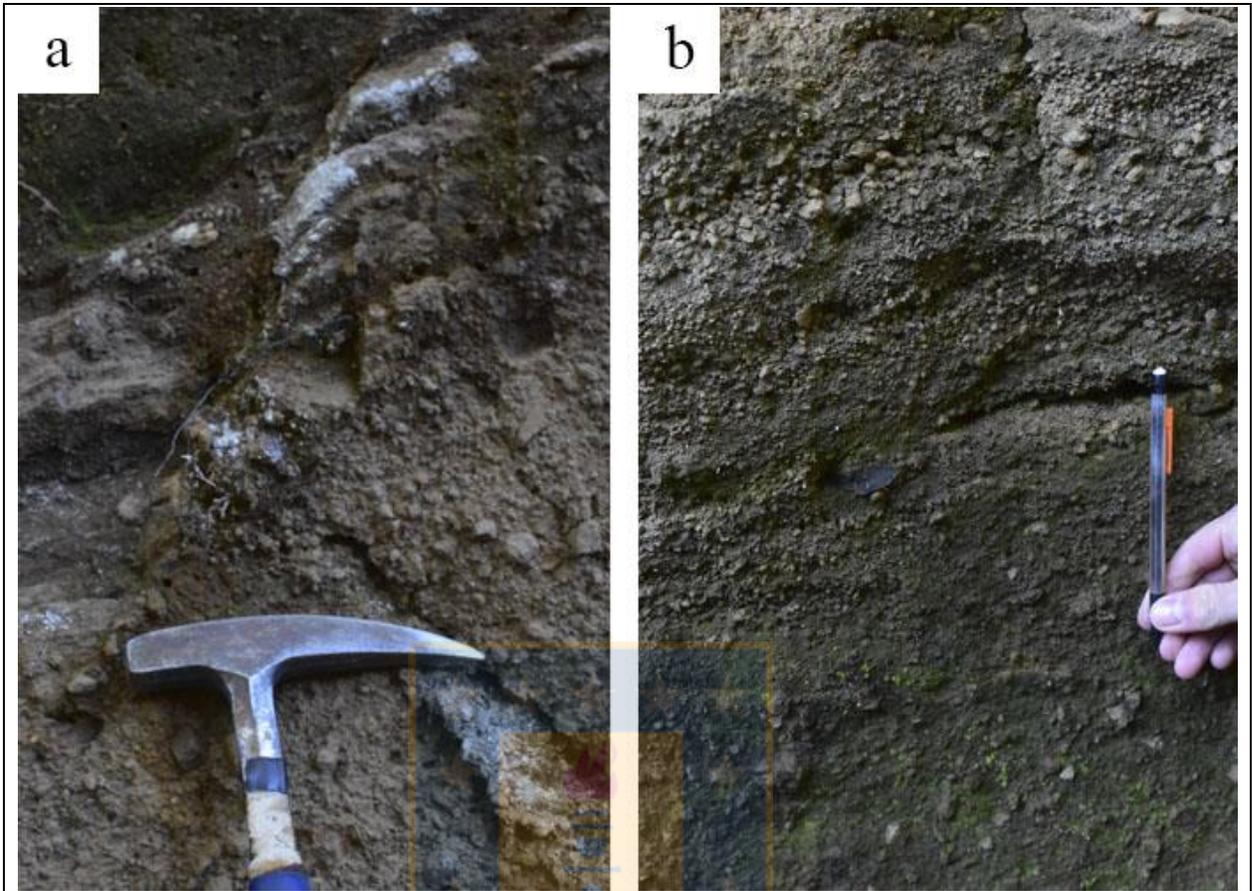


Figura 3.17: Facies mLT de la unidad superior C2. El espesor varía entre 2,5 y 9 m. La existencia de un lente de bloques sólo fue observada en el flanco W del volcán.

3.5.2. Facies de ceniza y lapilli difusamente estratificada (dsLT)

Estos depósitos comprenden capas delgadas que se presentan de forma difusa con algunas variaciones gradacionales del tamaño de grano y con abundancia de fragmentos juveniles tamaño lapilli (Fotografía 3.4). La estratificación puede ser subparalela e incluso levemente cruzada. Según Branney y Kokelaar (2002), las litofacies con estratificación difusa ocurren comúnmente en las transiciones gradacionales entre litofacies estratificadas y masivas. Esto es lo que ocurre en la localidad cercana a la laguna Quepe hacia el W del volcán y en el sector Llaima Camp en el lado N, donde la estratificación difusa marca el cambio entre C1 y C2 de la Ignimbrita Curacautín.



Fotografía 3.12: Facies dsLT de la Ignimbrita Curacautín. a) Sector Llaima Camp al lado N del volcán. b) Sector laguna Quepe al lado W del volcán.

Esta facies se reconoce en C1 exclusivamente en el lado N a unos 13,74 km del volcán en la columna L35/L36/L37 (Figura 3.18a), mientras que en el lado W está presente en C1 a 16,93 km en la columna L42 (Figura 3.18b), en C2 de la Ignimbrita Curacautín a unos 16,57 km en la columna L43/L44 (Figura 3.18c) e incluso hasta 19,10 km de distancia en la columna L31 (Figura 3.18d), siendo el punto más alejado del centro eruptivo. Los depósitos son comúnmente subordinados y el espesor expuesto varía entre 1 y 2 m.

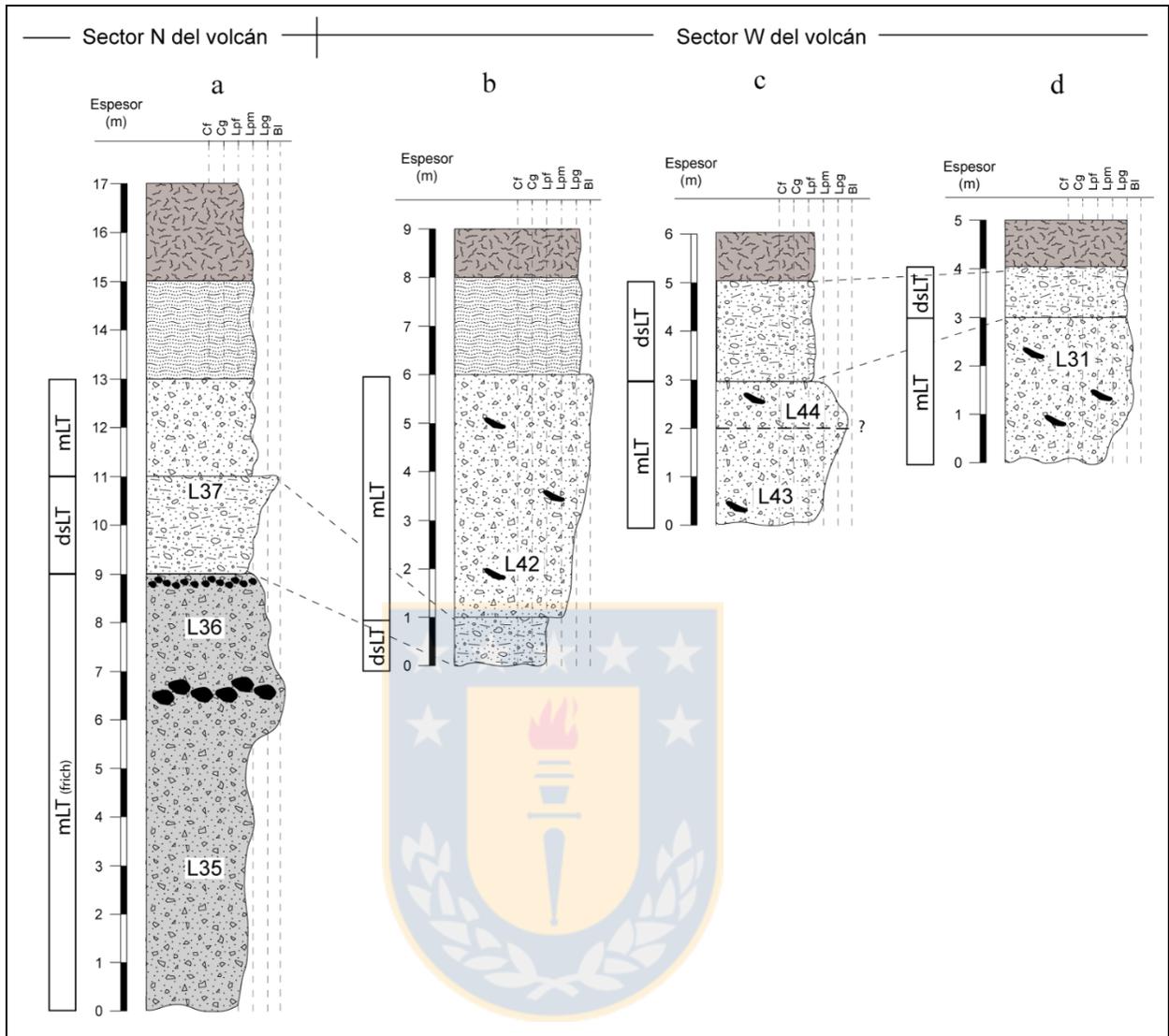


Figura 3.18: Facies dsLT de la Ignimbrita Curacautín. Tanto en a) como en b) la facies dsLT es definida en la unidad inferior, mientras que para c) y d) la facies dsLT es definida en la unidad superior.

3.5.3. Facies de ceniza y lapilli masiva con pipas de desgasificación (mLTpip)

Esta facies se caracteriza por ser masiva, aunque localmente presenta estratificación paralela difusa con niveles decimétricos ricos en líticos tamaño lapilli a bloque. Además, estos depósitos presentan pipas de desgasificación verticales centimétricas que exhiben zonas irregulares enriquecidas en líticos.

Estos depósitos tienen una similitud en cuanto a granulometría a la facies mLT, pero esta es algo más gruesa. Además, se distingue por la presencia de niveles ricos en líticos (ausentes en mLT).

Las variaciones de tamaño de grano no son tan marcadas. Sin embargo, es posible reconocer gradación inversa de escorias y líticos.

Esta facies está presente en la localidad laguna Quepe, al lado W del volcán, con cerca de 11,88 km de distancia del centro eruptivo en la columna L40 (Figura 3.19). El depósito tiene alrededor de 2 m de espesor y marca la transición desde C1 a C2 de la Ignimbrita Curacautín (Fotografía 3.4). A este depósito que pertenece a Curacautín 1, le sobryace una oleada piroclástica, y luego sobre él se encuentra Curacautín 2. Pese a que se reconoció la presencia de pipas de desgasificación en un solo depósito asociado a esta facies, se hace notar su importancia al estar presente en la capa masiva de un flujo piroclástico, y luego, ausentarse en la oleada piroclástica que la sobryace, representando una unidad diferente.

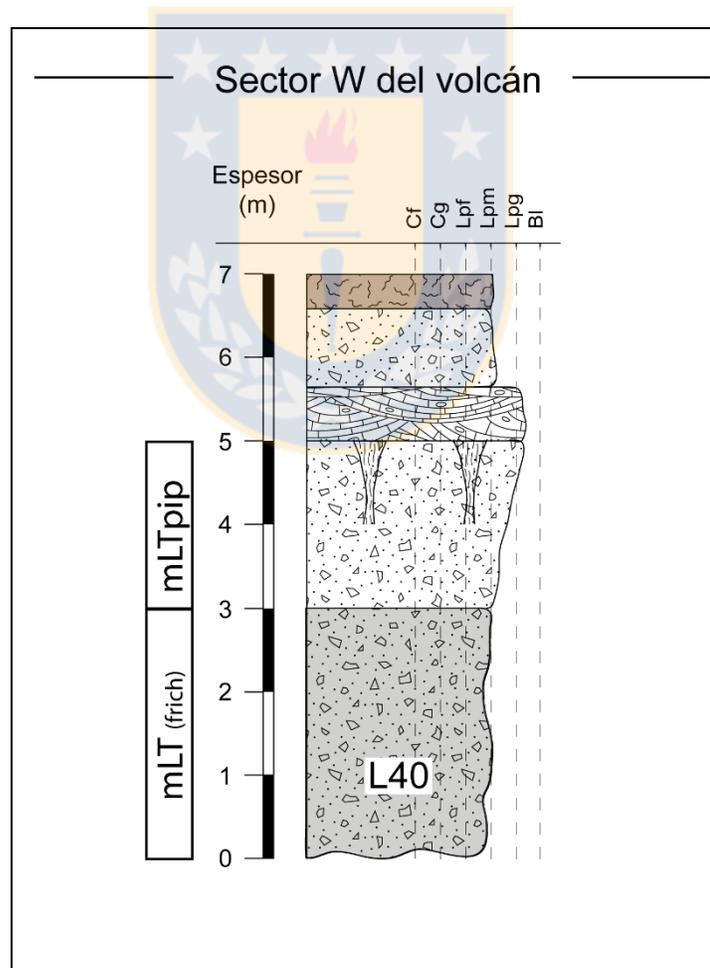


Figura 3.19: Facies mLTpip de la unidad inferior C1. Se reconocen pipas de desgasificación. El espesor de la capa es de 2 m.

3.5. CORRELACIÓN DE LA IGNIMBRITA CURACAUTÍN

La reconstrucción de la arquitectura de la Ignimbrita Curacautín permite establecer algunos aspectos guías de sus depósitos:

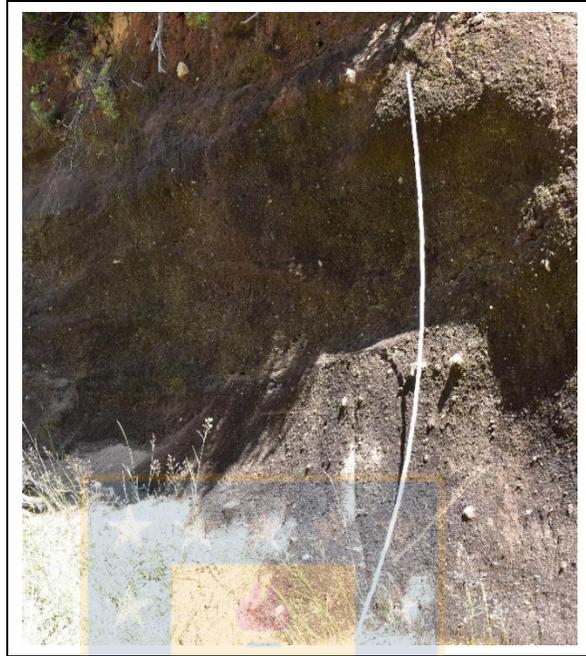
- a) La presencia de clastos de granodiorita, tanto como clastos individuales o como inclusiones en las escorias, que nos permite distinguir ambigüamente entre C1 y C2, ya que estos granitoides están presentes en un mayor porcentaje en depósitos propios de Curacautín 1, mientras que están ausentes solo en depósitos pertenecientes a Curacautín 2.
- b) Variaciones en el contenido de líticos, en particular, capas enriquecidas en juveniles de color negro, masivas, que fueron horizontes útiles para la correlación entre Curacautín 1 tanto en el flanco E y W, como en el lado N del volcán (Fotografía 3.13).



Fotografía 3.13: Depósito masivo enriquecido en material juvenil. Pertenece a la unidad inferior (C1) ubicada en el flanco N del volcán (muestra L35).

- c) Estructuras internas de los depósitos, particularmente la capa de estratificación difusa presente en Curacautín 2 (Fotografía 3.14), acompañada de la abundante presencia de

carbón. A diferencia de la estratificación difusa de C1, coincidente con el cambio de color desde gris oscuro a pardo (Fotografía 3.15).



Fotografía 3.14: Depósito de C2 con estratificación difusa. Escala de 2 m en la fotografía.



Fotografía 3.15: Depósito de C1 con variación de color. Parte inferior gris oscura y parte superior con tonos parduzcos. Escala de 2 m en la fotografía.

- d) La existencia de un depósito de oleada piroclástica que separa a C1 y C2, junto con pipas de desgasificación (Fotografía 3.4), que pese a ser reconocido en un solo lugar durante este trabajo, ha sido estudiado con anterioridad por Naranjo y Moreno (1991).
- e) Finalmente, la secuencia de capas limosas con material piroclástico retrabajado que divide a Curacautín 2 en 3 subunidades. Evidenciando un periodo de no deposición de flujos piroclásticos.

Estos factores permiten el seguimiento y correlación de las dos unidades principales de la Ignimbrita Curacautín, así como también de las subunidades de Curacautín 2 en los alrededores del volcán. Sin embargo, la ausencia de un enriquecimiento en bloques juveniles de C1 en los sectores E y W, dificultó la correlación de C1.

Las similitudes entre los depósitos masivos de ceniza y escoria pertenecientes a Curacautín 1 y 2 favorecen una correlación mutua, ya que en ambas unidades existen secuencias que se interpretan como flujos de ceniza y escoria de baja energía, debido a la ausencia de estructuras sedimentarias en los depósitos. Tanto C1 como C2 incluyen fragmentos alterados hidrotermalmente y, en ambas, las brechas están ausentes.

La solución a este problema para distinguir depósitos masivos fue dada por la presencia de carbón, cuyas dataciones confirman la pertenencia de estos depósitos a C1 o C2 dependiendo del caso. Otro aspecto importante es la posición estratigráfica, ya que los depósitos masivos que corresponden a Curacautín 1 se encuentran en la parte inferior de la unidad, reconocidos como flujos de escoria y ceniza enriquecidos en material juvenil. Por su parte, los afloramientos que pertenecen a Curacautín 2 se posicionan bajo una secuencia con estratificación difusa, y por lo general se ubican en el techo del afloramiento.

A modo de resumen, lo anteriormente descrito se visualiza en las columnas estratigráficas correlacionadas de la figura 3.20.

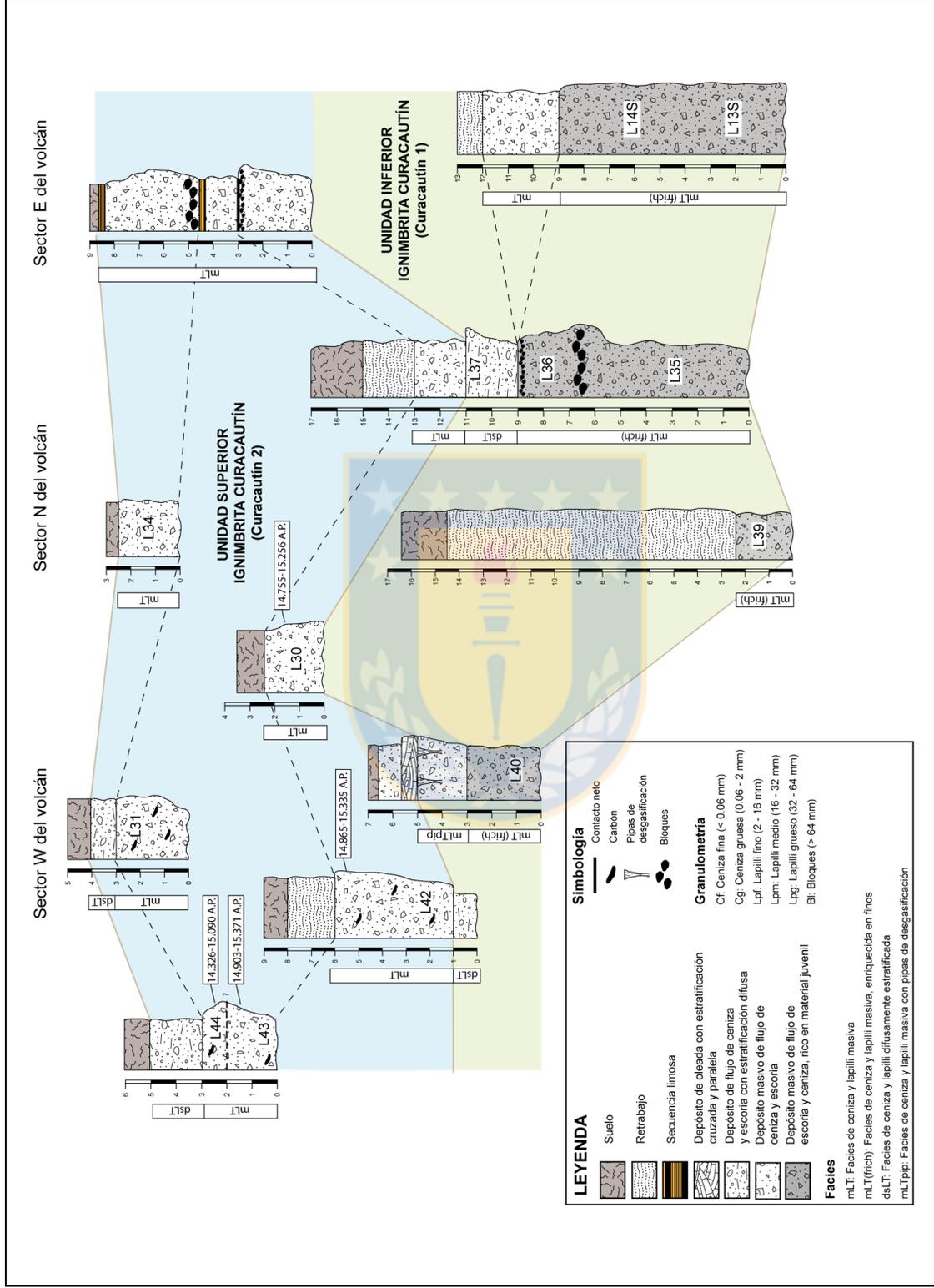


Figura 3.20: Correlación de columnas estratigráficas de la Ignimbrita Curacautín. Se muestran las variaciones por sector desde los flancos E-W y hacia el N del volcán Llauma. C1 se caracteriza por tener abundante material juvenil y algunos lentes de bloques. Una oleada piroclástica separa C1 y C2. Curacautín 2 está compuesta por 3 subunidades, con abundante presencia de carbón.

4. ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO

4.1. GENERALIDADES

Al complementar el análisis de facies y las características de los depósitos, en conjunto con las medidas de la distribución del tamaño de grano dentro de las diferentes unidades de flujo, es posible interpretar el emplazamiento de sus productos piroclásticos y las variaciones espaciales respecto a la distancia desde la fuente eruptiva.

El análisis sedimentológico de la Ignimbrita Curacautín se puede abordar como un contraste entre las variaciones de facies por localidades respecto al centro eruptivo o por diferencias verticales entre los depósitos de las unidades Curacautín 1 y Curacautín 2. Con el fin de obtener más información respecto a la caracterización de esta ignimbrita, a continuación, se analizarán las variaciones granulométricas presentes en las facies para el sector E, W y N del volcán Llaima, además de sus componentes (cristales, material juvenil y accidental), en conjunto con una comparación entre las unidades C1 y C2 a partir de columnas tipo de cada sector. Estas observaciones permiten determinar cambios laterales en el tamaño de grano y variaciones radiales o longitudinales en las características de la ignimbrita. Con base en lo anterior, se puede estipular los posibles mecanismos de transporte responsables de estas variaciones laterales, cuyo entendimiento es de gran importancia para futuras erupciones del volcán Llaima.

4.2. VARIACIONES GRANULOMÉTRICAS

Se realizó un análisis granulométrico para 16 muestras de la Ignimbrita Curacautín (Tabla 3.1) considerando valores de ϕ entre -6 (64 mm) y 4 (0,062 mm) a intervalos de 1 ϕ . Las curvas acumulativas de frecuencias obtenidas fueron graficadas con un eje de ordenadas probabilístico, del cual se obtuvieron los parámetros granulométricos de mediana y desviación.

El término “empobrecido en finos” hace referencia a los depósitos que contienen una cantidad menor de ceniza fina con respecto a los depósitos de corrientes de densidad piroclástica circundantes (Branney y Kokelaar, 2002). Este empobrecimiento en finos da una idea de la

capacidad propia de la corriente para presentar elutriación durante el transporte. Para evaluar el grado de empobrecimiento en los depósitos de la Ignimbrita Curacautín, se sigue la metodología de Brand *et al.* (2014), calculando la relación del porcentaje en peso (wt%) de la ceniza mayor a 4ϕ (más fino que 0,06 mm; F2) y el porcentaje en peso de cenizas mayor que 0ϕ (más fino que 1 mm; F1). La ceniza mayor de 4ϕ es la más susceptible a la elutriación (Brand *et al.*, 2014), por lo que la relación del wt% proporciona una medición relativa de la cantidad de ceniza que se elutrió.

Aunque todas las muestras tienen un alto contenido en finos, existen ciertas diferencias en la distribución granulométrica y de componentes según nivel estratigráfico y tipo de depósito. Debido a que el sector E fue estudiado en más detalle durante una campaña de terreno en el año 2016 (Figura 4.1), los datos granulométricos obtenidos en ese entonces son utilizados para complementar las interpretaciones de esta zona.

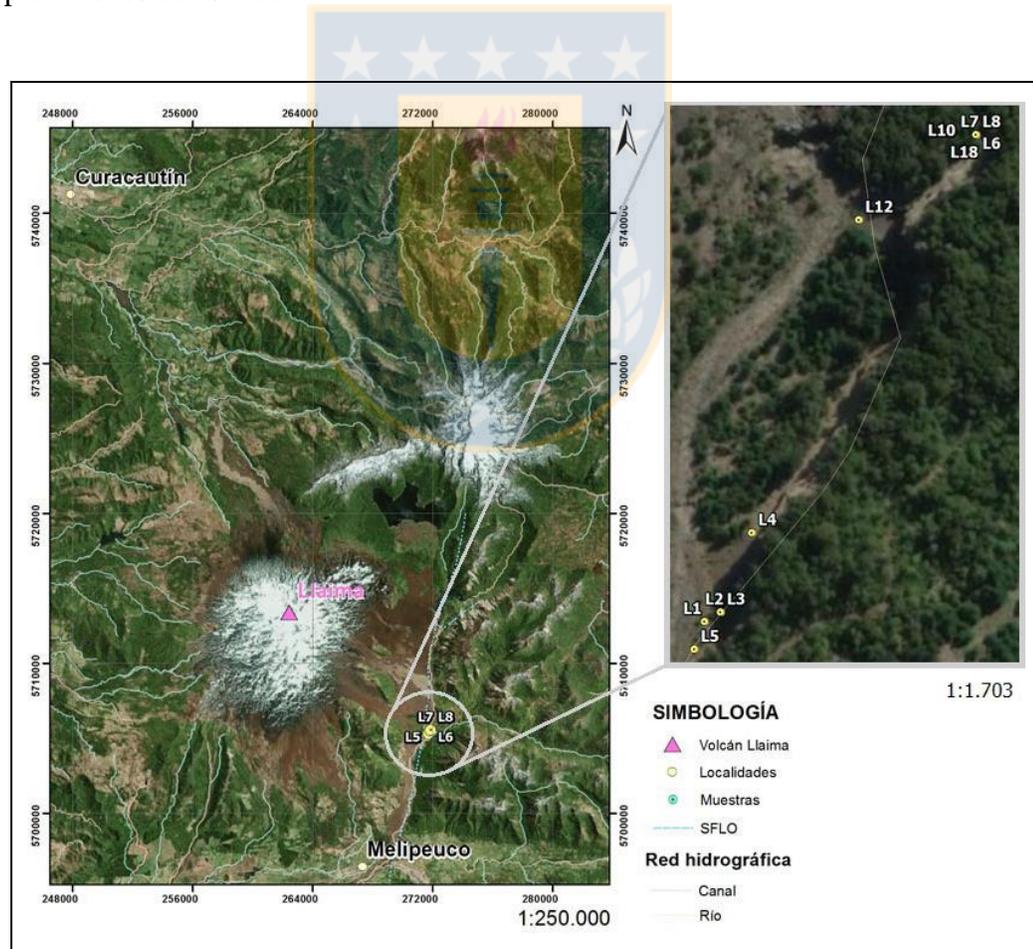


Figura 4.1: Mapa muestreo año 2016. Acercamiento del área de muestreo a escala 1:1.703 de la Ignimbrita Curacautín en el sector E del volcán Llaima, durante la campaña de terreno del año 2016. Coordenadas geográficas en UTM dentro del huso 19S en sistema WGS84.

Los puntos visitados durante la campaña del 2016 se resumen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Muestras de los depósitos visitados de la Ignimbrita Curacautín durante el 2016.

Muestra	Unidad	Coordenadas	Distancia del volcán (km)	Sector
L1	C1	19H 0271726 5705312	12,06	E
L2	C1	19H 0271734 5705317	12,07	E
L3	C1	19H 0271734 5705317	12,07	E
L4	C1	19H 0271750 5705357	12,05	E
L5	C1	19H 0271721 5705298	12,07	E
L6	C2a	19H 0271863 5705558	12,01	E
L7	C2	19H 0271863 5705558	12,01	E
L8	C2b	19H 0271863 5705558	12,01	E
L10	C2c	19H 0271863 5705558	12,01	E
L12	C1	19H 0271804 5705515	11,98	E
L18	C1	19H 0271863 5705558	12,01	E

La información de la distribución del tamaño de grano es analizada más a detalle según cada localidad. En la figura 4.2 se muestran las columnas generalizadas en cada flanco del volcán Llaima y la posición estratigráfica de las muestras. Respecto a la columna del sector E, no fue incluida la posición estratigráfica de las muestras obtenidas en la campaña de terreno del año 2016, ya que solo se tuvo acceso a los datos de granulometría. Teniendo esto en consideración, se observa que el sector N (Gráfico 4.1) tiene una mayor proporción de partículas finas, lo que se vuelve más notorio a partir de valores de $\phi=2$ ($<0,25$ mm), específicamente en C1, mientras que para el W (Gráfico 4.2) y E (Gráfico 4.3), la proporción de partículas finas de Curacautín 2 es muy similar entre ellas. En el caso del lado E, no es posible notar una marcada tendencia en las distribuciones, a excepción de un leve empobrecimiento en partículas gruesas en los depósitos de C1, para valores de ϕ entre -2 y 0. Por otro lado, para C2 del sector W, la distribución es bastante parecida entre sí, salvo por la muestra L31, la cual se ubica hacia el SW, siendo la más alejada del centro eruptivo y que sigue una curva de distribución un poco alejada del promedio. Las muestras del flanco N de la unidad inferior presentan curvas de distribución bastante restringida, es decir, las diferentes muestras son muy similares entre sí respecto a sus variaciones granulométricas, demostrando que C1 es más homogénea en este sector.

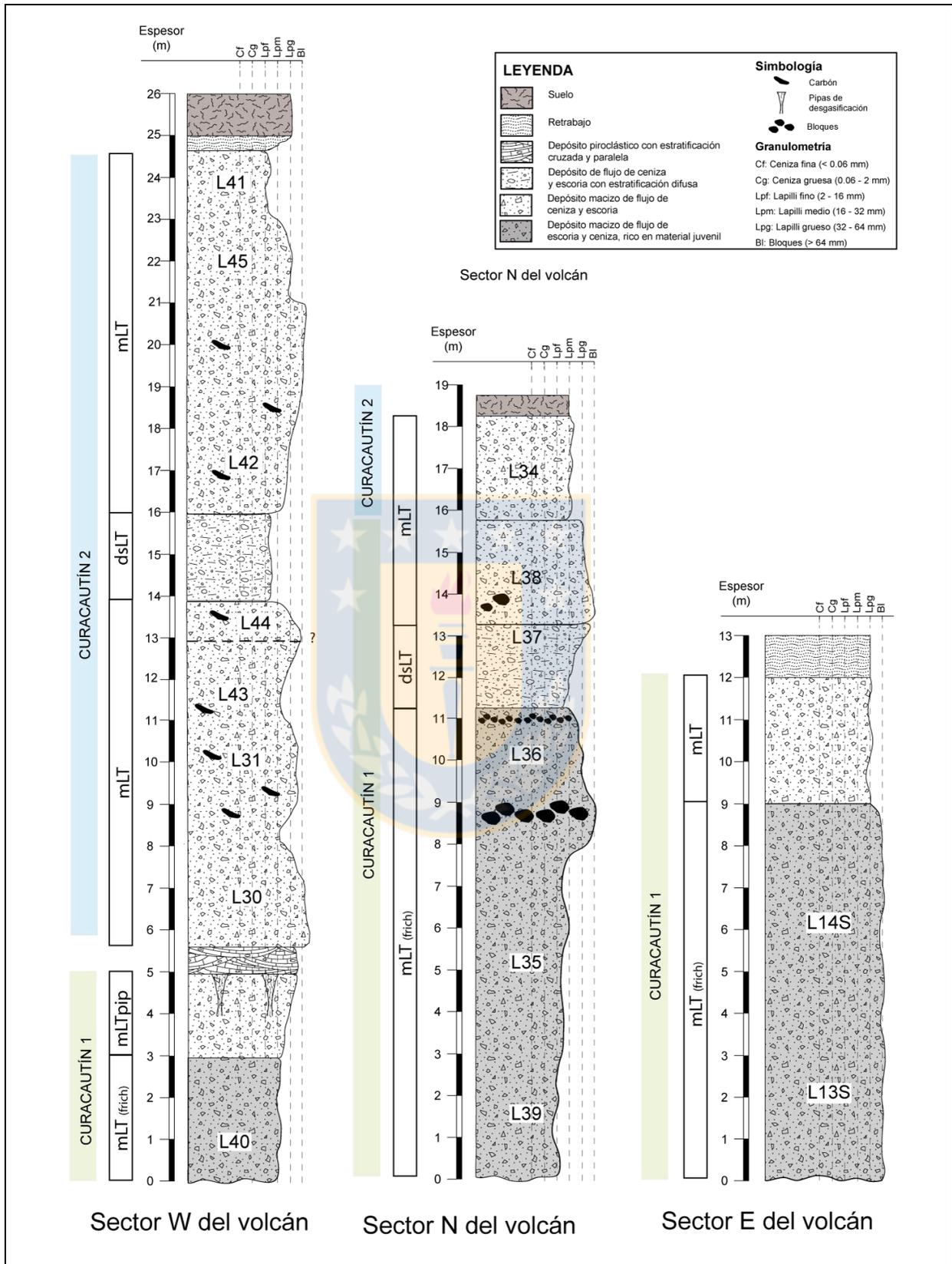


Figura 4.2: Columnas estratigráficas generalizadas según localidad. Posición estratigráfica de las muestras analizadas.

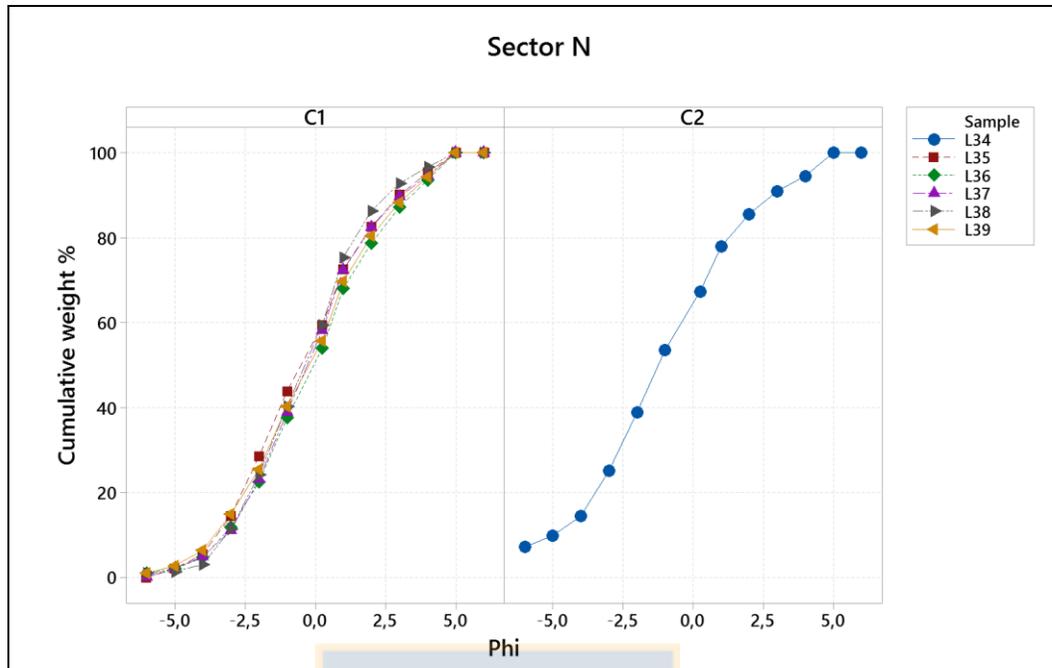


Gráfico 4.1: Curvas de distribución del tamaño de grano en sector N. Todas las muestras tienen una tendencia similar salvo la correspondiente a L34, la cual está enriquecida en partículas gruesas. Muestras obtenidas en campaña de terreno 2019.

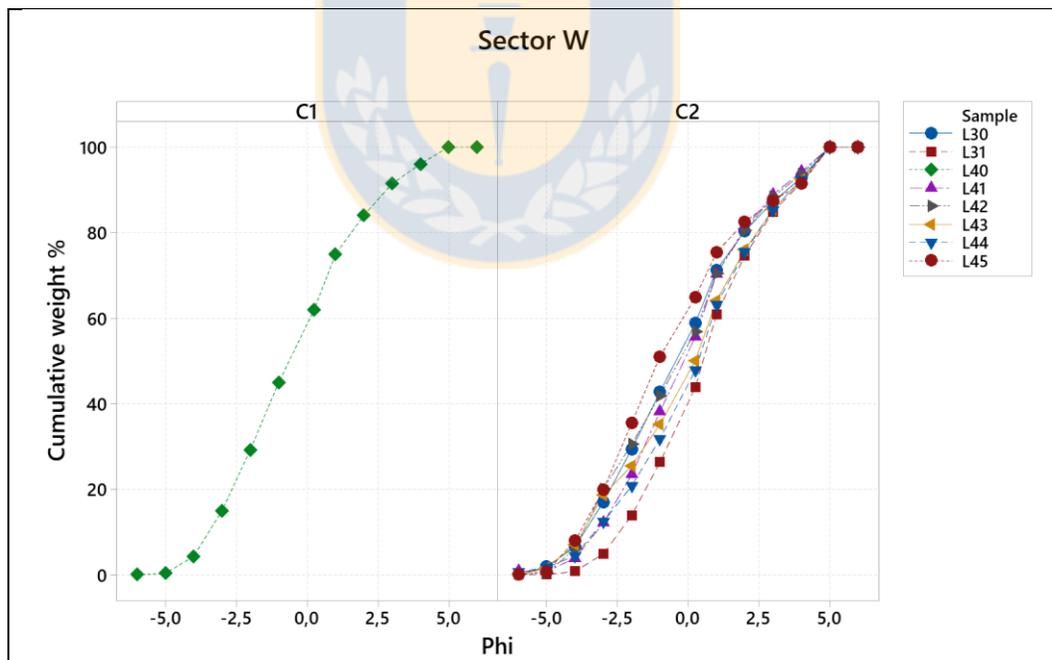


Gráfico 4.2: Curvas de distribución del tamaño de grano en sector W. Muestras obtenidas en campaña de terreno 2019.

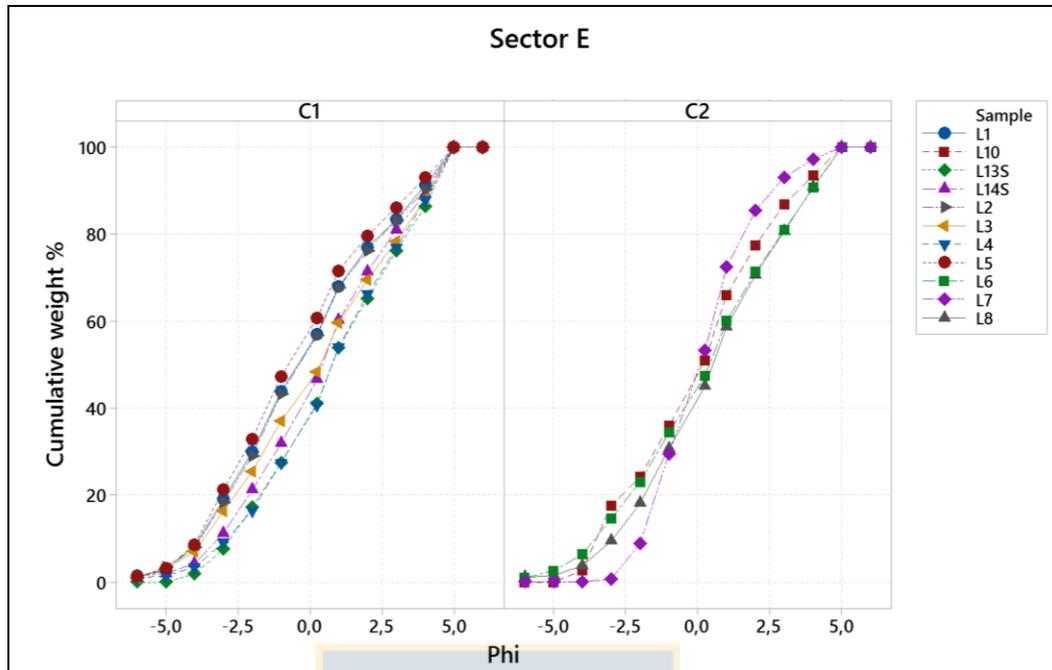


Gráfico 4.3: Curvas de distribución del tamaño de grano en sector E. Todas las muestras a excepción de L13S y L14S corresponden al muestreo del año 2016.

Como se verá en los datos granulométricos, la proporción de F2 a F1 varía ampliamente dentro de los depósitos de la Ignimbrita Curacautín. La relación promedio F2/F1 para todas las corrientes de densidad piroclástica es de 0,21, con una desviación estándar de 2,63. Dada la difusión de datos para las unidades de flujo de la Ignimbrita Curacautín, se considera la relación $F2/F1 \leq 0.1$ como depósitos “agotados en finos”, las relaciones $F2/F1 \leq 0.14$ como depósitos “empobrecidos en finos” y $F2/F1 \geq 0.28$ como depósitos “enriquecidos en finos”.

Además, existen rasgos distintivos a nivel de selección de los diferentes depósitos según sus facies y algunas variaciones de acuerdo a su localidad, lo cual queda en evidencia en los diferentes gráficos de dispersión (Gráfico 4.4) detallados a continuación:

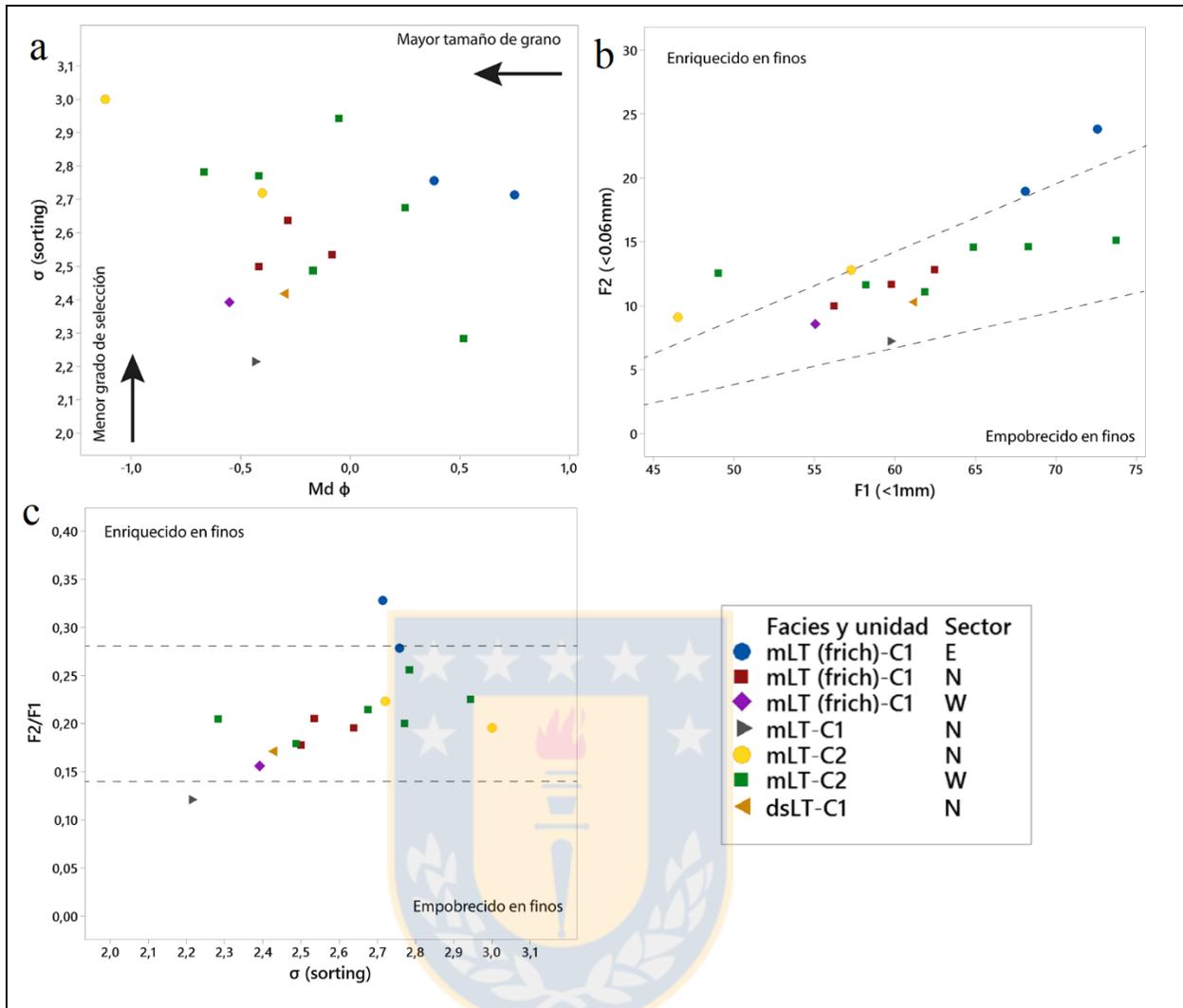


Gráfico 4.4: Selección de las diferentes facies por sector. a) Desviación estándar gráfica versus Mediana gráfica, obtenidos para cada muestra. b) F2 (fracción <0,06 mm, % peso) versus F1 (fracción <1 mm, % peso). c) Relación F2/F1 versus σ (sorting).

Pese a que las muestras no se agrupan en campos bien definidos, del gráfico 4.4a, se puede desprender que, en la unidad inferior, la facies mLT_(frich) del flanco W presentan una mejor selección que las facies mLT_(frich) en los sectores E y N. La facies mLT de la unidad inferior del sector N es la de mayor grado de selección (muestra L38). Además, se aprecia que el lado N tiende a ser granulométricamente más grueso, ya sea en las facies mLT de C1 y C2, caso contrario a las facies mLT_(frich) de la unidad inferior del sector E que presentan un menor tamaño de grano. Por su parte, la facies dsLT de Curacautín 1 tiene un mejor grado de selección que gran parte de las facies, similar a las facies mLT_(frich) del lado W, pero con un menor tamaño de grano.

Por otro lado, el gráfico 4.4b, muestra que la facies mLT de Curacautín 2 del lado N, presentan un porcentaje menor de material piroclástico de tamaño <1 mm, entre un 46,5% y 57,3% en F1, en comparación con mLT-C2 del sector W, mientras que el porcentaje de sus partículas $<0,06$ mm (F2) es más similar. Otra diferencia porcentual importante se observa en las muestras pertenecientes a mLT_(frich) de C1 del lado E, las cuales tienen un porcentaje elevado en las fracciones $<0,06$ mm (F2), alcanzando entre un 18 y 23%, es decir, están enriquecidas en finos. Dentro de esta misma categoría de enriquecimiento en partículas finas, se ubica la facies mLT de Curacautín 2 en el flanco N, y particularmente en un solo caso al lado W (muestra L45).

La relación del grado de selección de las facies respecto al contenido de finos (F2/F1) se muestra en el gráfico 4.4c, en el cuál es fácil distinguir a mLT_(frich) de C1 del lado E como la facies de mayor enriquecimiento en finos, en contraste con la facies mLT de C1 ubicada en el sector N, cuyos depósitos están empobrecidos en partículas finas. Si se compara la facies mLT propia de Curacautín 2, se puede ver cierta simetría entre sus depósitos tanto del N como del W respecto al contenido de material fino. Por otra parte, si se analiza el grado de selección comparando a las facies mLT_(frich) pertenecientes a Curacautín 1, se establece que las de mayor grado de selección se encuentran en el lado W, luego los depósitos del flanco N con un grado moderado de selección, seguido por los depósitos del lado E con facies mLT_(frich) de menor selección.

Ahora bien, si comparamos las unidades Curacautín 1 y Curacautín 2 con el fin de obtener variaciones granulométricas, primero es necesario graficar la distribución de tamaño de grano para cada unidad (Gráfico 4.5). En el caso de Curacautín 1, se puede notar que menos de un 15% del peso pertenece a partículas gruesas entre -6 y -3ϕ (64 y 8 mm), mientras que para Curacautín 2, existe un leve enriquecimiento en estos tamaños llegando incluso a un 20% del peso acumulado (muestra L34), además la curva granulométrica para Curacautín 1 exhibe un rango acotado del porcentaje de material grueso. En contraste, para el material menor a 0,5 mm ($\geq 1 \phi$), C1 cuenta con una curva de distribución similar a C2. Sin embargo, las muestras propias de la unidad superior tienen alrededor de un 5% más en peso acumulado que C1 de material fino, siendo notorio en $\phi = 1$ (0,5 mm). En resumen, las curvas de distribución hacen pensar que Curacautín 1 es más homogénea respecto a la variación granulométrica presente en sus depósitos al tener un espectro más acotado de las mismas.

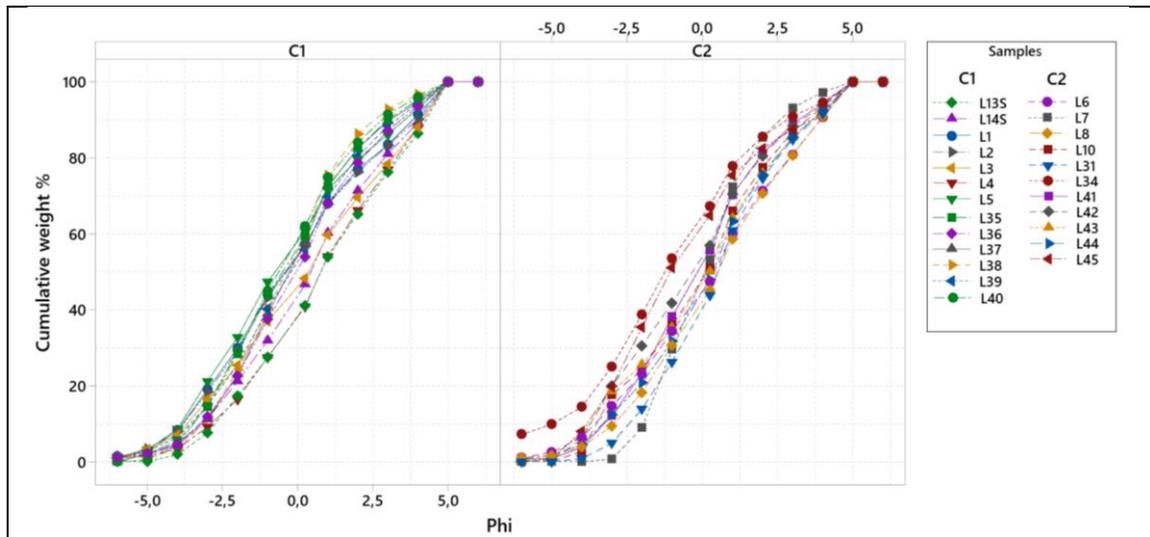


Gráfico 4.5: Curvas de distribución del tamaño de grano de las unidades de la Ignimbrita Curacautín. Se incluyen datos granulométricos obtenidos en el año 2016.

Si analizamos ambas unidades a nivel de selección de sus depósitos, del gráfico 4.6, es evidente que Curacautín 2 tiene un mayor tamaño de grano que Curacautín 1, pero con una selección más pobre en sus depósitos, corroborando lo dicho anteriormente respecto a la heterogeneidad de la unidad superior y la homogeneidad de C1.

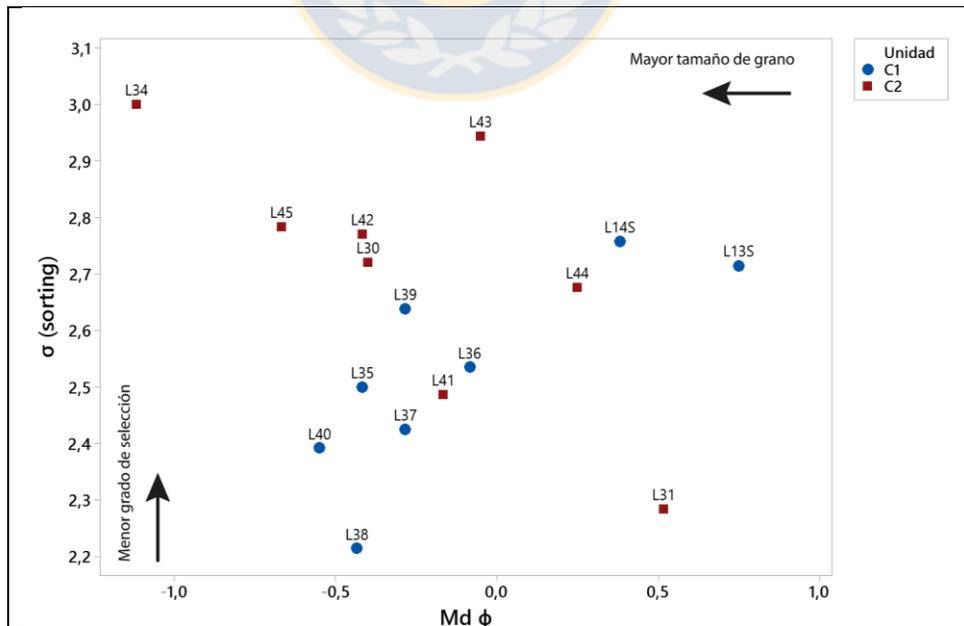


Gráfico 4.6: Selección de las unidades de la Ignimbrita Curacautín. Desviación estándar gráfica versus Mediana gráfica, obtenidos para cada muestra analizada por localidad.

Análogamente, del gráfico 4.7, se ilustra que los depósitos pertenecientes a C1 en promedio tienen un porcentaje menor de partículas >1 mm. Si bien, el contenido más alto se encuentra entre partículas $<0,06$ mm para Curacautín 1 y 2, el rango de tamaño entre $0,06$ mm y 1 mm en cierto modo es igual de importante respecto a la cantidad presente en los depósitos de ambas unidades. Una diferencia a destacar, es que la unidad inferior tiene una concentración mayor de ceniza fina respecto a la unidad superior en la mayoría de sus depósitos, sumado a una uniformidad mayor en la distribución del tamaño de grano de C1.

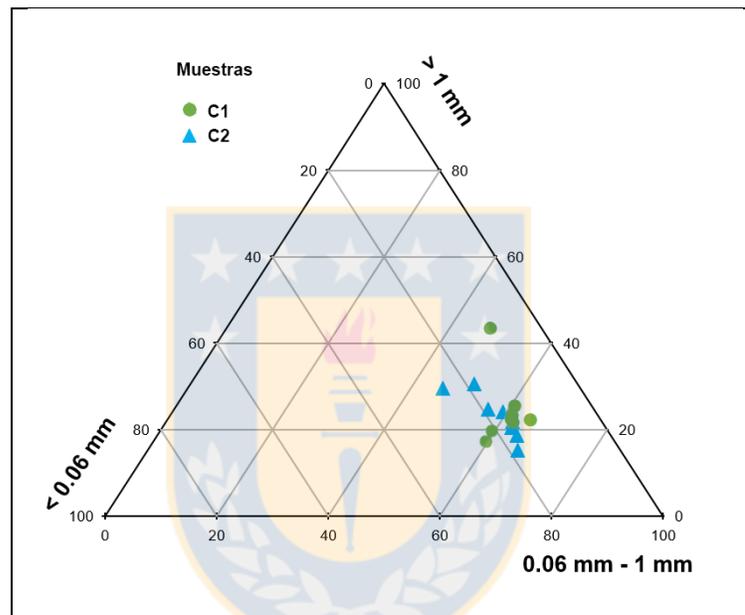


Gráfico 4.7: Diagrama ternario de la distribución del tamaño de grano para C1 y C2. El tamaño de grano se ubica predominantemente en el $<0,06$ mm.

4.3. COMPONENTES

El estudio de componentes de la Ignimbrita Curacautín incluyó las fracciones granulométricas para valores de ϕ desde -6 hasta 3 , es decir, desde 64 mm hasta $0,125$ mm. En términos generales, ésta es más rica en material juvenil (escorias) que en líticos y muy pobre en cristales. También posee contenidos variables de líticos accidentales, según tamaño y muestra analizado. El estudio detallado de componentes se especifica en el Anexo 1. La descripción en detalle de los componentes se presenta a continuación:

4.3.1. Cristales

Los cristales en general representan entre un 2,6% y 8,7% de los componentes, siendo el porcentaje menor para un depósito de la unidad inferior en el sector E (L13S) y el mayor para un depósito de la unidad superior perteneciente al sector W (L42). Estos corresponden a cristales de plagioclasa semitransparentes, tabulares y de tonalidades amarillas según grado de alteración; de olivino reconocido por sus característicos matices verdosos, forma redondeada y en ocasiones subangulosos; y finalmente de cristales de cuarzo, siendo estos últimos los más abundantes, identificados por su color blanco lechoso y apariencia subredondeada, y esfericidad subprismática a esférica.

4.3.2. Juveniles

Los fragmentos juveniles corresponden exclusivamente a escorias. Constituyen entre un 33,1% y un 74,5% de los componentes de la ignimbrita, ambos extremos propios del sector W, pero con la menor fracción para un depósito de Curacautín 2 (L42) y con el mayor porcentaje de material juvenil para un depósito de Curacautín 1 (L40). En general tienen un color negro, aunque a veces son de coloración parduzca al ser alteradas por el clima. Algunas son menos densas que otras con vesículas visibles a simple vista. Suelen presentarse de forma alargada subangulosa y prismática hasta partículas subredondeadas y subdiscoidales, en su mayoría con alta esfericidad.

4.3.3. Accidentales

Los componentes accidentales comprenden entre un 20,7% y 58,2% de la ignimbrita, cuyo rango pertenece al lado W, pero a unidades diferentes; el menor porcentaje de fragmentos accidentales se obtuvo en un depósito de la unidad inferior (L40), y el mayor porcentaje en un depósito de la unidad superior (L42). Se reconocen principalmente líticos de basalto, andesita basáltica y andesita, además de líticos plutónicos de granodiorita. En general son subangulosos y esféricos, siendo levemente alterados. Existe de forma muy local, una andesita oxidada de coloración rojiza, la cual fue reconocida sólo en 2 muestras analizadas, cada una perteneciente a unidades diferentes; en el depósito de C1 ubicado al lado N (L38), y en el depósito de C2 del sector W del volcán (L45).

Un resumen de los principales tipos de líticos se especifica en la tabla 4.2 y el detalle de los porcentajes de líticos para los diferentes depósitos se presenta en la tabla 4.3.

Tabla 4.2: Principales tipos de líticos reconocidos.

Tipos de líticos	Descripción	Principales ocurrencias
Granodiorita	Coloración grisácea y rosada. Frescos a leve o pervasivamente alterados. Son subangulosos a subredondeados y de esfericidad media. Con textura equigranular, presentando alteración arcillosa que rellena microfracturas.	Sector N del centro eruptivo
Basalto	En general, tienen color negro. Frescos a levemente alterados. Son muy angulosos a angulosos y subdiscoidal a esférico. Con textura porfídica. Predomina el olivino y la plagioclasa.	Sector N del centro eruptivo
Andesita basáltica	Coloración varía desde un gris a un pardo negruzco, las tonalidades son producto de alteración. Son subanguloso a subredondeados y esféricos a subprism�ticos. Predomina el cuarzo y el olivino.	Sector N y W del centro eruptivo
Andesita	Coloración parduzca con alteración moderada. Son anguloso a subanguloso en su mayoría esféricos. Con textura afanítica. Alto contenido de sílice.	Sector N del centro eruptivo

Tabla 4.3: Detalle de conteo de componentes accidentales para las distintas muestras de la Ignimbrita Curacautín.

Muestra	Unidad	Sector	Granodioritas %	Basaltos %	Andesita basáltica %	Andesita %
L13S	C1	E	6,1	6,2	82,8	4,9
L14S	C1	E	2,0	3,9	91,3	2,8
L30	C2	W	-	3,3	94,6	2,1
L31	C2	W	0,2	2,1	95,9	1,8
L40	C1	W	1,3	3,1	94,6	0,9
L41	C2	W	3,4	1,4	94,1	1,0
L42	C2	W	-	4,1	91,4	4,4
L43	C2	W	-	-	100	-
L44	C2	W	-	-	100	-
L45	C2	W	0,3	1,5	93,6	4,6
L34	C2	N	1,9	0,9	95,8	1,4
L35	C1	N	5,6	3,9	87,3	3,1
L36	C1	N	2,9	6,5	86,6	4,0
L37	C1	N	4,5	5,2	87,7	2,6
L38	C1	N	7,2	5,4	83,2	4,2
L39	C1	N	9,9	9,7	76,0	4,4

Los líticos plutónicos, tal como se muestra en la tabla 4.2, se reconocen mayoritariamente en el lado N del volcán, pero estos también están presentes en el lado E y W. Sin embargo, en la tabla 4.3, se señala que la ausencia de granodiorita es exclusivamente en depósitos del sector W,

pertenecientes a Curacautín 2. Los líticos volcánicos, predominantemente andesita basáltica, se reconocen en todas las muestras analizadas. El basalto y la andesita tienen una abundancia mucho menor, incluso no fueron observadas en muestras de C2 ubicadas en el lado W del volcán. Es preciso recordar que estos depósitos presentan un alto grado de alteración, dificultando así el análisis de componentes.

El análisis de componentes resulta útil abordarlo desde las variaciones verticales presentantes entre los depósitos de las unidades de la ignimbrita. Una forma de representar estas diferencias es a través de columnas estratigráficas, tanto para el lado E (Figura 4.3), lado N (Figura 4.4) y lado W (Figura 4.5) que incluyan la distribución de sus componentes y de la granulometría vista en la sección 4.2. El detalle de los histogramas y datos utilizados están detallados en el Anexo 3.

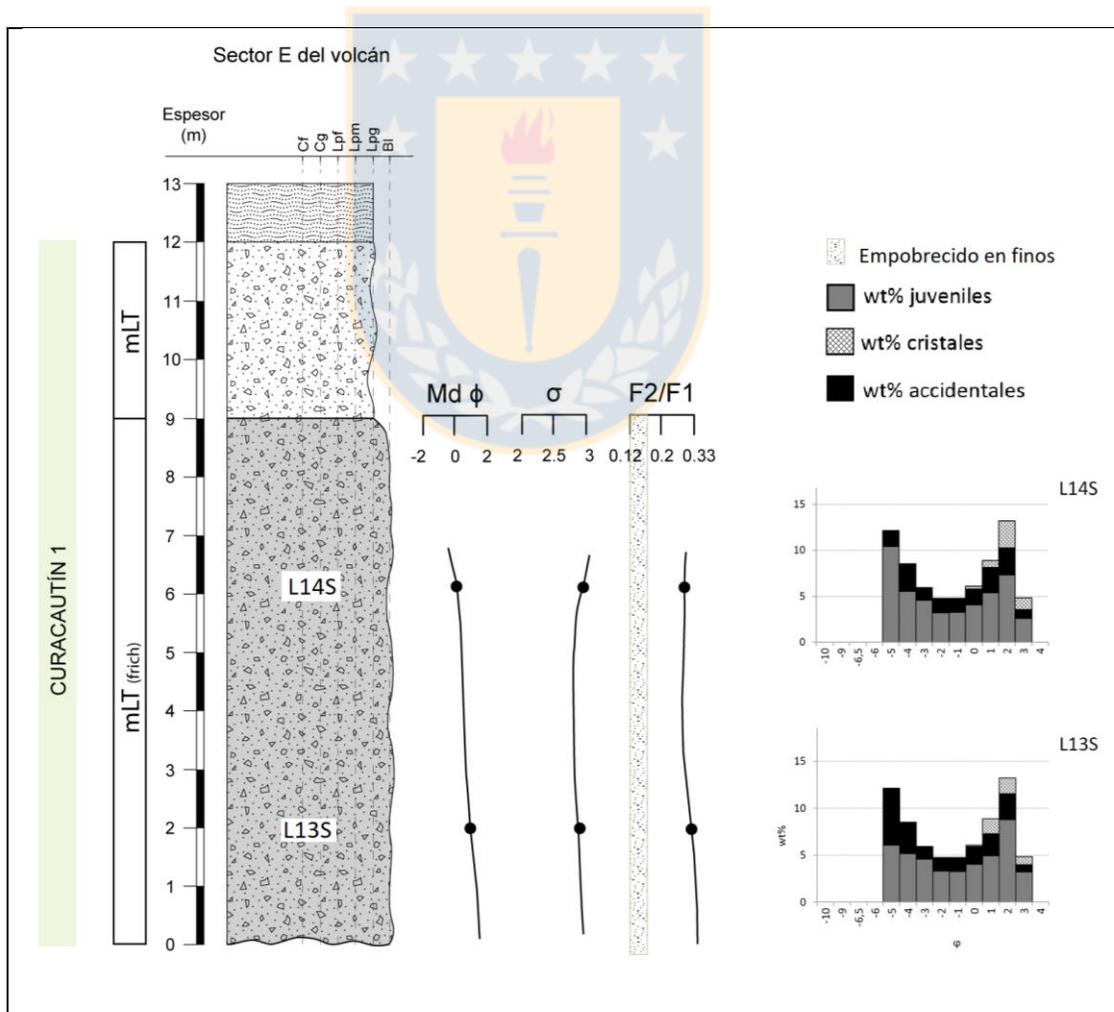


Figura 4.3: Columnas estratigráfica generalizada sector E. Posición estratigráfica de las muestras analizadas, datos de mediana ($Md \phi$), selección σ (sorting) y la relación $F2/F1$.

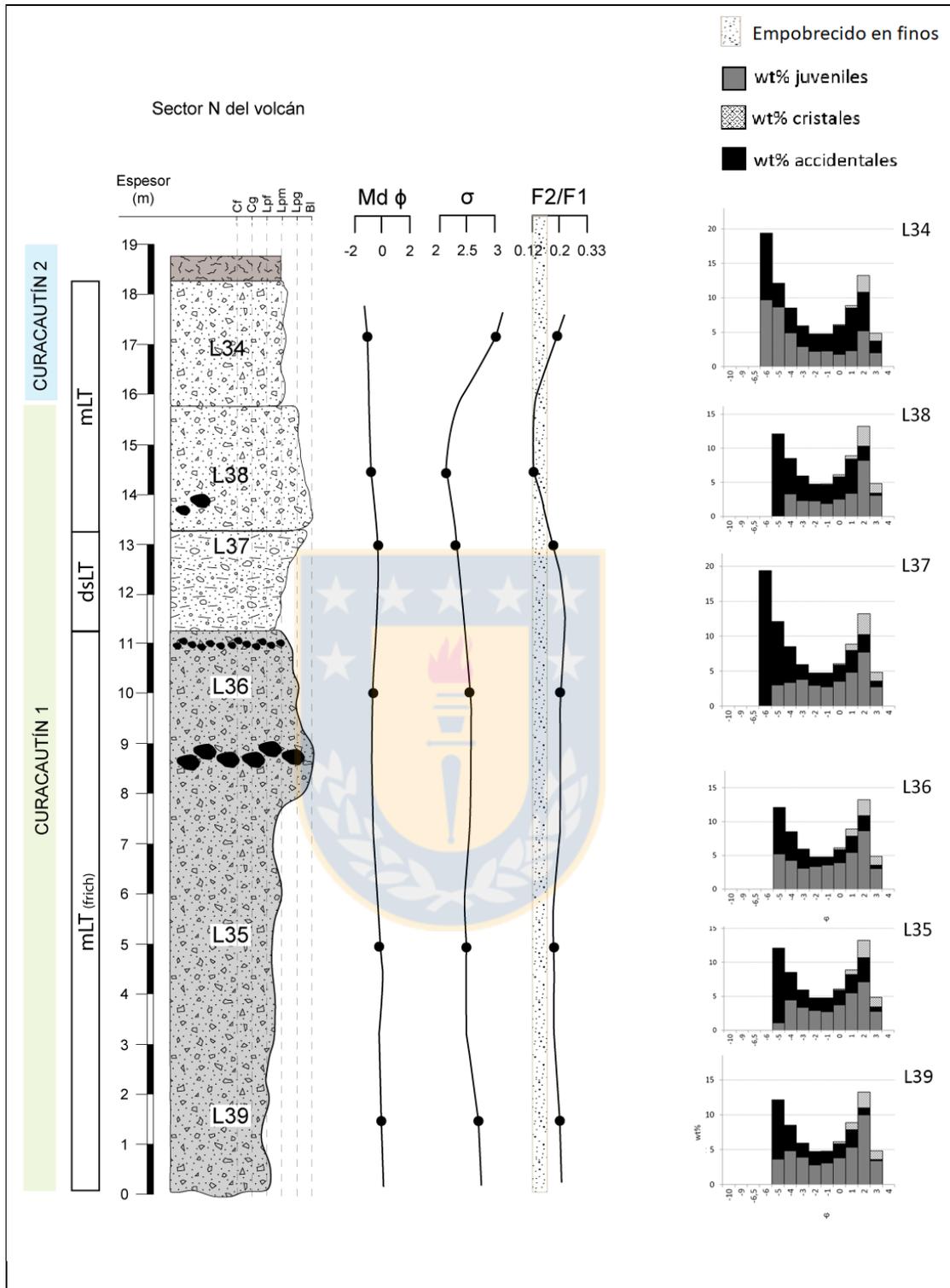


Figura 4.4: Columnas estratigráfica generalizada sector N. Posición estratigráfica de las muestras analizadas, datos de mediana (Md ϕ), selección σ (sorting) y la relación F2/F1.

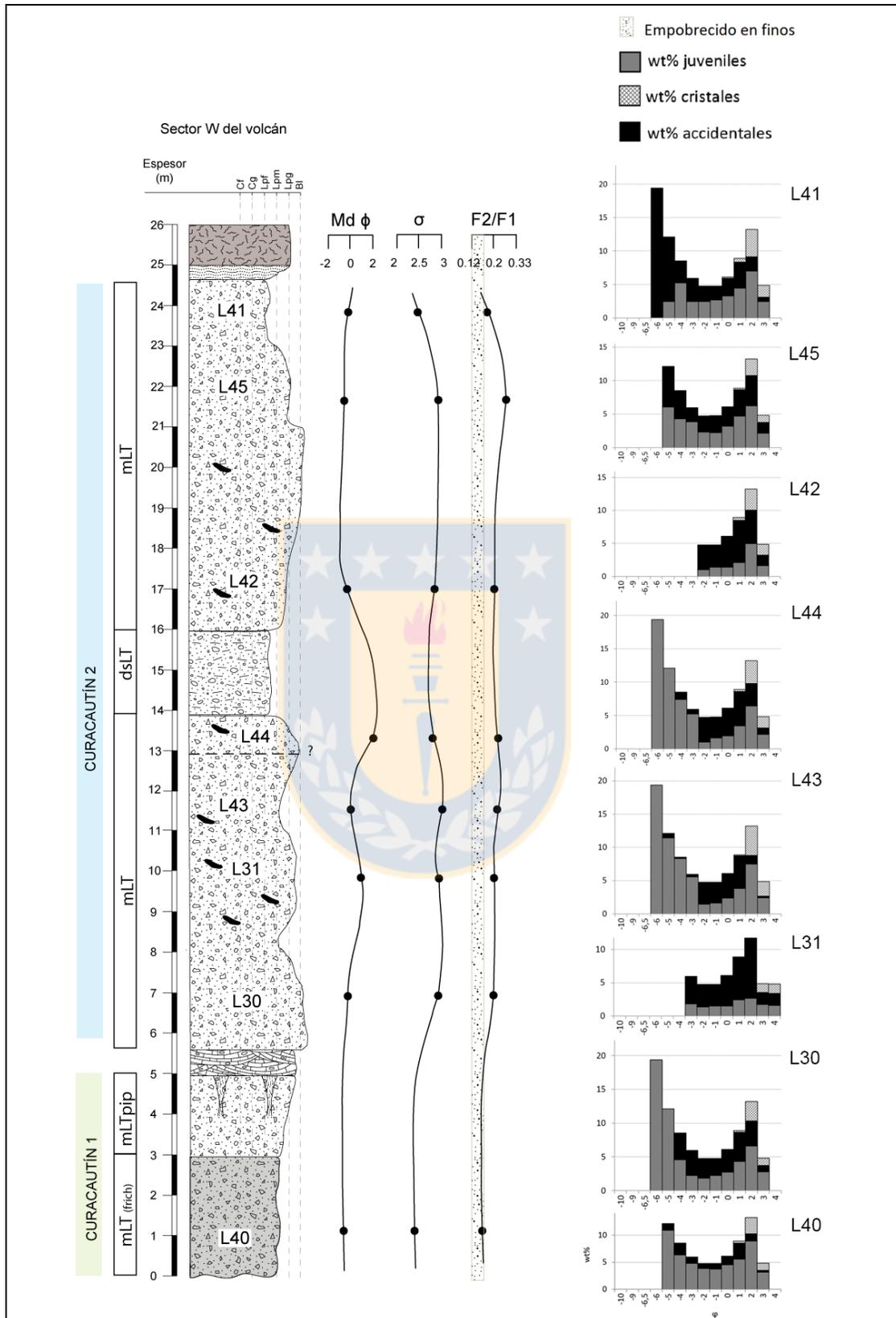


Figura 4.5: Columnas estratigráfica generalizada sector W. Posición estratigráfica de las muestras analizadas, datos de mediana ($Md \phi$), selección σ (sorting) y la relación F2/F1.

En el flanco E (Figura 4.3), se define la facies $mLT_{(frich)}$ en la base de la unidad inferior, cuyos componentes tienen mayor porcentaje de accidentales hacia la parte inferior del depósito, variando a un aumento de juveniles en partículas >32 mm (-5ϕ) en la parte superior. Esta presencia de bloques escoriáceos se hace más abundante hacia techo, coincidiendo con una mediana hacia partículas gruesas seguida por una menor selección. La relación de F2/F1 indica que, pese a la variación granulométrica, la facies $mLT_{(frich)}$ mantiene un enriquecimiento en material fino. El contenido de cristales es similar a lo largo de la unidad.

Hacia el N (Figura 4.4) fueron definidas 3 facies; $mLT_{(frich)}$ para la base de Curacautín 1, en la cual sus componentes varían sutilmente respecto al contenido de accidentales, presentando un mayor porcentaje de bloques líticos acompañado de una mejor selección y un leve empobrecimiento de finos, para luego hacia los 10 m cerca de un lente de bloques, aumentar el contenido de escorias. Luego, la facies $dsLT$ de C1 tiene un alto porcentaje de partículas accidentales, hasta un 20% para líticos tamaño bloque. Asimismo, la selección del depósito aumenta. Hacia techo, se define la facies mLT en ambas unidades, donde la gran diferencia entre C1 y C2 es que la unidad inferior tiene una mejor selección y está empobrecida en material fino. La granulometría de los componentes es de mayor tamaño en C2, siendo predominante el material accidental por sobre el alto contenido en escorias >16 mm (-4ϕ), con una selección muy pobre. Por su parte, el contenido de cristales se mantiene relativamente constante a lo largo de la ignimbrita.

En el caso del sector W (Figura 4.5) se define en la parte inferior del depósito la facies $mLT_{(frich)}$ de Curacautín 1 cuyo material juvenil predomina con creces por sobre las partículas accidentales. Luego se define la facies mLT en la unidad superior, presentando una selección más pobre y un tamaño de grano similar a C1, pero marcado por un aumento en el contenido de partículas gran tamaño (bombas escoriáceas). Hacia la parte superior, mLT presenta más cristales, mantiene la mala selección del depósito y es acompañada de la presencia de carbón. Existe un cambio abrupto en la mediana de la granulometría entre L43 y L44 (posible contacto), esta tendencia hacia una granulometría más fina fue observada de forma local, en conjunto con una mejor selección del depósito, pero sin variar mucho en el contenido de material fino. En el techo de la unidad el carbón se hace más ausente y el depósito pasa de una mala selección a una moderada, junto con un empobrecimiento en partículas finas. El porcentaje de material accidental aumenta

considerablemente hacia el techo de la unidad, siendo reconocida la presencia de líticos tamaño bloque. El contenido en cristales no varía de forma evidente.

Complementando lo anterior, la variación de los componentes se puede graficar según las facies definidas en cada sector. Del gráfico 4.8 se observa que el material juvenil representa un 74,5% de la facies mLT(frích) de la unidad inferior en el sector W, y que es esta facies la que tiene los porcentajes más altos de partículas juveniles. De igual forma, queda en evidencia que la facies mLT de Curacautín 2 reconocidas en el flanco W, es la más heterogénea respecto al contenido de escorias de sus depósitos, variando entre un 40 y un 65% aproximadamente. La facies mLT definida en la unidad inferior del lado N, tiene cerca de un 55% de material juvenil y la facies dsLT de la misma unidad en este sector presenta alrededor de un 60%.

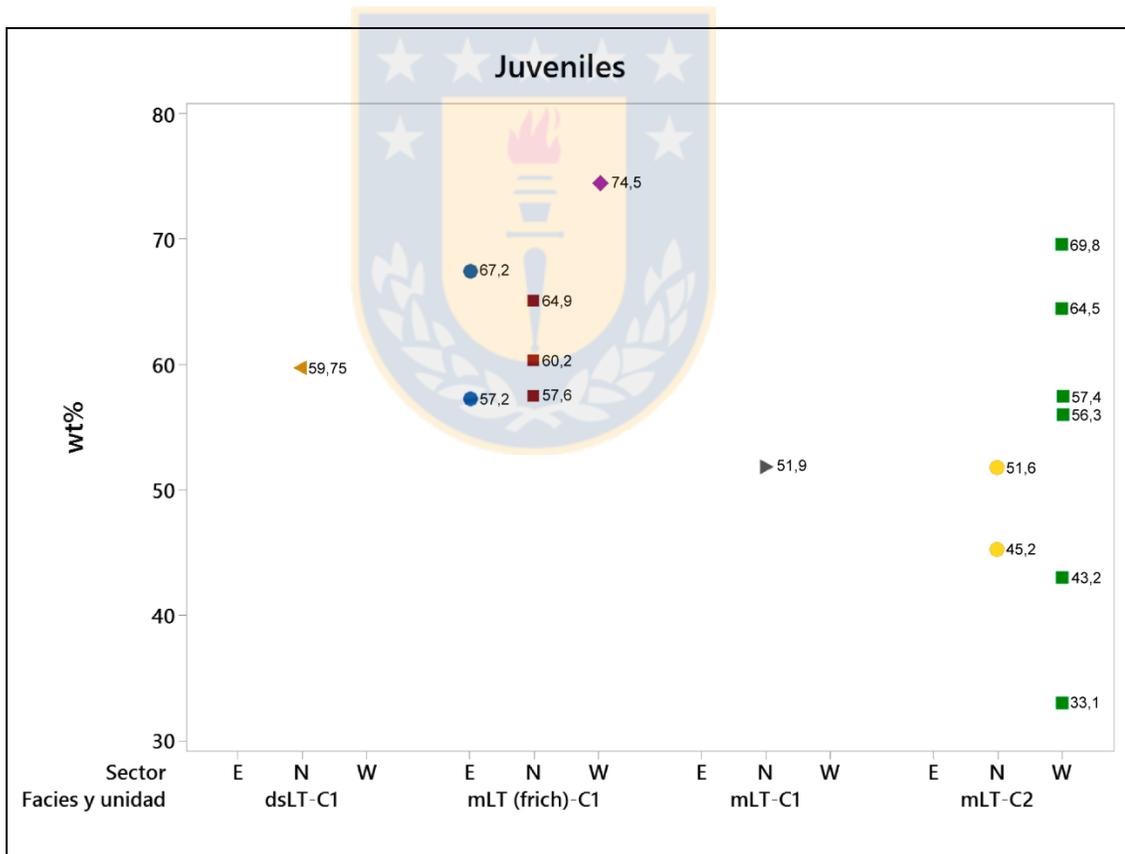


Gráfico 4.8: Diagrama de caja del material juvenil de cada facies según localidad. Facies mLT(frích) de la unidad inferior del lado W tiene el mayor porcentaje de juveniles.

Respecto al material accidental, en el gráfico 4.9 se ilustra que el mayor porcentaje de estos está distribuido en la facies mLT de la unidad superior en el flanco W del volcán, siendo a su vez, los

depósitos con mayor variación en el contenido de accidentales con cerca de un 25 a un 60%. El alto porcentaje de accidentales también puede ser visto la facies mLT de C2 hacia el sector N. Esta misma facies, pero definida para la unidad inferior cuenta con cerca de un 45% de material accidental. Por su parte, la facies mLT_(frich) de C1 tiene los valores más bajos en el contenido de partículas accidentales, sobretodo en el flanco W con apenas un 20%. Mientras que la facies dsLT de la unidad inferior tiene alrededor de un 36%.

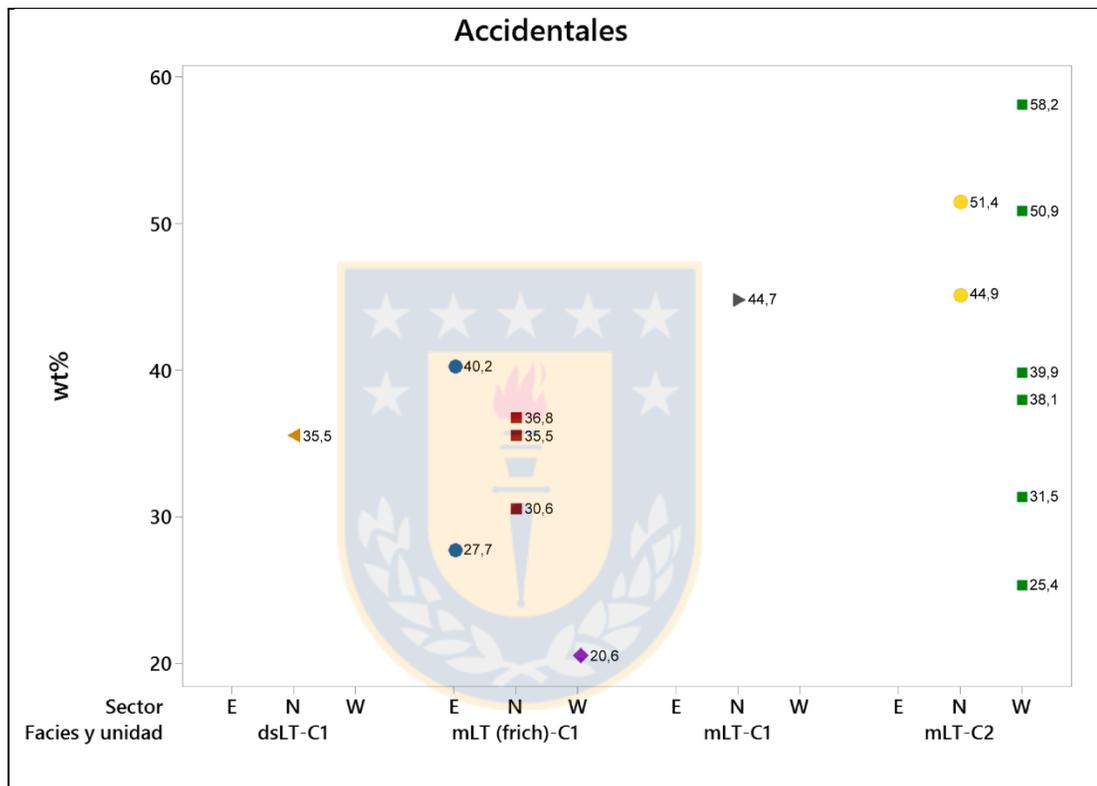


Gráfico 4.9: Diagrama de caja del material accidental de cada facies según localidad. Facies mLT de la unidad inferior tiene el mayor porcentaje de juveniles hacia el lado W del volcán.

Por último, en el gráfico 4.10 se muestra el contenido de cristales, cuyo valor más alto está dado en la facies mLT perteneciente a la unidad superior del flanco W con cerca de 4% para algunos depósitos y superando el 8% en otros. En contraste, el valor más bajo es de la facies mLT_(frich) de C1 del lado E, variando entre un 2,6 y un 5%. Mientras que hacia el flanco W tiene un porcentaje similar a la facies dsLT del lado N con cerca de un 5%. La facies mLT de la unidad superior presenta una gran diferencia en la cantidad de cristales en los depósitos del lado N y W. Mientras que la facies mLT, tanto en C1 como C2, tienen contenidos bajos de cristales con alrededor de un 3,5%.

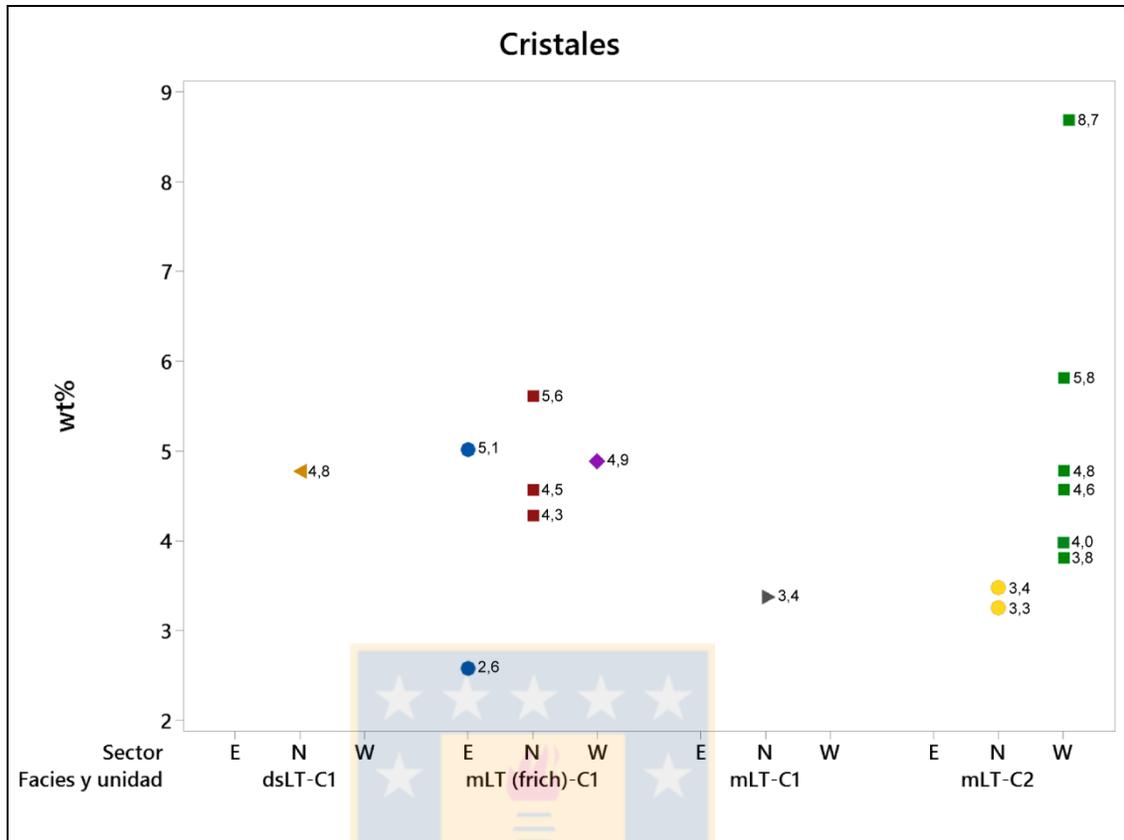


Gráfico 4.10: Diagrama de caja del contenido de cristales de cada facies según localidad. Facies mLT de la unidad superior tiene el mayor porcentaje de cristales en el sector W del volcán.

4.4. VARIACIONES RADIALES

Para realizar una comparación de los componentes de cada afloramiento, se pueden establecer diferencias de los valores obtenidos en el conteo de los mismos según la distancia desde la fuente, es decir, desde el centro eruptivo. Estas variaciones son útiles para caracterizar los flujos según su distribución areal, proporcionando información acerca de las diferencias texturales, grados de alteración y los mecanismos de transporte para las corrientes de densidad piroclásticas.

Además, es importante establecer cómo varía el grado de selección de los depósitos y la presencia de partículas más finas según la distancia respecto a la fuente eruptiva (Gráfico 4.11) para poder comprender la importancia del proceso de elutriación durante el transporte y emplazamiento de los flujos piroclásticos.

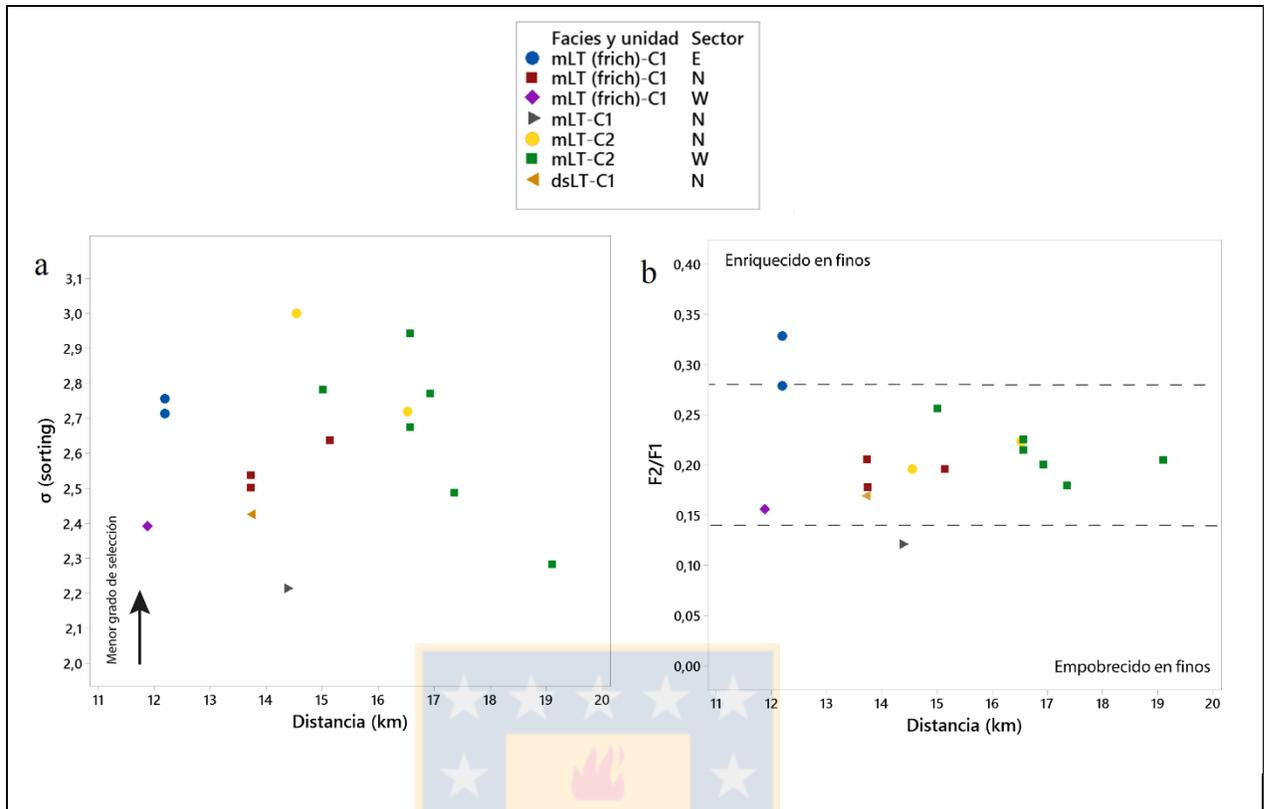


Gráfico 4.11: Relación F2/F1 versus la distancia de la fuente eruptiva. Se analiza tanto las facies definidas como el sector donde se encuentran. a) σ (sorting) versus distancia. b) Relación F2/F1 versus distancia.

4.4.1. Variaciones radiales del sector E

Los depósitos del lado E del volcán registran a la unidad inferior y superior de la Ignimbrita Curacautín, separados por una distancia menor a 80 m. Curacautín 2 se encuentra a 12,19 km del centro eruptivo y Curacautín 1 a 12,20 km aproximadamente. Al identificar depósitos de ambas unidades muy cerca uno de otro es difícil lograr establecer variaciones radiales entre unidades para el flanco E del volcán. Sin embargo, para C1 a nivel de componentes (Fotomicrografía 4.1), las partículas juveniles son las más abundantes entre un 57 y 67%, con 2 a 5% de cristales, y entre un 27 y 40% de material accidental, siendo las partículas de andesita-basáltica las más abundantes (Anexo 3). Además, se reconocieron granodioritas, basaltos y andesitas, cada uno con porcentajes menores a 6% del total de material accidental.



Fotomicrografía 4.1: Mineralogía de la muestra L13S del sector E. Muestras con abundante material juvenil y sin alteración.

En el gráfico 4.11a no se destaca mayor diferencia respecto al grado de dirección y la distancia de la fuente, ya que ambos depósitos están muy proximales entre sí. Por otra parte, del gráfico 4.11b se observa que los depósitos del lado E que presentan la facies $mLT_{(frich)}$ en Curacautín 1 están enriquecidos en partículas finas si se comparan con la misma facies ubicados al sector N y W del volcán a una distancia menor a 15 km. Los líticos volcánicos del sector E no exhiben alteración en la mayoría de los clastos, lo cuales conservan su coloración gris oscura y alta angularidad (Anexo 1).

Considerando la proximidad de ambas unidades (Figura 4.6), a grandes rasgos, los depósitos se hacen cada vez más finos al aumentar la distancia desde la fuente, pero esta observación se realiza comparando la diferencia granulométrica entre C1 y C2, ya que espacialmente ambos depósitos están muy cerca uno del otro.

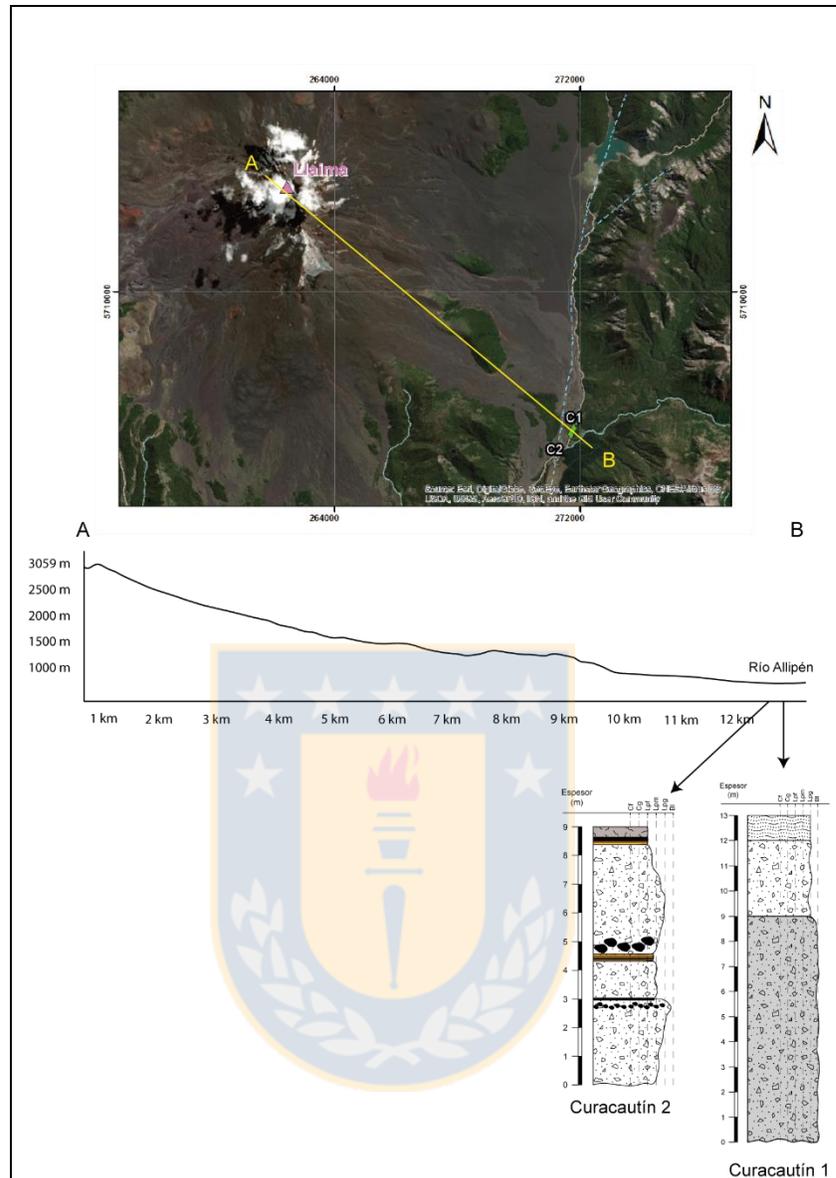
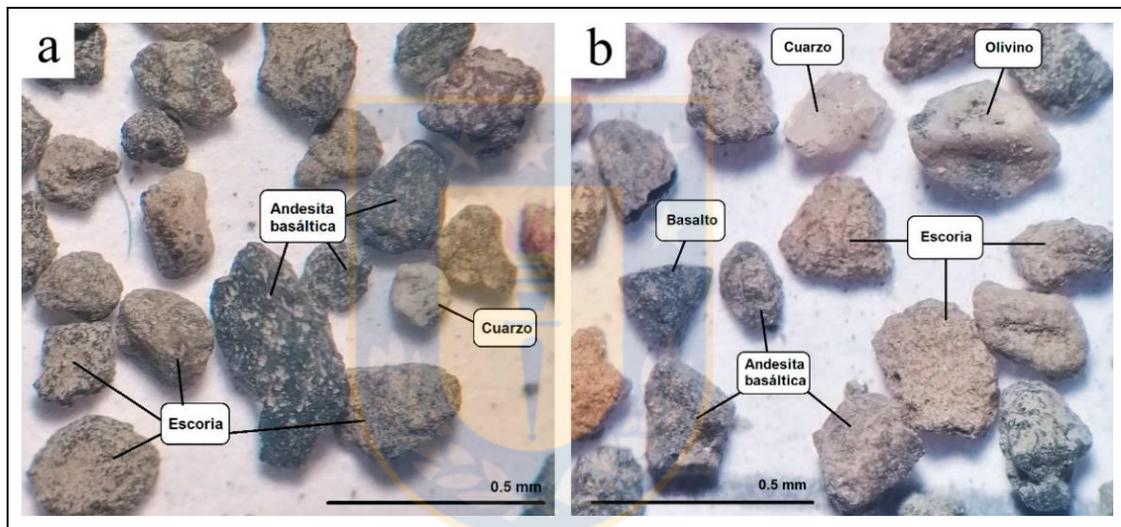


Figura 4.6: Variaciones radiales en el sector E del volcán Llaima. A mayor distancia desde la fuente los depósitos tienen aumento en el contenido de material fino. Se reconocen ambas unidades de la Ignimbrita Curacautín.

4.4.2. Variaciones radiales sector N

Los depósitos estudiados en el sector N del volcán, en general corresponden a Curacautín 1, a excepción de un afloramiento de Curacautín 2 ubicado a 14,55 km del volcán. El flanco N exhibe una mejor selección y en promedio presenta un material piroclástico más grueso. A nivel de componentes (Anexo 3), C1 (Fotomicrografía 4.2a) tiene entre un 51 y un 64% de escorias

juveniles, además de 3 a 5% en cristales y 30 a 44% de material accidental, donde se destaca la abundante presencia de partículas andesita-basálticas (75 a 87%), granodioritas (2 a 9%), andesitas (2 a 4%) y basaltos (4 a 9%). Mientras que C2 (Fotomicrografía 4.2b) tiene cerca de un 3% en cristales y un porcentaje de material accidental mayor al juvenil, con un 51% versus 45%, respectivamente. Pese a tener clastos de granodioritas, estos no superan el 2% del material accidental de la unidad superior, teniendo asimismo un porcentaje menor al 1% para basaltos y andesitas, con absoluta predominancia de partículas de andesita-basáltica con un 95% del material accidental. Los clastos no evidencian un alto grado de alteración, tienen mayor redondez y esfericidad que las partículas del lado E (Anexo 1).



Fotomicrografía 4.2: Mineralogía de las muestras del sector N. a) Muestra L36 (C1) con mayor material juvenil que accidental. b) Muestra L34 (C2) donde predomina material accidental.

Considerando el gráfico 4.11a, se estima que el grado de selección de los depósitos del lado N del volcán tiende a empeorar según mayor sea la distancia del centro eruptivo, aunque si se evalúa la facies mLT de la unidad inferior estas muestran una buena selección, comparadas con la misma facies presente en la unidad superior. El menor grado de selección pertenece a un depósito de Curacautín 2 donde se define la facies mLT a menos de 15 km del centro eruptivo. Ahora bien, la relación F2/F1 del gráfico 4.11b, señala que las facies mLT_(frich) de C1 y mLT de C2 del lado N mantienen su contenido en finos relativamente constante a medida que se alejan de la fuente, mientras que la facies mLT de la unidad inferior en este sector es la única que muestra un empobrecimiento en finos.

A medida que se aleja del centro eruptivo (Figura 4.7), la unidad inferior presenta más retrabajo y reduce la presencia de bloques, además pasa de una matriz rica en ceniza fina a una matriz de ceniza gruesa a lapilli medio, mientras que el depósito de la unidad superior tiene mayor abundancia de bloques y una media de lapilli grueso.

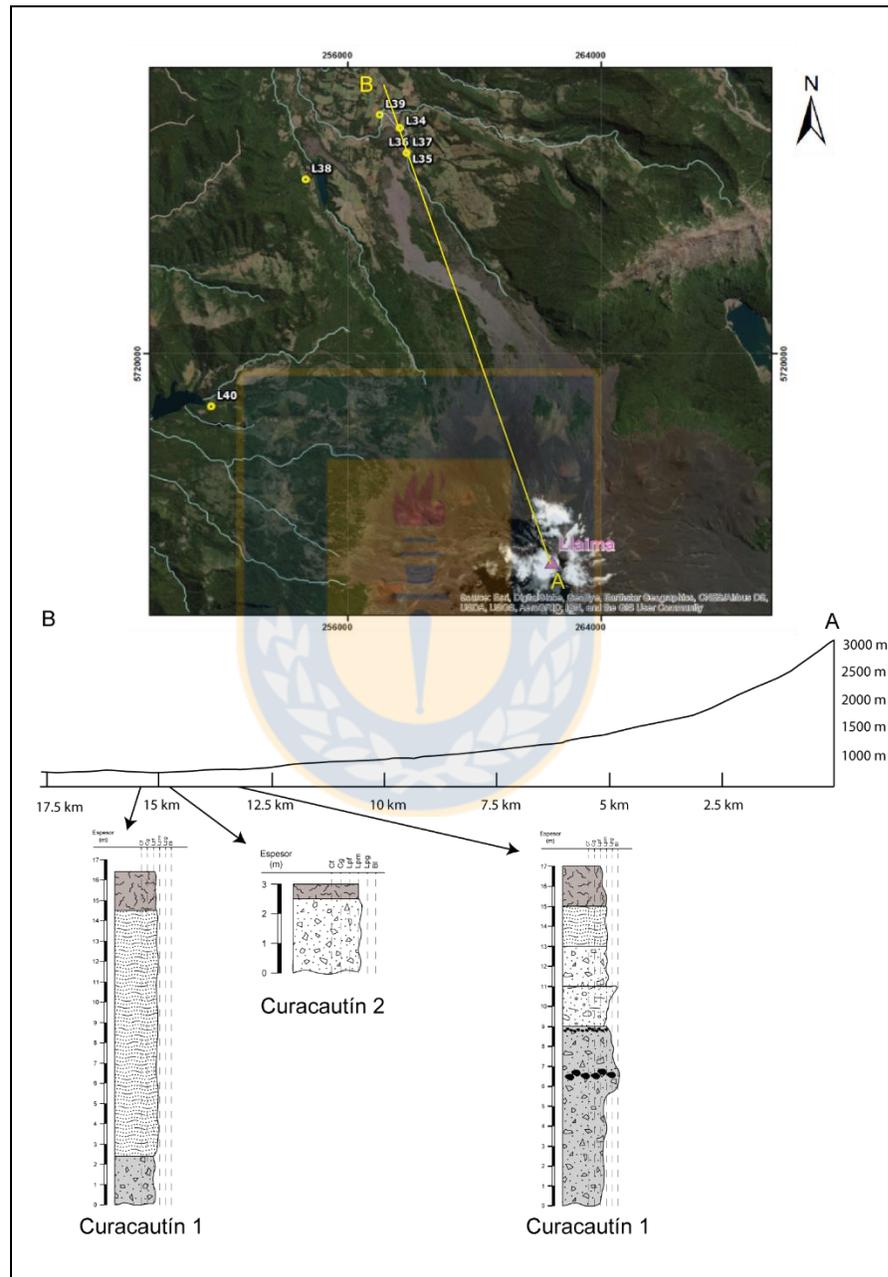
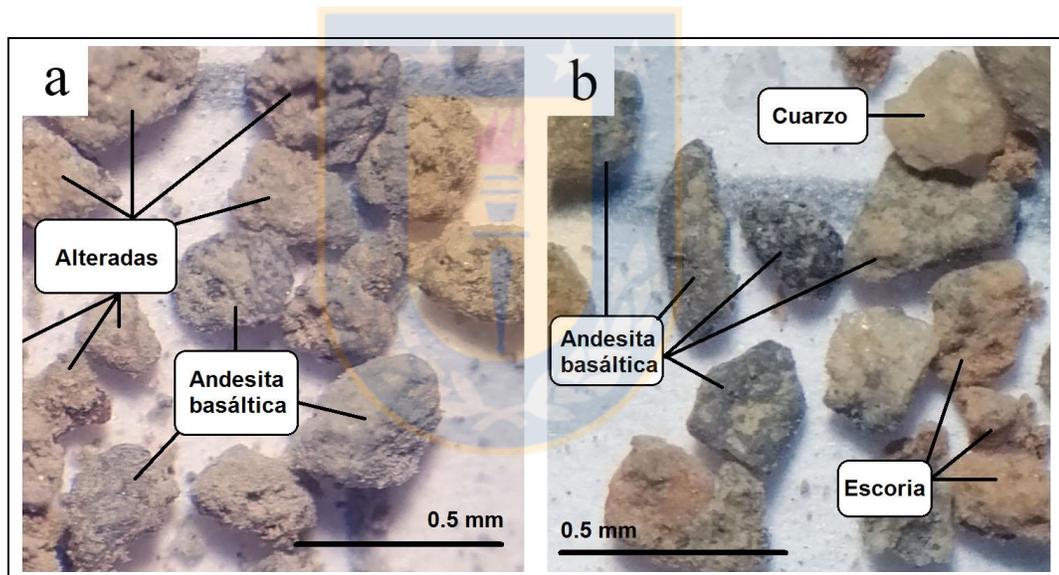


Figura 4.7: Variaciones radiales en el sector N del volcán Llaima. A mayor distancia desde la fuente los depósitos se pierde la abundancia de bloques y aumenta el retrabajo. Se reconocen ambas unidades de la Ignimbrita Curacautín.

4.4.3. Variaciones radiales sector W

En general, los afloramientos vistos en el lado W del volcán corresponden en su mayoría a depósitos de Curacautín 2 y presentan un alto grado de alteración con coloración parduzca, y un mayor grado de esfericidad y redondez (Fotomicrografía 4.3a). Los componentes de C2 (Anexo 3) al lado W del volcán tienen entre un 33 y 69% de material juvenil versus un 25 a 58% de material accidental, además de un 4 a 8% en cristales (Fotomicrografía 4.3b). Dentro del porcentaje de partículas accidentales, predominan las andesita-basálticas con un 91 y 95%, en comparación con los basaltos y andesitas que corresponden entre el 1 y 4%. A pesar de haber observado granodioritas, el porcentaje de las mismas es menor a un 3%, y en general, están ausentes en la mayoría de los depósitos de C2 del lado W.



Fotomicrografía 4.3: Mineralogía de las muestras del sector W. a) Muestra L42 (C2) con clastos alta redondez y esfericidad, alterados hidrotermalmente. b) Muestra L43 (C2) donde predomina material accidental.

Del gráfico 4.11a, se muestra que la facies mLT de la unidad superior definida en el flanco W del volcán mejoran el grado de selección a medida que se alejan de la fuente eruptiva. Análogamente, del gráfico 4.11b se infiere que tanto las facies mLT_(firich) de Curacautín 1, como la facies mLT de Curacautín 2 mantienen su contenido en partículas finas independiente de la distancia respecto al centro eruptivo, siendo la facies mLT de C2 la que presenta menor contenido de material fino.

Al ser los depósitos más distales del volcán (Figura 4.8) ubicados a 15 y 19 km del centro eruptivo, es de esperar que sus clastos presenten mayor redondez y esfericidad que son evidencias de un mayor transporte. En estos depósitos se reconoce la presencia de carbón que se intensifica mientras el depósito esté más alejado de la fuente.

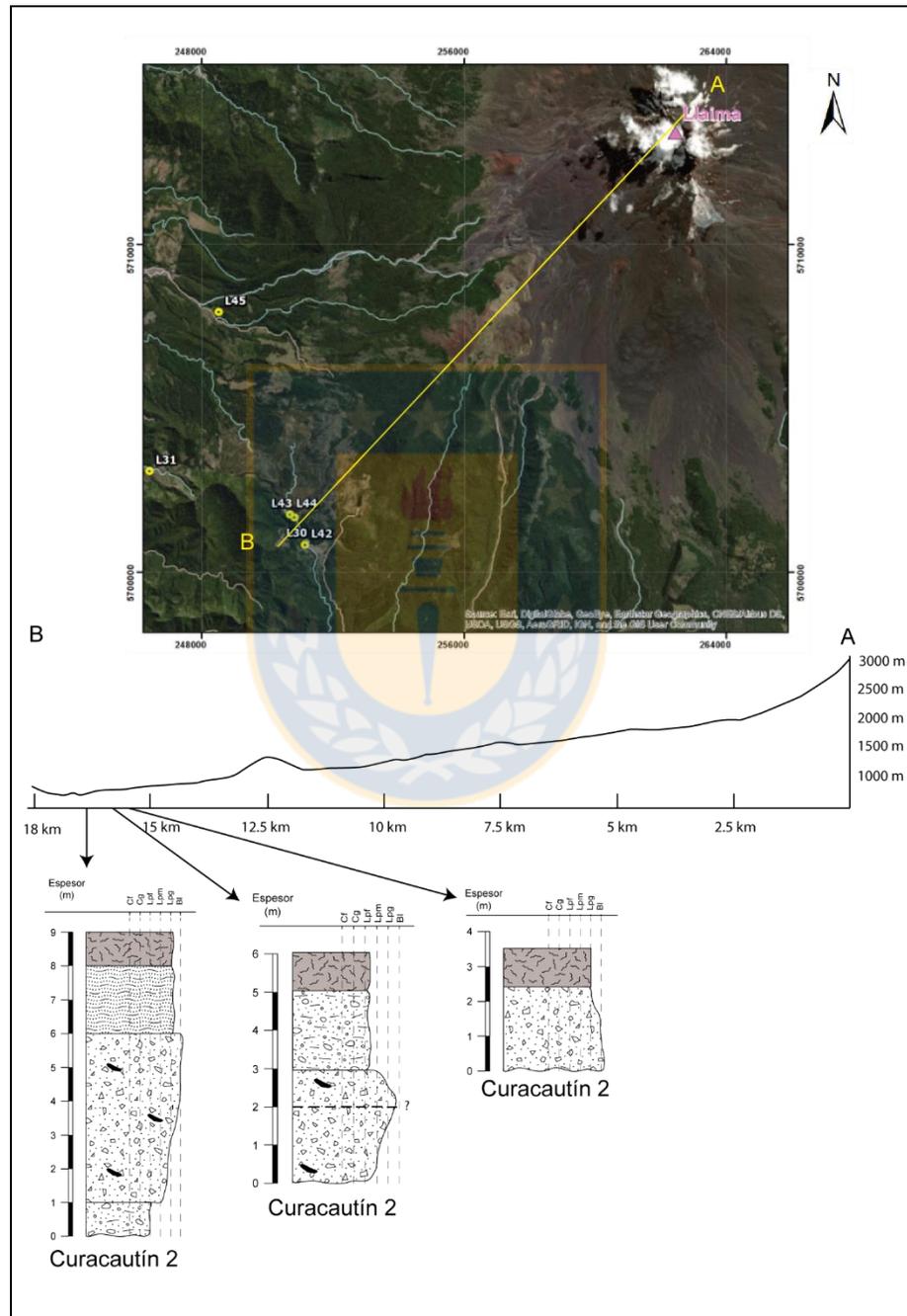


Figura 4.8: Variaciones radiales en el sector W del volcán Llaima. A mayor distancia desde la fuente abunda más el carbón en la unidad superior de la Ignimbrita Curacautín.

5. DISTRIBUCIÓN Y VOLUMEN DE LA IGNIMBRITA CURACAUTÍN

5.1. GENERALIDADES

Moreno y Naranjo (1991) estimaron un volumen de 24 km^3 (no-DRE) para el extenso depósito de flujo piroclástico de la Ignimbrita Curacautín, asumiendo que tenían una extensión de 2.200 km^2 sobrepasando la ciudad de Temuco y Quepe hacia el W del volcán, las localidades de Los Laureles, Cunco, Villa García y Melipeuco hacia el S, y por el lado N, la ciudad de Curacautín y Lautaro (hacia el NW). El volumen calculado no considera la densidad de roca equivalente o DRE. Debido a que durante la campaña de terreno de este trabajo los depósitos distales de la Ignimbrita Curacautín no pudieron ser reconocidos en las localidades antes mencionadas, se decide obtener una nueva estimación de volumen considerando un área del depósito más acotada a los alrededores del volcán, cuyos afloramientos proximales fueron muestreados y sometidos a análisis sedimentológico respectivo.

Existen factores como la topografía y características de la superficie por donde circulan los flujos, que determinan hacia dónde y cómo se moverán. La importancia de la forma del volcán, el relieve topográfico circundante y la presencia de cuerpos de agua es relevante para la distribución de la ignimbrita. Durante la erupción de la Ignimbrita Curacautín, la presencia de capas de hielo de gran espesor aún dominaba el paisaje. No existen cálculos respecto al volumen de estas capas y, además, es difícil estimar de forma acertada la cantidad de material fino que por procesos como la elutriación o la formación de una nube co-ignimbrítica no fueron depositados en el mismo lugar, por esta razón, se genera un alto grado de incertidumbre respecto al volumen original de material eruptado.

La metodología ocupada para el cálculo de volumen se basa en el trabajo de Troncoso (2012) acerca de la Ignimbrita Pudahuel. Este autor se refiere a los depósitos de flujo piroclástico como no continuos y utiliza una “superficie específica de acumulación” para sus cálculos, la cual representa la superficie de terreno que habría estado originalmente cubierta por los flujos. Es necesario tener

en cuenta que los cálculos realizados a continuación representan un volumen estimativo actual que, en el contexto del propio evento eruptivo, el margen de error puede ser importante.

5.2. DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE LA IGNIMBRITA CURACAUTÍN

En las zonas más distales al volcán, a partir de 20 km alejados del centro eruptivo, no se reconocieron depósitos de la Ignimbrita Curacautín, en cambio, solo se pudieron observar depósitos retrabajados (Figura 5.1).

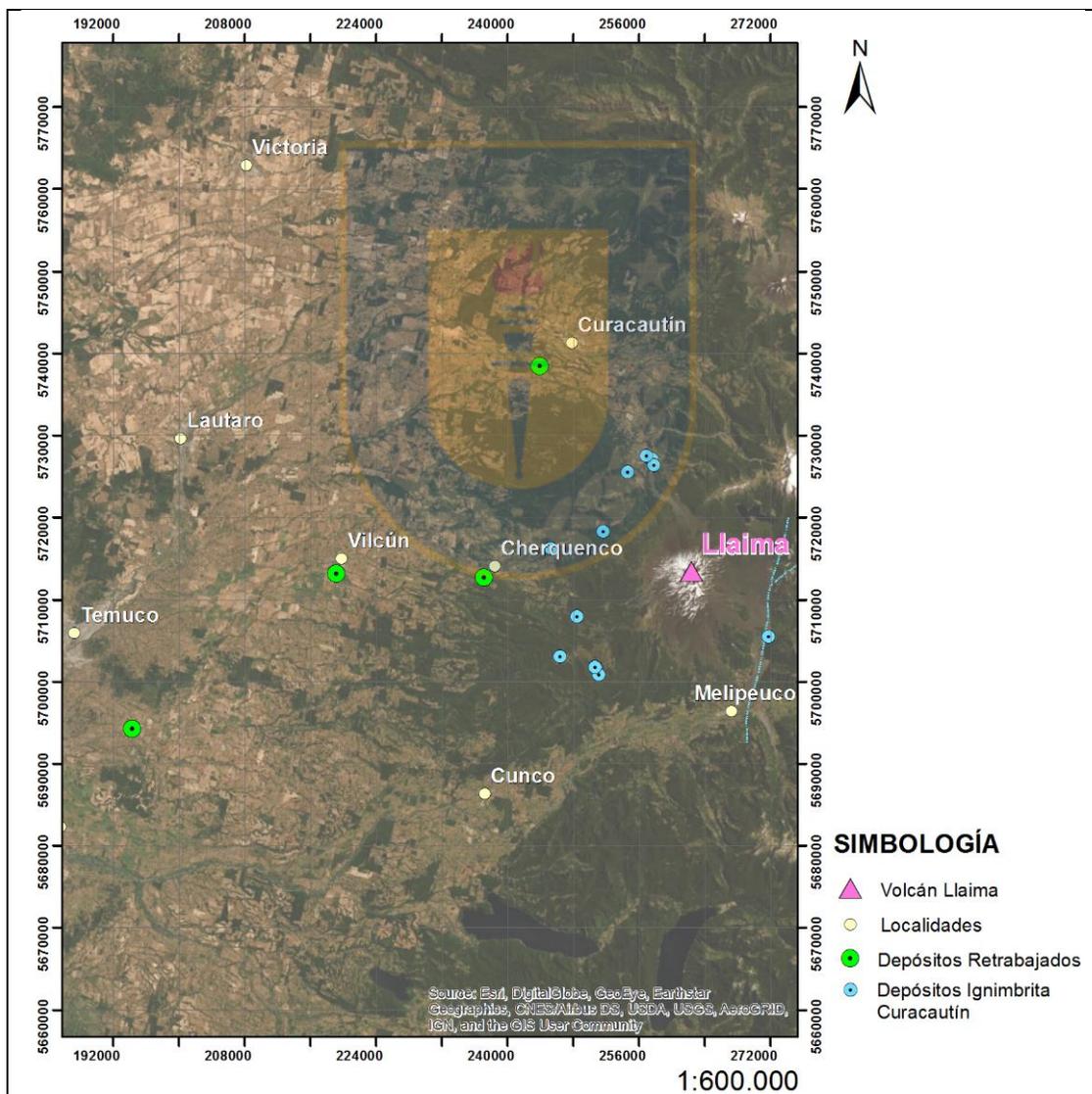


Figura 5.1: Mapa de los depósitos retrabajados en zonas distales. Ubicación de los depósitos de retrabajo reconocidos en la campaña de terreno del 2019. Coordenadas geográficas en UTM dentro del huso 19S en sistema WGS84.

No se tiene certeza si estos depósitos retrabajados distales son producto de la erosión de la propia ignimbrita o si pertenecen a otro tipo de depósito, ya que no existe una relación estratigráfica evidente al estar ubicados en áreas más alejadas. Por consiguiente, el área estimada para la Ignimbrita Curacautín quedará restringida a aquellos depósitos proximales sometidos a diversos análisis durante esta investigación y que justifican su pertenencia a la ignimbrita. Pese a lo anterior, no se descarta el hecho de que existan depósitos de la Ignimbrita Curacautín en zonas distales al centro eruptivo, tal como han sido mencionados en trabajos anteriores.

Teniendo en cuenta las observaciones sobre los depósitos visitados en este trabajo, sumado a la información recopilada durante la campaña de terreno del año 2016, se confeccionó un mapa de los afloramientos actuales de la Ignimbrita Curacautín (Figura 5.2). Este mapa extrapola el área de los depósitos en la topografía, ya que el acceso hacia propiedades privadas fue bastante restringido y la mayoría de los afloramientos fueron observados en bordes de camino. Por esta razón, el área se delimita siguiendo la morfología de los valles, curvas de nivel de la topografía y depósitos reconocidos en terreno.

Una vez delimitada el área de los depósitos actuales de la Ignimbrita Curacautín, es importante definir el área total que cubren estos afloramientos. En este caso, se estima que el área actual cubierta por los flujos es de 90,6 km² aproximadamente, a distancias que no superan los 20 km desde el volcán.

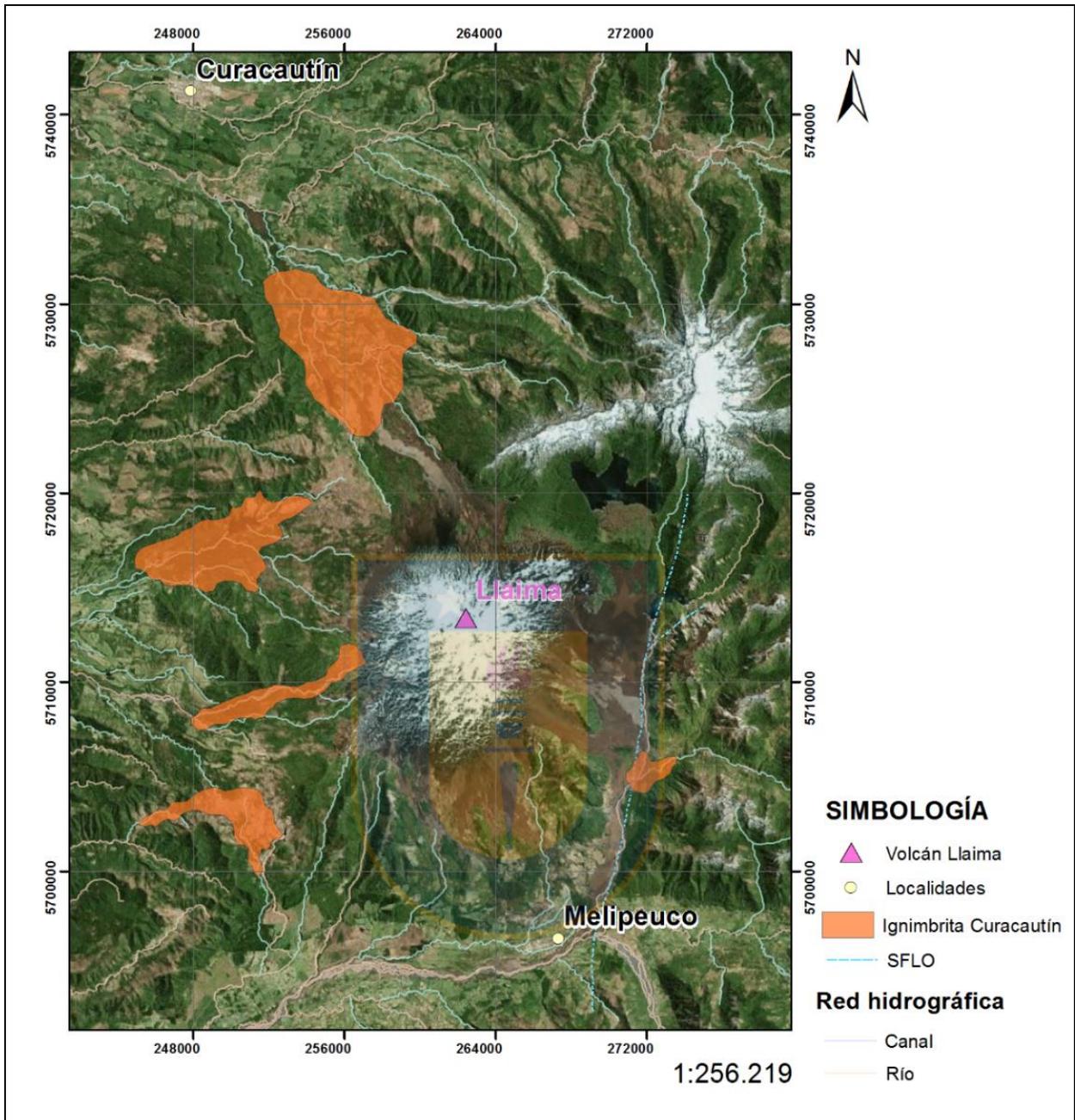


Figura 5.2: Mapa de los depósitos actuales de la Ignimbrita Curacautín. Ubicación de los depósitos de flujo piroclástico reconocidos en la campaña de terreno del 2019. Coordenadas geográficas en UTM dentro del huso 19S en sistema WGS84.

Luego, se definieron las zonas de acumulación siguiendo la metodología de Troncoso (2012), en las cuales se señala el espesor expuesto característico (Figura 5.3). Este espesor aproximado se obtiene al promediar las superficies expuestas de los afloramientos dentro de las zonas de acumulación definidas (Tabla 5.1). No se hace distinción entre depósitos de diferentes unidades.

Tabla 5.1: Cálculo del espesor para cada zona de acumulación de la Ignimbrita Curacautín.

Zona de acumulación	Depósito	Coordenadas	Espesor expuesto (m)	Error	
SW	L31	19H 0246420 5703080	4	0,375	
	L43 y L44	19H 0250698 5701758	5	0,625	
	L30	19H 0250840 5701665	2,5	1,875	
	L42	19H 0251158 5700831	6	1,625	
				Promedio: 4 m	Error absoluto: 1,125 m
W	L45	19H 0248529 5707924	2	8,25	
	L23 (2016)	19H 0251925 5709512	15	4,75	
	L24 (2016)	19H 0251805 5709266	14	3,75	
	L16 (2016)	19H 0256269 5711555	10	0,25	
				Promedio: 10 m	Error absoluto: 4,25 m
NW	L41	19H 0245296 5716247	1,5	5,83	
	L40	19H 0251676 5718323	6,5	0,83	
	LL29 (Lohmar, 2008)	19H 0251600 5718300	14	6,66	
				Promedio: 7 m	Error absoluto: 4,44 m
N	L38	19H 0254662 5725503	2,5	2,625	
	L39	19H 0256997 5727546	2,5	2,625	
	L34	19H 0257641 5727122	2,5	2,625	
	L35, L36, L37	19H 0257848 5726337	13	7,875	
				Promedio: 5 m	Error absoluto: 3,94 m
E	L13S y L14S	19H 0271804 5705515	12	3	
	LL17 (Lohmar, 2008)	19H 0271900 5705500	18	3	
				Promedio: 15 m	Error absoluto: 3 m

Se incluyen algunos datos de espesor de trabajos anteriores que se encuentran dentro de las zonas de acumulación; los depósitos LL29 Y LL17 estudiados por Lohmar (2008), y los depósitos L23, L24 y L16 visitados durante la campaña de terreno del año 2016. El error absoluto se calculó teniendo en cuenta los valores individuales de espesor actual para cada depósito versus el promedio de espesor definido para cada zona de acumulación.

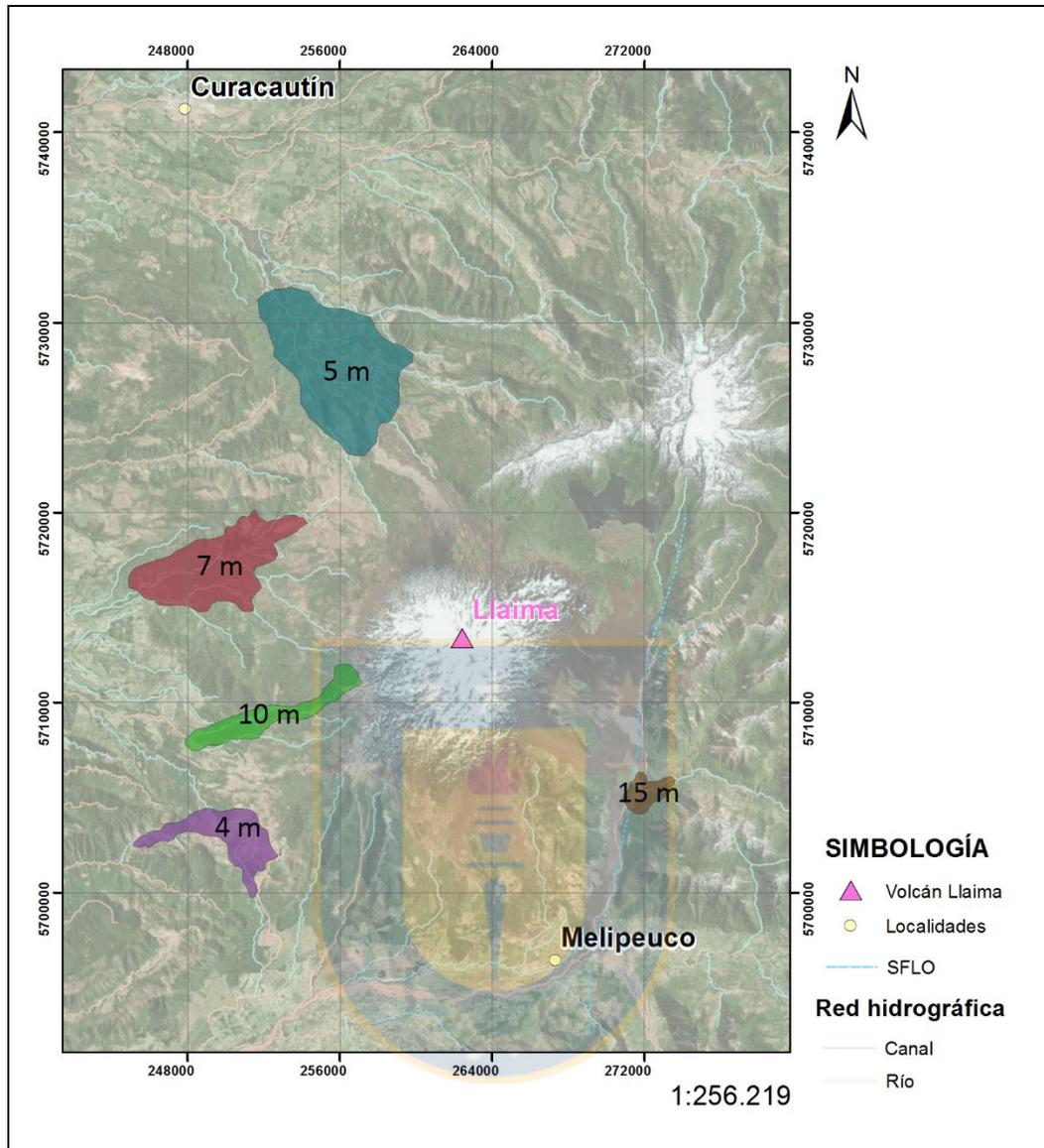


Figura 5.3: Mapa de las zonas de acumulación de la Ignimbrita Curacautín. Áreas con espesor promedio considerado. Coordenadas geográficas en UTM dentro del huso 19S en sistema WGS84.

Además del espesor de cada zona de acumulación, se estima el área individual de la misma, obteniendo los parámetros necesarios para el cálculo de volumen.

5.3. CÁLCULO DE VOLUMEN

Los parámetros para el cálculo de volumen (no-DRE) de la ignimbrita son las áreas individuales de los afloramientos multiplicadas por el espesor expuesto de cada una. Estos volúmenes deben ser

sumados con el fin de obtener el volumen total de los depósitos. Para contrastar los valores del volumen de trabajos anteriores la unidad se transforma a km^3 . Esta información se resume en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Parámetros para el cálculo de volumen de la Ignimbrita Curacautín

Área individual (m^2)	Espesor (m)	Volumen (km^3)	Propagación de error
11674600	$4 \pm 1,125$	0,0466984	0,0131222503
9896210	$10 \pm 4,25$	0,0989621	0,0420588925
3422660	15 ± 3	0,0513399	0,01026798
40598300	$5 \pm 3,94$	0,2029915	0,159957302
25026900	$7 \pm 4,44$	0,1751883	0,111119436
		0,5751802	0,06730517216

La estimación del volumen total de los depósitos es de: $V_d = 0,57 \pm 0,07 \text{ km}^3$. Es importante tener en cuenta que debido al gran porcentaje de ceniza fina que poseen estos depósitos de flujo piroclástico, existe una pérdida relevante de este material durante el transporte de los flujos debido a la formación de una nube co-ignimbrítica (Branney y Kokelaar, 2002), a la elutriación u otros procesos que erosionan estas partículas de tamaño fino. El porcentaje de pérdida de material fino puede variar entre 35% (Troncoso, 2012) y un 50% (Branney y Kokelaar, 2002). Con el fin de obtener un resultado más confiable, en este trabajo se considerará el menor porcentaje, ya que los depósitos en general cuentan con un alto contenido en finos, por lo que las pérdidas constituyen un 35%. De esta forma, $V_d = 0,57 \pm 0,07 \text{ km}^3$ equivale a un 65% del volumen original, por ende, el volumen de los depósitos es de $V_d = 0,88 \pm 0,07 \text{ km}^3$ (valor sin pérdida de material fino).

5.4. CONSIDERACIONES DEL VOLUMEN ESTIMADO

El volumen total estimado para los depósitos representa un volumen mínimo por las siguientes razones:

No fueron considerados los afloramientos de depósitos retrabajados que existen en las zonas más distales, lo que sin lugar a dudas aumentaría el volumen estimado. Esto, debido a que no se tiene seguridad de su temporalidad, origen o si pertenecen a los eventos eruptivos de la Ignimbrita Curacautín.

Se estima una pérdida del 35% de material correspondiente a ceniza fina presente en la ignimbrita, valor que corresponde a la ceniza en la nube de la co-ignimbrita (Troncoso, 2012).

Los espesores fueron determinados con base a una estimación promedio de espesores expuestos de los afloramientos actuales de la Ignimbrita Curacautín, con un error relativo de 1,22 m. Debido a esto, se recomienda a futuro obtener la mayor cantidad de datos respecto a los depósitos y sus espesores, para así poder reducir el error asociado a estos cálculos basados en promedios.

Factores como la erosión y alteraciones propias de la zona influyen en la conservación de los depósitos de la ignimbrita. Los depósitos de las corrientes de densidad piroclástica de la Ignimbrita Curacautín son originalmente mucho mayores a los actuales. Se sugiere a futuro obtener información más precisa para complementar la estimación de volumen con un espesor real en vez de promediados.

5.5. PROYECCIONES DEL VOLUMEN ESTIMADO

Debido a que el valor del volumen mínimo eruptado estimado en este trabajo, es considerablemente menor al sugerido por Moreno y Naranjo (1991) de 24 km^3 (no-DRE), se proyectan los resultados como un ejercicio con el fin de acercarse más a la cantidad de material eyectado que dio origen a la Ignimbrita Curacautín. Para realizar esta proyección, se definen nuevamente las áreas cubiertas por las corrientes de densidad piroclástica, pero esta vez se estiman considerando el movimiento de los flujos durante los diferentes episodios eruptivos (Figura 5.4), siguiendo la morfología de los valles, topografía y tomando en cuenta un área mayor a la mencionada en la sección 5.2. Fueron incluidas las localidades de Vilcún y Curacautín, ya que se reconocieron algunos depósitos de aspecto similar a la Ignimbrita Curacautín, pero el acceso a los mismos fue imposible al estar en las riberas de ríos caudalosos, por lo que no se tomaron muestras ni se logró confirmar o descartar el origen de estos depósitos. De igual forma sirven como referencia a la hora de realizar este ejercicio de proyección de los flujos originales de la ignimbrita.

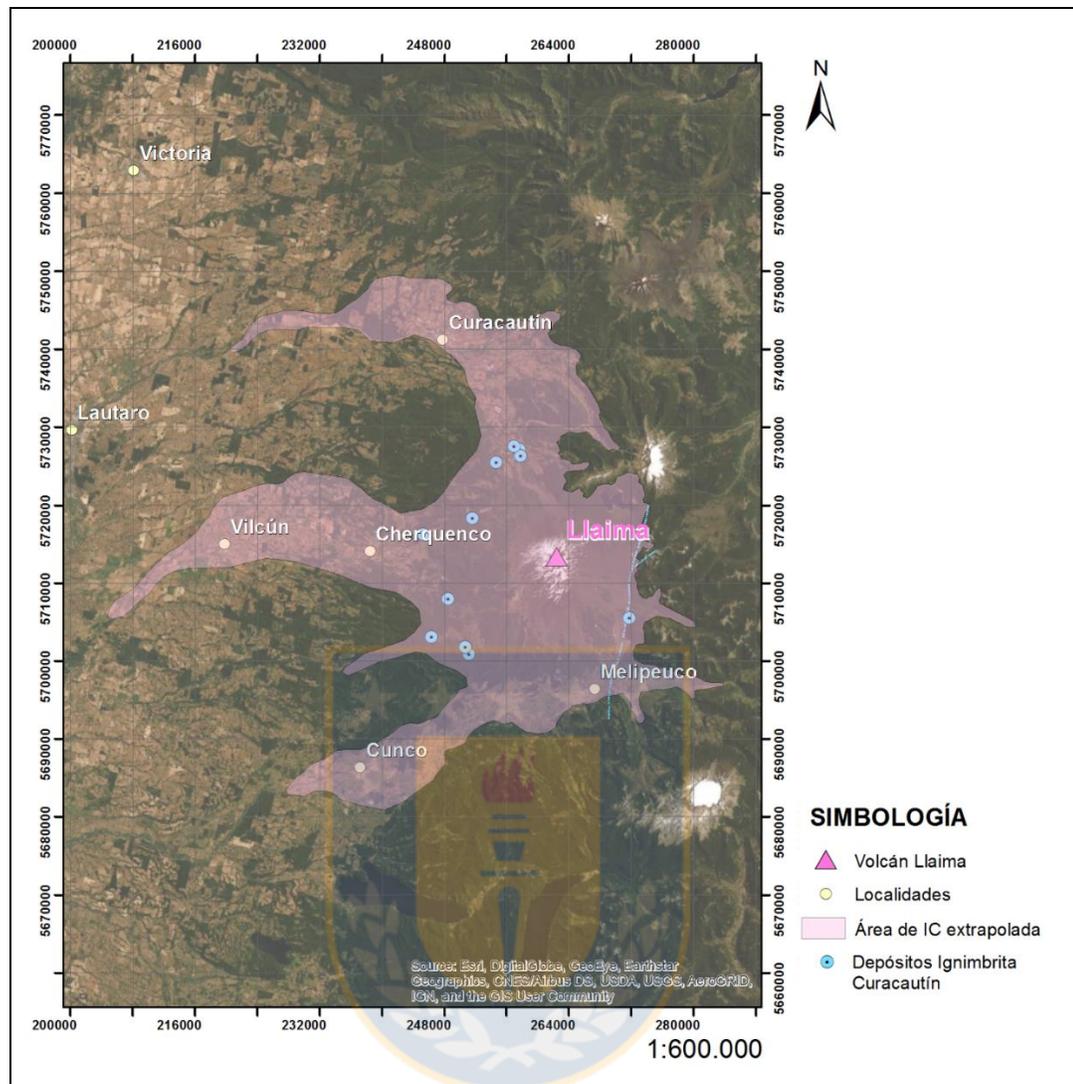


Figura 5.4: Mapa de zonas de acumulación proyectadas de la Ignimbrita Curacautín. Áreas con espesor promedio considerado. Coordenadas geográficas en UTM dentro del huso 19S en sistema WGS84.

El área calculada para la zona de acumulación proyectada es de 1.784 km^2 . Este valor es más cercano a los 2.200 km^2 de Moreno y Naranjo (1991). El espesor promedio de los depósitos actuales es de $8,2 \text{ m}$, por lo que, basados en estos parámetros el volumen proyectado o V_p es de $14,63 \text{ km}^3$ (no-DRE). Si se toma en cuenta el 35% de pérdida de material fino, el volumen proyectado del material original erupcionado por la Ignimbrita Curacautín es de $22,54 \text{ km}^3$ (no-DRE). Considerando que los afloramientos de C1 en promedio tienen cerca de $6,3 \text{ m}$, el volumen de la unidad inferior sería cerca de $17,29 \text{ km}^3$ (no-DRE), mientras que para C2 se tendría un valor de $5,21 \text{ km}^3$ (no-DRE).

6. DISCUSIÓN

6.1. MECANISMOS DE TRANSPORTE Y EMPLAZAMIENTO

Por ser esencialmente masivos y al no poseer ningún tipo de estratificación, se interpreta que los depósitos pertenecientes a Curacautín 1 provienen de un flujo de escoria y ceniza, que es rico en material juvenil en su base, empobreciéndose hacia techo. Las características de estos depósitos se interpretan como facies mLT_(frich) (Figura 3.15) provenientes de un flujo piroclástico con alta concentración de partículas. Además, se define la facies mLT en C1 (Figura 3.16) que no posee un enriquecimiento en material juvenil. La unidad superior de la Ignimbrita Curacautín, también presenta depósitos con facies mLT (Figura 3.17). Branney y Kokelaar (2002) señalan que estos flujos que dan origen a facies mLT poseen una zona limítrofe (ZLF o flow-boundary zone en inglés) en donde domina el escape de fluidos liberados hacia arriba a medida que se produce depositación de partículas desde el flujo (Figura 6.1).

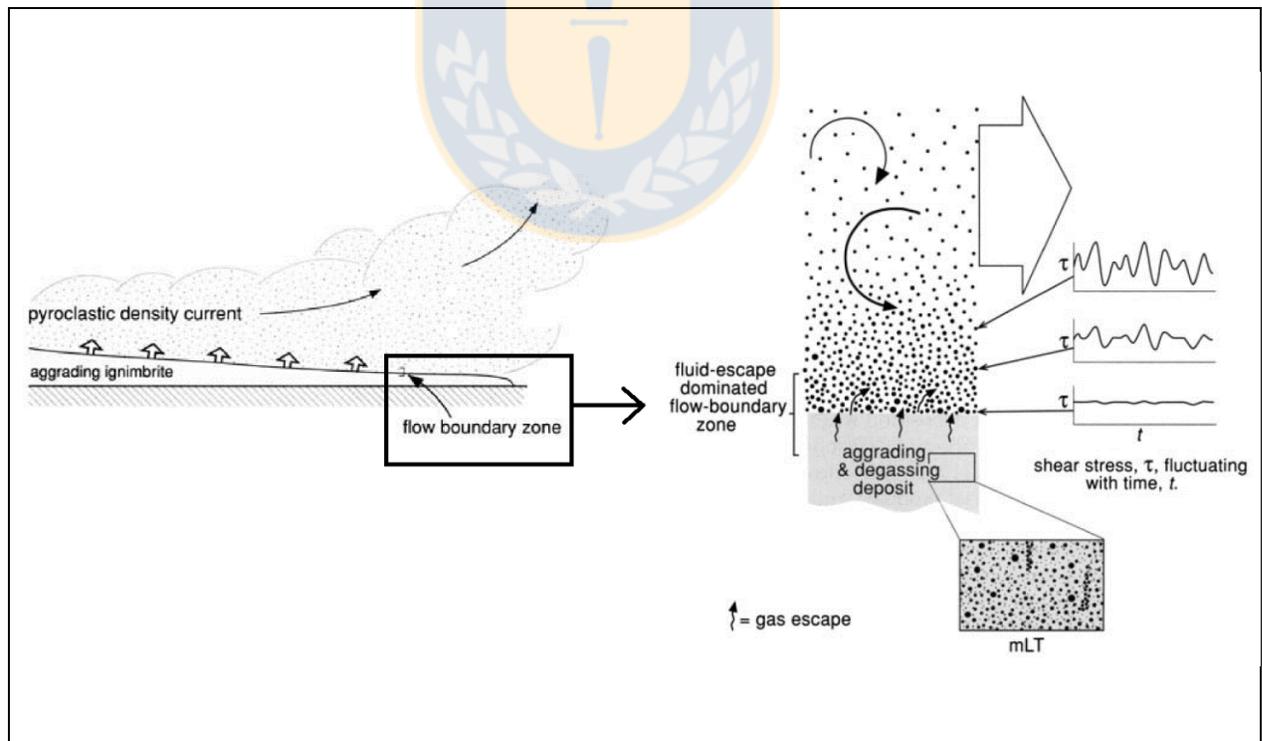


Figura 6.1: Zona limítrofe (ZLF o flow-boundary zone). Domina el escape de fluidos mientras ocurre la depositación de partículas desde el flujo. Facies mLT originada en una corriente relativamente estable. Fuente: Branney y Kokelaar (2002).

Estas partículas son soportadas en suspensión debido al constante ascenso de gas a medida que son transportadas. Las facies mLT y mLTpip son macizas y pobremente seleccionadas, por lo tanto, es muy probable que las zonas limítrofes (ZLF) de los flujos que las originaron tuvieran características similares. Sin embargo, existen diferencias entre ambas facies que se mencionan a continuación:

La facies mLTpip se diferencia por su matriz de granulometría más gruesa que la facies mLT. Además, cuenta con niveles enriquecidos en líticos de variados tamaños y la distintiva presencia de pipas de desgasificación que no fueron reconocidas en las demás facies (Figura 3.19).

Según Branney y Kokelaar (2002), el escape de fluidos da origen a las pipas de desgasificación dentro de un depósito masivo con un proceso de agradación rápida. Esta formación es in situ debido a la posición vertical y no deformada de las pipas observadas en la facies mLTpip (Fotografía 3.4). La existencia de una alta tasa de escape de fluidos conlleva a la formación de burbujas y a la canalización de los fluidos, y por ende la fuerte elutriación de ceniza fina que finalmente genera las condiciones para formar pipas de desgasificación. Estas condiciones podrían dar cuenta de la presencia de estas solo en mLTpip. Por su parte, en los depósitos que formaron la facies mLT, el flujo de gas fue demasiado bajo para generar segregación y elutriación. Esto sería posible a la casi nula presencia de partículas muy densas y/o muy grandes, ya que, al momento de la depositación, el volumen de fluidos desplazado por las partículas en la ZLF es pequeño y, por consiguiente, la tasa de escape de estos es baja.

La facies dsLT (Figura 3.18), subordinada a la facies mLT, tiene características más parecidas a las de un depósito de oleada piroclástica que a las de un flujo piroclástico debido a la estratificación, pero esta misma es de carácter difuso y presenta una buena selección, por lo que se interpreta como una transición gradacional que señala el cambio entre las unidades Curacautín 1 y Curacautín 2. Para los autores Branney y Kokelaar (2002), esta facies representa a unidades de flujo rápidamente apiladas y parcialmente amalgamadas. En la figura 6.2 se ilustran los mecanismos de transporte y emplazamiento de una corriente descendente que cambia desde un estado completamente diluido (sitio 1) a una corriente de fluido granular (sitio 2-4), constituyendo una transformación en la zona límite de flujo (ZLF). La tasa de depositación (R_d o rate of deposition en inglés) es el flujo de masa de piroclastos en el depósito por unidad de área del límite de flujo. La tasa de suministro (R_s o rate

of supply) es el flujo de masa de piroclastos por unidad de área, suministrada a la parte superior de la zona más concentrada en la base de la corriente. La transición de facies dsLT a mLT se muestra en el sitio 2 de la figura 6.2, en el cual la corriente comienza a desarrollar una carga de fondo concentrada (movimiento por tracción). Esta situación es inestable porque la tasa de depositación (R_d) está restringida a procesos y condiciones que obstaculizan la sedimentación debido al escape de fluido y permeabilidad, mientras que la tasa de suministro (R_s) está siendo controlada por el agotamiento de las partes diluidas de la corriente, y siendo $R_s > R_d$ se da paso a la estratificación presente en la facies dsLT, permitiendo la agradación de partículas que son rápidamente apiladas, para luego dar paso a una corriente más granular en el sitio 3. Es en este lugar donde predomina la facies mLT, en cuyo caso la carga de fondo puede ser arrastrada por un remolino turbulento o acumularse en la corriente descendente debido a que $R_s > R_d$, aumentando el espesor de la capa de fondo por sobre la ZLF.

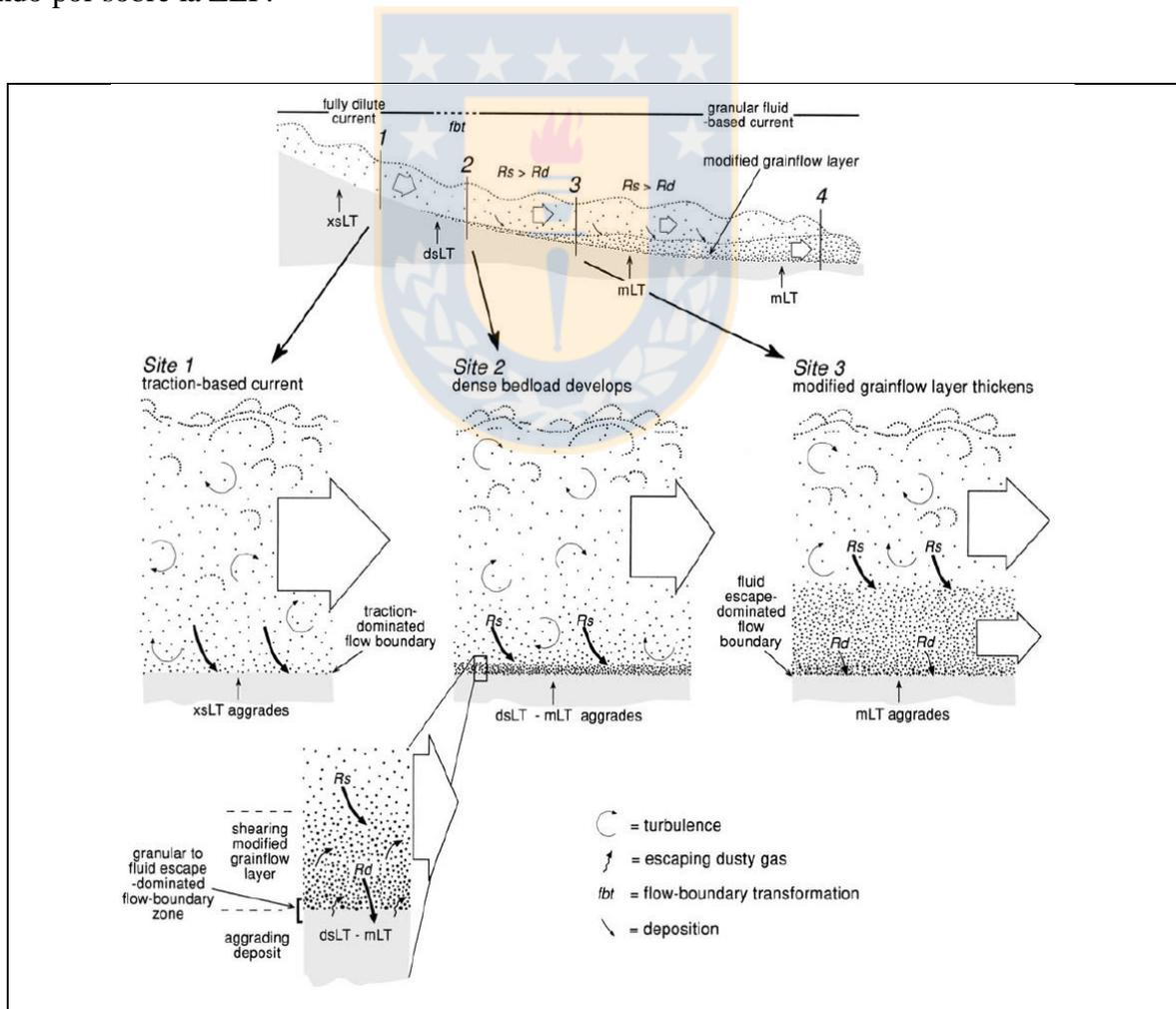


Figura 6.2: Transición desde una corriente de flujo diluida a una granular. Presencia de facies dsLT seguida por mLT a medida que se emplaza la corriente piroclástica. Fuente: Branney y Kokelaar (2002).

Localmente, los depósitos que presentan la gradación continua de las facies mLT, mLTPip y dsLT son de unos pocos metros de espesor. Esto sugiere que las facies con estratificación difusa se depositan cuando las condiciones de la ZLF son intermedias entre flujos dominados por escape de fluidos y otros por tracción, por lo que se registra una inestabilidad sutil dentro de la ZLF. Esta característica indica que la parte inferior del flujo que las depositó, estuvo dominada por un transporte traccional de partículas. Mientras que los fragmentos más finos deben haber sido transportados por suspensión y los más densos y/o de mayor tamaño se transportaron sobre el sustrato, ya sea saltando, deslizándose o rodando.

6.2. EVOLUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL

Las variaciones verticales que se observaron en los alrededores del volcán Llaima, en cuanto a granulometría, componentes y estructuras de la Ignimbrita Curacautín, permiten interpretar que los depósitos de Curacautín 1 representan una única unidad de flujo debido a la ausencia de superficies de contacto dentro de la unidad (Branney y Kokelaar, 2002).

La presencia de niveles enriquecidos en líticos que pertenecen exclusivamente a Curacautín 1 señalan que este evento eruptivo sería responsable de la formación de una caldera mencionada por Naranjo y Moreno (2005). Se interpreta que los líticos de granodiorita se derivan de la brechización syn-eruptiva de la corteza superior durante el colapso de la caldera (Schindlbeck *et al.*, 2014). Lo que podría haber aumentado el aporte de agua, debido al ensanchamiento del conducto y, asimismo la interacción magma-agua durante la erupción, explicando el enriquecimiento en clastos alterados hidrotermalmente de la unidad superior.

La situación de estabilidad cambia ante la presencia de pipas de desgasificación y un nivel de oleada piroclástica con estratificación cruzada y paralela en uno de los afloramientos del sector W del volcán, en las cercanías de la laguna Quepe. Este cambio deposicional se interpreta como el inicio de la unidad superior de la Ignimbrita Curacautín que rellena los drenajes formados por la erosión de la más antigua. Estas dos unidades no estarían muy espaciadas temporalmente, ya que las dataciones de radiocarbono en ambas unidades sugieren que el evento eruptivo de Curacautín

1 ocurrió hace 15.700 años A.P, mientras que para Curacautín 2 se produjo hace unos 14.800 años A.P. aproximadamente.

Los depósitos observados en el lado E se encuentran en las zonas más proximales del volcán, al ser masivos y de pobre selección se alude a una rápida depositación, además no hubo mayor transporte debido a las barreras topográficas de mayor altura hacia este sector. Las corrientes de densidad piroclástica viajaron por el flanco E por medio de una ruta más directa y corta. Hacia el lado N, los cambios observados en la facies mLT definida en Curacautín 1 tales como una mejor selección y una media de material piroclástico más grueso (Gráfico 4.4), señalan que los flujos viajaron en esta dirección por los valles y esteros, y que estos habrían sido más enérgicos que los que viajaron por el lado E, sin embargo, se observan lentes de bloques y una región basal enriquecida en líticos (Figura 3.3), lo que plantea una segregación por densidad en una corriente menos concentrada de flujos de ceniza y escoria (Brand *et al.*, 2014). Mientras que para la facies mLT presente en Curacautín 2 del lado N (Figura 3.8 y 3.9) no se reconoce laminación ni gradación del tamaño de grano, es matriz soportado, con una pobre selección y no muestra evidencia de elutriación o segregación de líticos, lo que se interpreta como una corriente altamente concentrada donde la segregación por tamaño-densidad fue suprimida (Brand *et al.*, 2014).

Las facies más distales de la Ignimbrita Curacautín fueron observadas al lado W del volcán, cuyos depósitos presentan un aumento en el porcentaje de material tamaño lapilli grueso y bloques (Gráfico 4.2), y un mayor grado de alteración cambiando a una coloración parduzca (Fotografía 3.2), con aumento considerable de esfericidad y redondez debido a la rugosidad de la superficie. Los depósitos más alejados de la fuente pertenecen a Curacautín 2, que según la consistencia en el espesor de los depósitos más la gran extensión areal que posee, indica una corriente con gran movilidad. Esto, sumado a la abundante presencia de carbón sugiere que hacia este sector del volcán las corrientes de flujo tuvieron mayor concentración de partículas, fueron las más energéticas alcanzando mayores distancias y debieron desbordar los cauces de los ríos para carbonizar el material vegetal encontrado en esta unidad. Las corrientes de densidad piroclástica que fluyeron por el flanco W del volcán presentan estratificación difusa en los afloramientos más distales (Figura 3.18). Esto se interpreta como el resultado de una combinación del estrés de cizalle basal que aumentó debido a la interacción con las pendientes y rutas más obstaculizadas de este sector,

sumado a la inestabilidad inherente de la corriente (Branney y Kokelaar, 2002). Además, la mayor presencia de líticos tamaño bloque y aumento general de granulometría en C2 (Gráfico 4.9), se deben a una alta competencia como resultado de variaciones en la pendiente en el lado W del volcán.

La combinación de depósitos masivos y con gran espesor, sumado al alto porcentaje de ceniza fina entre las unidades medias-distales, es decir, de los lados N y W tanto en la facies mLT(frich) de C1 como en la facies mLT de C2, sugieren que las corrientes de densidad piroclásticas desarrollaron y mantuvieron una alta presión interna de poros durante el transporte y la depositación (Brand *et al.*, 2014). Sin embargo, los depósitos de las zonas proximales están enriquecidos en finos, particularmente la facies mLT(frich) de la unidad inferior, por lo que se sigue que la corriente que dio origen a estos depósitos estaba en el extremo superior de un flujo altamente concentrado en partículas (Figura 6.2, sitio 3), lo que resultó en que la segregación por densidad y la elutriación fueran fuertemente suprimidas en toda el área de depositación proximal (Brand *et al.*, 2014).

Pese a que el evento eruptivo que dio origen a C1 está asociado a la formación de una caldera, este mismo evento no alcanzó una gran distribución areal. Los afloramientos encontrados a más de 20 km del volcán corresponden a depósitos de retrabajo de la Ignimbrita Curacautín.

6.3. EXPLOSIVIDAD Y MOVILIDAD DE LA IGNIMBRITA CURACAUTÍN

Se realizó un ejercicio de proyección del volumen original del material eruptado con el fin de comparar el resultado obtenido con el valor estimado por Moreno y Naranjo (1991) de 24 km³ (no-DRE). Debido a que los 22,54 km³ (no-DRE) calculados en este trabajo, aún sigue siendo un valor menor, se considera que dentro de las estimaciones de Moreno y Naranjo (1991) debieron haber considerado los depósitos retrabajados más distales de la Ignimbrita Curacautín.

Teniendo en cuenta que la Ignimbrita Curacautín tiene un volumen mínimo actual de 0,88 km³ (no-DRE) y un volumen original del material eruptado de 22,54 km³ (no-DRE), se podría clasificar como resultado de un evento eruptivo con un índice de explosividad volcánica o VEI=7 tipo pliniana

(Newhall y Self, 1982). Considerando, además, la distancia a la que fueron depositados los flujos (hasta 19,10 km de la fuente), se puede afirmar que la erupción que generó esta ignimbrita debe haber presentado una gran explosividad, con una columna eruptiva que podría haber alcanzado >25 km de altura (Newhall y Self, 1982). Las ignimbritas que provienen de una fase eruptiva Pliniana tienden a ser menos soldadas, formadas por el colapso de una gran columna eruptiva, en la cual ocurre un mayor enfriamiento de las partículas debido al intercambio termal con el aire que queda atrapado dentro de la misma (Walker, 1983).

El hecho de que el volumen calculado sea menor a los 24 km³ (no-DRE) estimado por Moreno y Naranjo (1991), se debe a que en las zonas distales del volcán solo fueron reconocidos depósitos retrabajados, por lo que no se consideraron como propios de la Ignimbrita Curacautín. Además, algunos depósitos distales de apariencia similar a la ignimbrita, se encontraban en lugares de difícil acceso, como riveras de ríos turbulentos, alturas topográficas muy elevadas o caminos en propiedades privadas de acceso restringido. Por esta razón, en este trabajo se hace mención de un volumen mínimo eruptado actual, y otro volumen original proyectado según el emplazamiento de las corrientes de densidad piroclástica durante el transcurso de los episodios eruptivos, sin descartar el hecho de que esta ignimbrita sí pueda tener un volumen asociado mucho mayor.

Desde otra perspectiva, teniendo como referencia la posible área total que cubrieron los depósitos de la ignimbrita (Figura 5.4) es de 1.784 km², y que su espesor promedio es de 8,2 m, según Walker (1983), la razón de aspecto (AR o aspect ratio en inglés) para la Ignimbrita Curacautín sería de 0,00006797, es decir, su AR es del orden de 10⁻⁵. Esto permite clasificarla como una ignimbrita de “low aspect ratio” o baja razón de aspecto, al igual que las ignimbritas de Taupo y Kidmappers de Nueva Zelanda y las ignimbritas de Peach Springs y la de Rattlesnake, ambas en USA (Branney y Kokelaar, 2002). Si bien, se clasifican de esta manera principalmente por un pequeño espesor, este no es el caso de la Ignimbrita Curacautín, que debe su baja razón de aspecto a la gran distancia alcanzada por los flujos desde la fuente. Los autores Branney y Kokelaar (2002) mencionan que estas ignimbritas de “low aspect ratio” (LARI) registran flujos inusualmente energéticos y pueden presentar capas estratificadas cerca de la base de ignimbritas masivas formadas a partir de la existencia de capas límite turbulentas debajo de los flujos. Es posible que estos flujos energéticos se asocien a una elevada altura de la columna eruptiva y a una alta tasa de descarga de magma

(Walker *et al.*, 1983). La gran movilidad de estos flujos puede estar condicionada por factores como la gran cantidad de material muy fino, cercano a un 95% de matriz ceniza fina, que permitió una mayor fluidización al facilitar la entrada de aire a los flujos (Branney y Kokelaar, 2002).

Aun cuando los eventos volcánicos de elevado VEI son muy poco frecuentes, debido a su gran explosividad son objetos de estudio muy importantes, sobre todo los de composición máfica. Pese a que estadísticamente son difíciles de abordar dado el bajo número de eventos de esta magnitud reconocidos en el mundo, el conocimiento sobre este tipo de erupciones como de los factores que gatillan su origen, pueden ser claves para poder predecir futuros eventos. La erupción del volcán Llaima que generó la Ignimbrita Curacautín se puede comparar con la ignimbrita Licán hace unos 13.8 ka años A.P. (~10 km³ de volumen no-DRE) y con la ignimbrita Pucón, de menor envergadura y más reciente ~3.6 ka años A.P. (~3 km³ de volumen no-DRE) del volcán Villarrica (Lohmar, 2008). Estas ignimbritas también corresponden a secuencias de corrientes de densidad piroclásticas con una composición promedio andesítica-basáltica, lo que demuestra el bajo grado de diferenciación de estos productos volcánicos. Según Lohmar (2008) el material juvenil de las tres ignimbritas es escoriáceo, con escaso contenido de fenocristales (1-14% de fenocristales) y de mineralogía anhidra. Además de las similitudes antes mencionadas, es importante destacar que los eventos eruptivos de la ignimbrita Licán y Curacautín ocurren dentro de un mismo rango de edad, varios siglos después del comienzo del Tardiglacial en la región, es decir, entre 14.600 a 10.200 años A.P. (Denton *et al.*, 1999 en Lohmar, 2008). Al comparar globalmente estas ignimbritas, Lohmar (2008) concluye que las más antiguas (Licán y Curacautín) presentan evidencias de mezcla de magmas y que todas contienen fragmentos graníticos (algunos parcialmente fundidos). Sin embargo, aún queda la interrogante respecto al retiro y erosión de los hielos luego de la última glaciación en la región y su rol a la hora de desencadenar las grandes erupciones.

6.4. HISTORIA ERUPTIVA

La historia eruptiva de la Ignimbrita Curacautín representa el inicio de una etapa explosiva intensa del volcán Llaima que finalizó hace 7.600-7.200 años A.P. con la Secuencia Trufultruful. Esta etapa comienza con un evento explosivo de gran magnitud hace unos 15.700 años A.P. de características plinianas, con un índice de explosividad volcánica 7 (VEI=7), que da origen a

Curacautín 1, generando una columna eruptiva de unas decenas de km de altura. Esta columna se mantuvo estable durante una cierta cantidad de tiempo, y comenzó a desplazarse en los alrededores del volcán, dejando a su paso diversos depósitos. La tasa de descarga asociada a la erupción fue muy grande, generando una rápida expulsión de material de la cámara magmática máfica y, consecuentemente, el sistema evolucionó hacia distintas corrientes de densidad piroclásticas cubriendo una extensa área, distribuyéndose en los valles de los ríos hacia las localidades de Curacautín, Cherquenco, Melipeuco, entre otras.

La unidad inferior o Curacautín 1 se encuentra principalmente confinada al sector E y N del volcán y es seguida por la emisión en rápida sucesión de Curacautín 2 que predomina en lado W del centro eruptivo, hace al menos unos 14.800 años A.P. aproximadamente. Esta transición entre ambas unidades es evidenciada en pipas de desgasificación que atraviesan el techo de C1, cuya concentración en líticos en las cercanías del contacto es considerablemente superior a la unidad C1, y con una menor concentración en fragmentos juveniles, debido a una mayor eficacia del flujo de erosionar el sustrato por el cual se desplazó. Las diferencias entre C1 y C2 a nivel de componentes y granulometría, sugieren que se formaron a través de procesos gradacionales, controlados por el relieve topográfico y por los procesos físicos que gobernaron el transporte del material piroclástico hasta donde fueron depositados.

La naturaleza máfica de todos los depósitos, sumado a la inexistencia de facies piroclásticas de otras composiciones, sugiere que no hubo un periodo de recarga de la cámara magmática, de modo que la unidad C2 fue depositada en un lapso de tiempo muy corto en relación a la unidad C1. Sin embargo, la presencia de inclusiones félsicas en escorias tamaño bloque señala un proceso de mezcla de magma. Este proceso también es reconocido en el trabajo de Lohmar (2008) al explicar el gap composicional (56-58% de sílice) presente en la ignimbrita. Esto pudo originarse no en la cámara magmática, sino más bien en diferentes reservorios o sills presentes en las zonas más superficiales del volcán (Bouvet de Maisonneuve *et al.*, 2012).

La actividad eruptiva de la unidad inferior fue incrementando progresivamente, lo cual queda evidenciado en la presencia de abundantes líticos plutónicos como clastos, lo que se traduce en una alta velocidad de descarga de magma, responsable de bajar el nivel de fragmentación dentro del

basamento de granitoides, acompañado por la fase culminante o paroxismal de colapso caldérico y hundimiento del techo de la cámara dentro del reservorio de magma. Este magma fue probablemente muy rico en volátiles en profundidad como para exsolver e impulsar una fragmentación magmática de forma violenta. Este proceso, seguido probablemente de una eficaz desgasificación, fueron responsables del ensanchamiento progresivo del conducto volcánico durante la erupción, generando inestabilidad en la columna eruptiva y el consecuente colapso de ésta. Luego, se da comienzo a su etapa final con el inicio de los eventos eruptivos que dan origen a la unidad superior, cuya intercalación de capas retrabajadas de arena y limo representan la temporalidad de distintos flujos, separados por un periodo de no depositación. Debido al colapso de la caldera, se produjo un ensanchamiento del conducto, lo que permitió un mayor aporte de agua al sistema, con un aumento en la interacción magma-agua, dando origen a las partículas alteradas hidrotermalmente que son muy abundantes dentro de la unidad superior.



7. CONCLUSIONES

Los flujos y oleadas piroclásticas que forman la Ignimbrita Curacautín del volcán Llaima, están constituidos por dos unidades de edades diferentes cuyos promedios ponderados corregidos son: para la unidad inferior de 15.260-16.150 años A.P. (Lohmar, 2008) y de 14.751-15.252 años A.P. para la unidad superior.

Los depósitos reconocidos de la Ignimbrita Curacautín se pueden clasificar en tres litofacies: mLT, que pertenece a una facies masiva, con fragmentos tamaño lapilli y sin gradación. Está presente en Curacautín 1 (Figura 3.16) y Curacautín 2 (Figura 3.17), la diferencia es que algunas de las facies mLT propias de la unidad inferior están enriquecidas en partículas finas (Figura 3.15), siendo nominadas en este trabajo como facies mLT_(frich) para facilitar su distinción; mLT_{pip} es la de menor importancia volumétrica, reconocida localmente en un depósito de Curacautín 1 (Figura 3.19) en los alrededores de la laguna Quepe, y que se define como una facies masiva con algunos niveles ricos en líticos tamaño lapilli y bloque, destacando la presencia de pipas de desgasificación; dsLT presente en ambas unidades de la ignimbrita (Figura 3.18), correspondiente a una facies con estratificación difusa subparalela e incluso levemente cruzada con algunas variaciones gradacionales del tamaño de grano.

El sector W que presenta facies mLT en Curacautín 2 y localmente facies mLT_{pip}, se diferencia de la facies mLT de C2 en el flanco N y E del volcán, en que los flujos piroclásticos que viajaron por el flanco W fueron más energéticos, razón por la cual, son capaces de erosionar en mayor medida el sustrato y, de esta forma, enriquecerse en líticos más densos (Gráfico 4.9), los que al depositarse facilitaron la formación de pipas de desgasificación. El paso de mLT a dsLT común en los sectores W y N del volcán, son producto de transiciones gradacionales entre litofacies estratificadas y masivas, que en algunos casos podrían indicar el cambio entre las unidades Curacautín 1 y Curacautín 2.

El contraste de energía adquirida por los flujos piroclásticos entre los diferentes flancos del volcán se debería a diferencias topográficas. Hacia el sector E los flujos se desplazaron por una ruta más directa y manteniendo su alta energía al viajar encajonados a un alta pendiente por una corta

distancia, permitiendo una rápida depositación, evidenciada por el alto contenido en partículas finas (elutriación poco eficiente) y el menor grado de selección observado en la facies mLT(frich) de C1 (Gráfico 4.4) del flanco E. Mientras que por el lado N, los flujos habrían superado en energía a los del flanco E, ya que sus depósitos tienen mejor selección (Gráfico 4.4a), siendo transportados entre valles y esteros, pero con la particularidad de tener una corriente menos concentrada para el caso de facies mLT en Curacautín 1, contrario a la facies mLT de la unidad superior cuyas evidencias indican una corriente altamente concentrada en partículas (Figura 4.3 y Gráfico 4.4b). Mientras que hacia el sector W, los flujos habrían perdido energía al tener que sobrepasar altas barreras topográficas, sin embargo, las corrientes tenían una gran movilidad y fueron las más energéticas con un mayor grado de selección (Gráfico 4.4), alcanzando una gran extensión areal hacia las zonas más distales del volcán.

Hacia el SW sólo se reconoce la unidad superior, es decir, Curacautín 2. Mientras que, hacia el NW, se observa la transición entre ambas unidades de forma local en las cercanías de la laguna Quepe, inferidas a partir de la aparición de pipas de desgasificación subyacentes a un depósito de oleada piroclástica que marca el inicio de Curacautín 2 (Fotografía 3.4 y Figura 3.6). Por otro lado, hacia el N y E se pueden reconocer tanto C1 como C2, siendo más abundante Curacautín 1 hacia el lado N.

El evento eruptivo que dio origen a la unidad inferior sería responsable de la formación de una caldera. Esto se infiere por la abundante presencia de líticos de granodiorita (hasta 6%) exclusivos de C1 (Tabla 4.2) que derivan de la brechización syn-eruptiva de la corteza superior durante el colapso de la caldera.

La estimación de un volumen original del material eruptado en $22,54 \text{ km}^3$ (no-DRE) para la Ignimbrita Curacautín, es lo suficientemente importante para asociarle un VEI igual a 7 vinculado al evento eruptivo que la generó, siendo clasificada como una erupción tipo pliniana. Es probable que la columna haya superado los 25 km de altura y, sumado al hecho de una alta tasa de descarga de magma, más la alta fluidización (flujos enriquecidos en finos) y elevación topográfica, estos finalmente alcanzaron distancias cercanas a los 20 km desde la fuente. Permitiendo clasificarla como una ignimbrita de baja razón de aspecto o “low aspect ratio” (LARI).

Finalmente, a modo de recomendación se sugiere obtener una mayor cantidad de datos y observaciones respecto a la caracterización de los distintos depósitos de la Ignimbrita Curacautín, con el fin de establecer de manera detallada la estratigrafía, y poder especificar mediante un mayor espectro de datos las variables espaciales de las diferentes unidades, sobre todo en las variaciones verticales de los depósitos, para conseguir una correlación más certera y específica. Para ello, es indispensable lograr acceder a los depósitos más distales y poder recolectar muestras para futuros análisis. Además, se debe trabajar con un equipo multidisciplinario para abordar las distintas interrogantes referentes a las condiciones pre-eruptivas de las erupciones máficas plinianas, combinando la volcanología física, geoquímica, petrología y estudios experimentales. En este propósito es fundamental investigar los procesos que promueven erupciones de gran volumen y la formación de calderas (Curacautín 1) versus erupciones máficas plinianas de menor volumen (Curacautín 2).

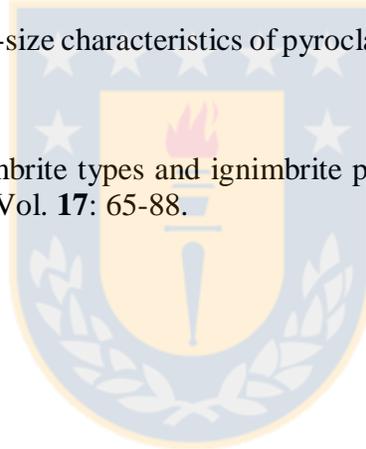


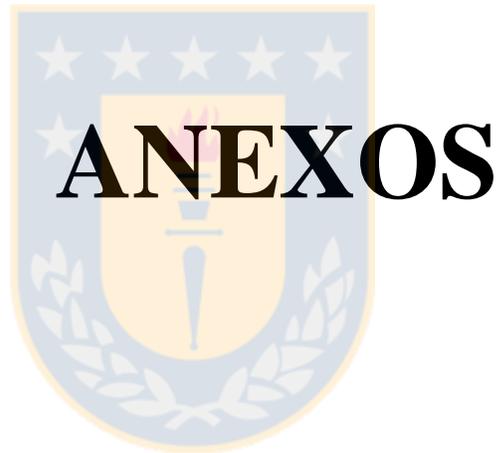
8. REFERENCIAS

- BOUVET DE MAISONNEUVE, C.; DUNGAN, M.A.; BACHMANN, O. Y BURGISSER, A. 2012. Insights into shallow magma storage and crystallization at Volcán Llaima (Andean Southern Volcanic Zone, Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **211**: 76-91.
- BRAND, B.D.; MACKAMAN-LOFLAND, C.; POLLOCK, N.M.; BENDAÑA, S.; DAWSON, B. Y WICHGERS, P. 2014. Dynamics of pyroclastic density currents: Conditions that promote substrate erosion and self-channelization – Mount St Helen, Washington (USA). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **276**: 189-214.
- BRANNEY, M.J. Y KOKELAR, P. 2002. Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. Geological Society: 143 pp., London.
- CEMBRANO, J. Y LARA, L. 2009. The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics*. Vol. **471** (1-2): 96-113.
- HERVÉ, M. 1976. Estudio geológico de la falla Liquiñe-Reloncaví en el área de Liquiñe; Antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia). Congreso Geológico Chileno N° 1. Actas, Vol. **1**: 39-56. Santiago.
- HOGG, A.G.; HUA, Q.; BLACKWELL, P.G.; NIU, M.; BUCK, C.E.; GUILDERSON, T.P.; HEATON, T.J.; PALMER, J.G.; REIMER, P.J.; REIMER, R.W.; TURNEY, S.M.C. Y ZIMMERMAN, S.R.H. 2013. SHCal13 Southern Hemisphere calibration, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*. Vol. **55** (4): 1889-1903.
- INMAN, D.L. 1952. Measures for describing the size distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*. Vol. **22** (3): 125-145.
- KRUMBEIN, W.C. 1938. Size frequency distributions of sediments and the normal phi curve. *Journal of Sedimentary Petrology*. Vol. **8** (3): 84-90.
- LARA, L.E.; CEMBRANO, J. Y LAVENU, A. 2008. Quaternary vertical displacement along the Liquiñe-Ofqui Fault Zone: Differential uplift and coeval volcanism in the Southern Andes?. *International Geology Review*. Vol. **50** (11): 975-993.
- LAVENU, A. Y CEMBRANO, J. 1999. Estados de esfuerzo compresivo plioceno y compresivo-transpresivo pleistoceno, Andes del Sur, Chile (38-42°30'S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **26** (1): 67-87.

- LITVAK, D. V. Y POMA, S. 2005. Estratigrafía y facies volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Valle del Cura: magmatismo paleógeno en la Cordillera Frontal de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. **60** (2): 402-416.
- LOHMAR, S. 2008. Petrología de las Ignimbritas Licán y Pucón (volcán Villarrica) y Curacautín (volcán Llaima) en los Andes del Sur de Chile. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 327 pp., Santiago.
- MACKAMAN-LOFLAND, C.; BRAND, B.D.; TADDEUCI, J. Y WOHLETZ, K. 2014. Sequential fragmentation/transport theory, pyroclast size-density relationships, and the emplacement dynamics of pyroclastic density currents - A case study on the Mt. St. Helens (USA) 1980 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **275**: 1-13.
- MORENO, H. Y NARANJO, J.A. 1991. Síntesis geológica del volcán Llaima, Andes del Sur, (38°45'S), Chile, e implicancias de riesgos. Congreso Geológico Chileno N° 6. Actas, Vol. **1**: 386-389. Viña del Mar.
- MORENO, H. Y LARA, L. 2008. Geología del Área Pucón-Curarrehue, Región de La Araucanía y de Los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N° **115**: 36 pp., 1 mapa escala 1:100.000, Santiago.
- NARANJO, J.A., Y MORENO, H. 1991. Actividad explosiva postglacial en el volcán Llaima, Andes del Sur (38°45'S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **18** (1): 69-80.
- NARANJO, J.A., Y MORENO, H. 2005. Geología del volcán Llaima, Región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N° **88**: 33 pp., 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.
- NEWHALL, C.G., Y SELF, S. 1982. The Volcanic Explosivity Index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*. Vol. **87** (C2): 1231-1238.
- RODRÍGUEZ, F. 2015. Geología estructural en torno al volcán Llaima: el sistema de fallas Liquiñe-Ofqui y su relación con la actividad volcánica reciente Zona Volcánica Sur, Región de La Araucanía, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 129 pp., Concepción.
- SALAS, A. 2014. Dinámica de flujos laháricos e híbridos, flanco norte del volcán Llaima, Zona Volcánica Sur de los Andes, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 143 pp., Santiago.

- SCHINDLBECK, J.C.; FREUNDT, A. Y KUTTEROLF, S. 2014. Major changes in the post-glacial evolution of magmatic compositions and pre-eruptive conditions of Llaima Volcano, Andean Southern Volcanic Zone, Chile. *Bulletin of Volcanology*. Vol. **76** (6): 1-22.
- SCHONWALDER-ANGEL, D.; CORTÉS, J.A. Y CALDER, E.S. 2018. The interplay of magmatism and tectonics: An example based on the satellite scoria cones at Llaima volcano, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **367**: 31-35.
- SUÁREZ, M. Y EMPARÁN, C. 1997. Hoja Curacautín, Regiones de La Araucanía y del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° **71**: 105 pp., 1 mapa escala 1:250.000, Santiago.
- TRONCOSO, C. 2012. Estudio estratigráfico y de volcanología física de la Ignimbrita Pudahuel. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 84 pp., Santiago.
- WALKER, G.P.L. 1971. Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *The Journal of Geology*. Vol. **79** (6): 696-714.
- WALKER, G.P.L. 1983. Ignimbrite types and ignimbrite problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **17**: 65-88.





ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Descripciones macroscópicas	116
2	Columnas estratigráficas	150
3	Análisis sedimentológico	173

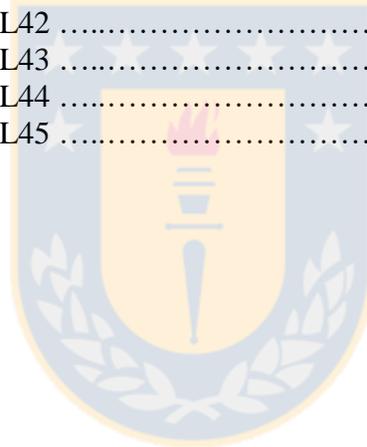


ANEXO 1.
DESCRIPCIONES MACROSCÓPICAS



ÍNDICE

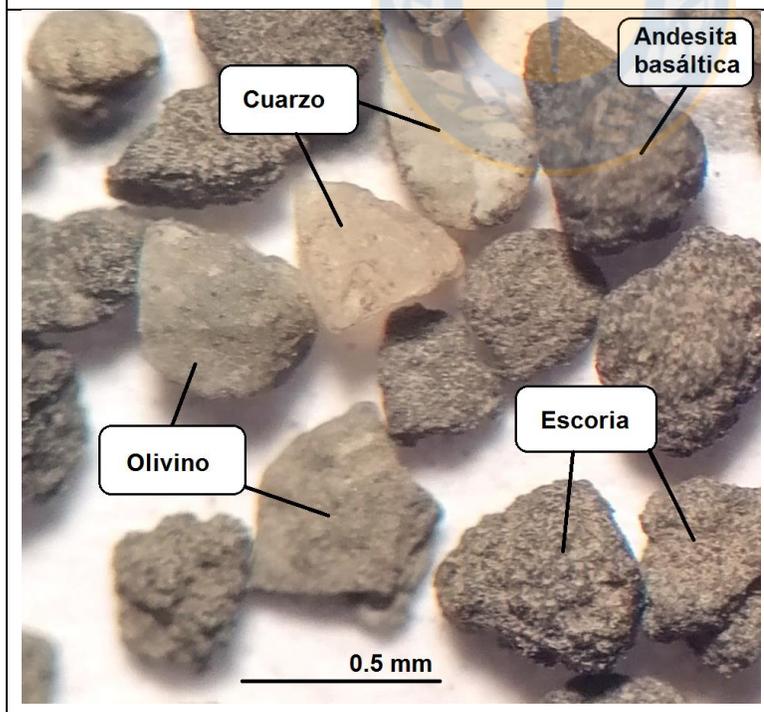
		Página
1. 1.	Muestra 1-13-19-L13S	118
1. 2.	Muestra 1-13-19-L14S	120
1. 3.	Muestra 1-14-19-L30	122
1. 4.	Muestra 1-14-19-L31	124
1. 5.	Muestra 1-17-19-L34	126
1. 6.	Muestra 1-18-19-L35	128
1. 7.	Muestra 1-18-19-L36	130
1. 8.	Muestra 1-18-19-L37	132
1. 9.	Muestra 1-19-19-L38	134
1.10.	Muestra 1-20-19-L39	136
1.11.	Muestra 1-22-19-L40	138
1.12.	Muestra 1-25-19-L41	140
1.13.	Muestra 1-28-19-L42	142
1.14.	Muestra 1-30-19-L43	144
1.15.	Muestra 1-30-19-L44	146
1.16.	Muestra 1-30-19-L45	148



1.1. MUESTRA 1-13-19-L13S					
COORDENADAS	19H 271804 E / 5705515 S				
LOCALIDAD	Parque Nacional Conguillío, lado E				
COLOR	Roca fresca: negro grisáceo				
	Roca alterada: gris claro				
FABRICA	Matriz soportada				
SELECCIÓN	Mala selección				
					
				Forma	
FRACCIÓN -6 φ a -3 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Gris oscuro	Débil	Subangulosa	Subdiscoidal
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro	-	Anguloso	Esférico a subdiscoidal
	Andesita basáltica	Pardo negruzco	-	Subanguloso	Esférico
	Andesita	Negro grisáceo	-	Muy anguloso	Esférico
	Granodiorita	Gris claro	-	Anguloso	Esférico
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Marrón oscuro	Débil	Subredondeado	Subdiscoidal
FRACCIÓN -2 φ a 1 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	Selectiva	Muy angulosa	Discoidal
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro a marrón	-	Subanguloso	Subprismático
	Andesita basáltica	Gris claro	Débil	Angulosa a prismática	Subprismática a prismática
	Andesita	Pardo oscuro	Débil	Subangulosa	Esférica
	Granodiorita	Gris claro	Pervasiva	Subangulosa	Esférica
	<i>Alterados</i>				

	Hidrotermales	Granate oscuro	Pervasiva	Redondeado	Subprismático
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	-	Subredondeado	Subprismático
	Plagioclasa	Semitransparente	-	Bien redondeado	Prismático
	Olivino	Verde opaco	-	Bien redondeado	Subprismático a esférico
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Negro con tonos pardos	Selectiva	Subanguloso	Esférico a subprismático
	<i>Juveniles</i>	Negro	Débil	Subanguloso a subredondeado	Subdiscoidal
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	-	Subredondeado	Subprismático
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Subanguloso	Esférico
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: Algunas escorias tienen alto grado de redondez, sugiriendo un gran transporte.					

Mineralogía de la muestra L13S con abundante material juvenil



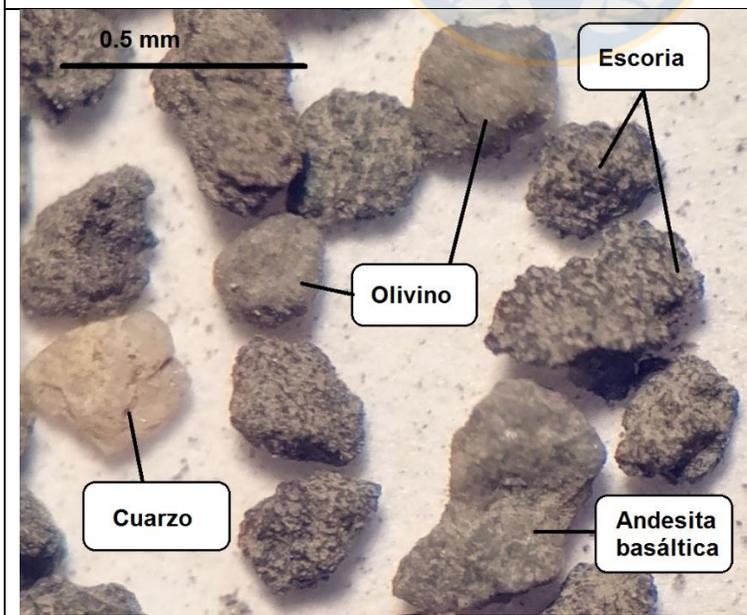
1.2. MUESTRA 1-13-19-L14S	
COORDENADAS	19H 271804 E / 5705515 S
LOCALIDAD	Parque Nacional Conguillío, lado E
COLOR	Roca fresca: negro grisáceo Roca alterada: gris claro
FÁBRICA	Matriz soportada
SELECCIÓN	Mala selección



FRACCIÓN -6 ϕ a -3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Forma	
				Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	-	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro a gris oscuro	-	Anguloso	Esférico a subprismático
	Andesita basáltica	Pardo a gris oscuro	-	Subanguloso	Esférico
	Andesita	Negro grisáceo con tonos marrones	Selectiva	Muy anguloso	Esférico a subprismático
	Granodiorita	Gris claro a blanco	Débil	Muy anguloso	Subdiscoidal
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Marrón oscuro	Moderada	Subredondeado	Subprismático
FRACCIÓN -2 ϕ a 1 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	Débil	Subredondeado	Esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro con tonos café	Selectiva	Muy anguloso	Esférico
	Andesita basáltica	Gris oscuro	Débil	Subredondeado	Subdiscoidal

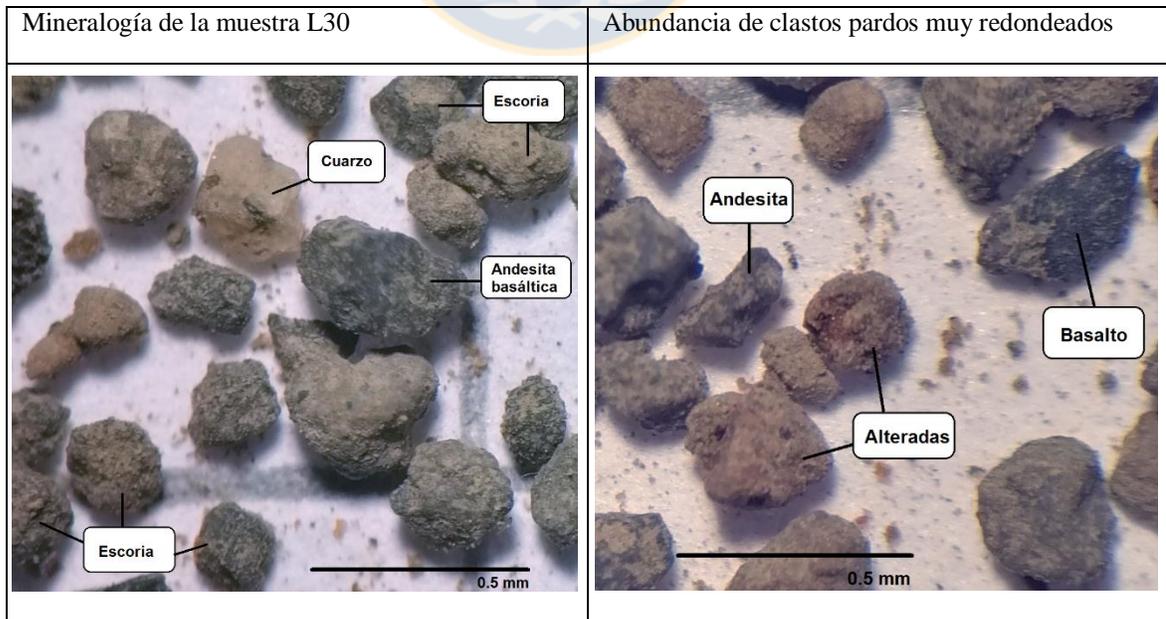
	Andesita	Gris oscuro con tonos marrones	Pervasiva	Muy anguloso a anguloso	Esférico a subprismático
	Granodiorita	Gris claro a blanco amarillento	Débil	Redondeado	Esférico a subdiscoidal
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	-	Subanguloso	Subdiscoidal
	Plagioclasa	Semitransparente	-	Muy anguloso	Subprismático
	Olivino	Gris a blanco con tonos verdoso	Selectiva	Redondeado	Esférico
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Negro con tonos pardos	Selectiva	Muy anguloso	Esférico
	<i>Juveniles</i>	Negro a gris oscuro	Débil	Subanguloso	Esférico a subprismático
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	-	Subredondeado	Subprismático
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Redondeado	Esférico a subprismático
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: material juvenil presenta un alto grado de redondez y esfericidad; sugiere un mayor transporte					

Mineralogía de la muestra L14S con abundante material juvenil



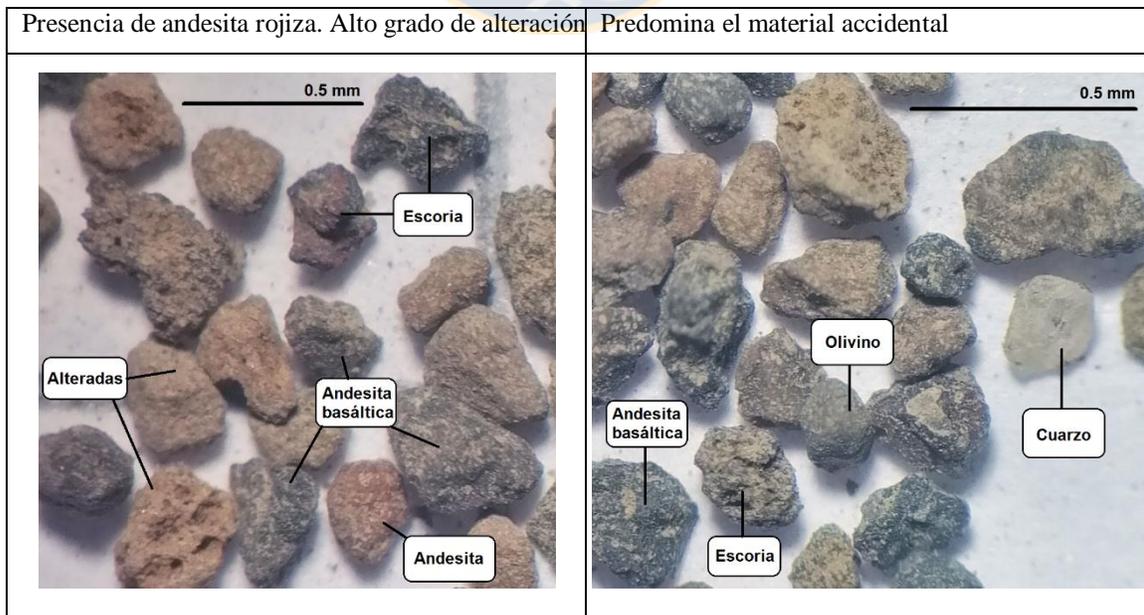
1.3. MUESTRA 1-14-19-L30					
COORDENADAS	19H 0250840 5701665				
LOCALIDAD	Ruta S-353 hacia Cherquenco por el lado W del volcán				
COLOR	Roca fresca: Negro				
	Roca alterada: Pardo oscuro				
FÁBRICA	Matriz soportada				
SELECCIÓN	Mala selección				
					
FRACCIÓN -6 ϕ a -3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Forma	
				Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Marrón a pardo	Pervasiva	Redondeado a subredondeado	Esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro con tonos marrones	Moderado	Anguloso	Subdiscoidal a esférico
	Andesita basáltica	Marrón oscuro a negro	Selectiva	Subanguloso	Esférico a subprismático
	Andesita	Pardo oscuro	Moderado	Anguloso a subanguloso	Esférico
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo claro	Pervasiva	Bien redondeado	Esférico a subprismático
FRACCIÓN -2 ϕ a 1 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro con tonos rojizos por alteración	Pervasiva	Subredondeado a redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro con tonos marrones	Selectiva	Muy anguloso	Subdiscoidal a esférico
	Andesita basáltica	Pardo oscuro	Moderada	Subredondeado	Subprismático

	Andesita	Pardo claro	Moderada	Subanguloso	Esférico a subprismático
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo rojizo	Pervasiva	Redondeado a bien redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso con tonos amarillos	Débil	Subanguloso	Esférico
	Plagioclasa	Semitransparente	-	Muy anguloso	Subprismático
FRACCIÓN 2 φ a 3 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Marrón oscuro a negro	Moderada	Subredondeado a redondeado	Subdiscoidal
	<i>Juveniles</i>	Negro con tonos pardos	Pervasiva	Redondeado a bien redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	Débil	Subanguloso	Esférico
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Redondeado	Esférico a subprismático
<p>ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: Presenta alto grado de alteración de color pardo rojiza, la cual concuerda con el alto grado de redondez y esfericidad de la mayoría de los clastos. Esta alteración podría deberse al clima y al exceso de precipitaciones. Se observa mayor % de vesículas, por lo tanto, es menos densa que los depósitos del lado E.</p>					



1.4. MUESTRA 1-14-19-L31						
COORDENADAS	19H 0246420 5703080					
LOCALIDAD	En la ruta S-374, lado W del volcán					
COLOR	Roca fresca: negro con tonos pardos					
	Roca alterada: pardo rojizo					
FÁBRICA	Matriz soportada					
SELECCIÓN	Mala selección					
						
					Forma	
FRACCIÓN -6 ϕ a -3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad	
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>					
	Escoria	Marrón oscuro a pardo rojizo	Moderada	Anguloso a subanguloso	Esférico a subprismático	
	<i>Accidentales (líticos)</i>					
	Basalto	Negro con tonos pardos	Débil	Muy anguloso a anguloso	Subdiscoidal a esférico	
	Andesita basáltica	Marrón a pardo oscuro	Selectiva	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático	
	Andesita	Pardo claro	Débil	Subanguloso	Esférico a subprismático	
	<i>Alterados</i>					
	Hidrotermales	Pardo claro a rojizo	Pervasiva	Redondeado a bien redondeado	Esférico a subprismático	
FRACCIÓN -2 ϕ a 1 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad	
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>					
	Escoria	Negro con tonos pardos	Moderada	Subanguloso	Prismático	
	<i>Accidentales (líticos)</i>					
	Basalto	Negro con tonos marrones	Selectiva	Muy anguloso a anguloso	Subdiscoidal a esférico	
	Andesita basáltica	Marrón con tonos pardos claros	Moderada	Subredondeado	Subdiscoidal	
	Andesita	Marrón claro con tonos	Moderada	Redondeado	Subdiscoidal	

		morados			
Granodiorita		Gris oscuro a pardo	Pervasiva	Anguloso	Esférico a subprismático
<i>Alterados</i>					
Hidrotermales		Pardo claro a rojizo	Pervasiva	Muy redondeado	Esférico a subprismático
<i>Cristales</i>					
Cuarzo		Blanco lechoso	Selectiva	Anguloso	Esférico a subprismático
Plagioclasa		Semitransparente	Débil	Anguloso	Subprismático
Olivino		Gris oscuro con tonos verdosos	-	Redondeado	Esférico a subprismático
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Marrón claro a pardo	Moderada	Subanguloso	Subdiscoidal a esférico
	<i>Juveniles</i>	Pardo claro a rojizo	Pervasiva	Subredondeado a redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	Débil	Subanguloso	Esférico
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	Selectiva	Redondeado	Esférico a subprismático
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: alto grado de alteración característico del lado W del volcán Llaima. Predomina material accidental. Se reconoce andesita rojiza por oxidación.					

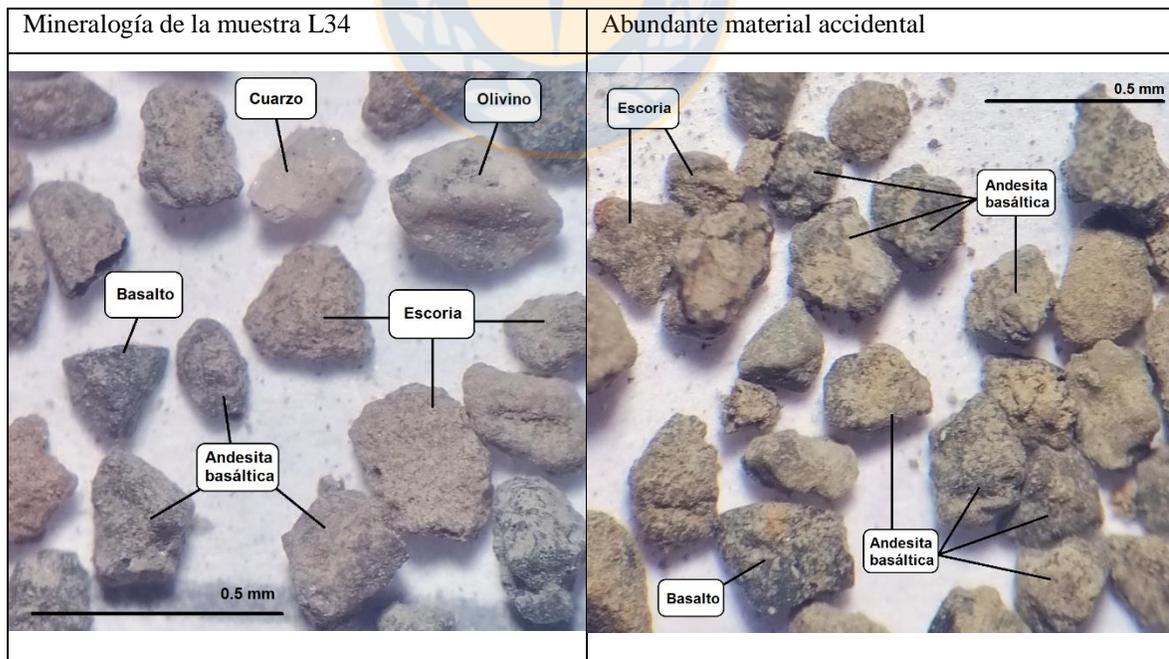


1.5. MUESTRA 1-17-19-L34	
COORDENADAS	19H 0257641 5727122
LOCALIDAD	Lado norte por ruta R-925-S , por la rivera de río.
COLOR	Roca fresca: Negro con tonos marrones Roca alterada: Marrón a pardo
FÁBRICA	Matriz soportada
SELECCIÓN	Mala selección



FRACCIÓN -6 ϕ a -3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Forma	
				Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro a gris oscuro	Débil	Subanguloso a subredondeado	Subdiscoidal a esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro	-	Anguloso a subanguloso	Subdiscoidal
	Andesita basáltica	Negro con tonos marrones	Selectiva	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático
	Andesita	Marrón oscuro	Selectiva	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático
	Granodiorita	Gris oscuro	Moderada	Subredondeado	Subprismático
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Marrón claro	Pervasiva	Muy redondeado	Esférico a subprismático
FRACCIÓN -2 ϕ a 1 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro a marón	Moderada	Subredondeado	Subdiscoidal a esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro	-	Muy anguloso a anguloso	Subdiscoidal a subprismático
	Andesita basáltica	Negro a marrón	Débil	Subredondeado	Esférico
	Andesita	Marrón a pardo oscuro	Débil	Subanguloso	Esférico

	Granodiorita	Gris oscuro a claro	Moderada	Subredondeado	Subprismático
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Marrón claro parduzco	Pervasiva	Muy redondeado a redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	-	Muy redondeado	Esférico
	Olivino	Gris claro con tonos verdoso	Selectiva	Redondeado a muy redondeado	Esférico
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Negro con tonos marrones	Selectiva	Anguloso a subanguloso	Esférico a subprismático
	<i>Juveniles</i>	Negro	Débil	Subanguloso a subredondeado	Subdiscoidal a subprismático
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	-	Subredondeado a redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Subanguloso a subredondeado	Esférico
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: Predomina material accidental. En general los componentes presentan un alto grado de redondez y esfericidad.					

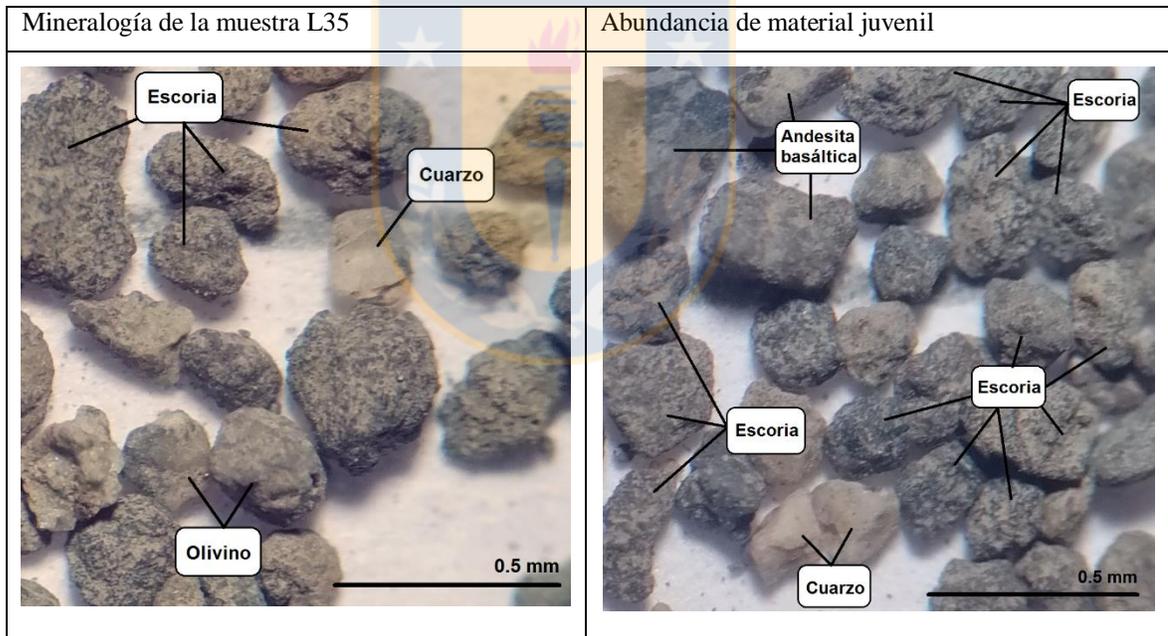


1.6. MUESTRA 1-18-19-L35	
COORDENADAS	19H 0257848 5726337
LOCALIDAD	Cercano a "Llaima camp" hacia el NE del volcán Llaima
COLOR	Roca fresca: Negro grisáceo Roca alterada: Marrón oscuro
FÁBRICA	Matriz soportada
SELECCIÓN	Mala selección



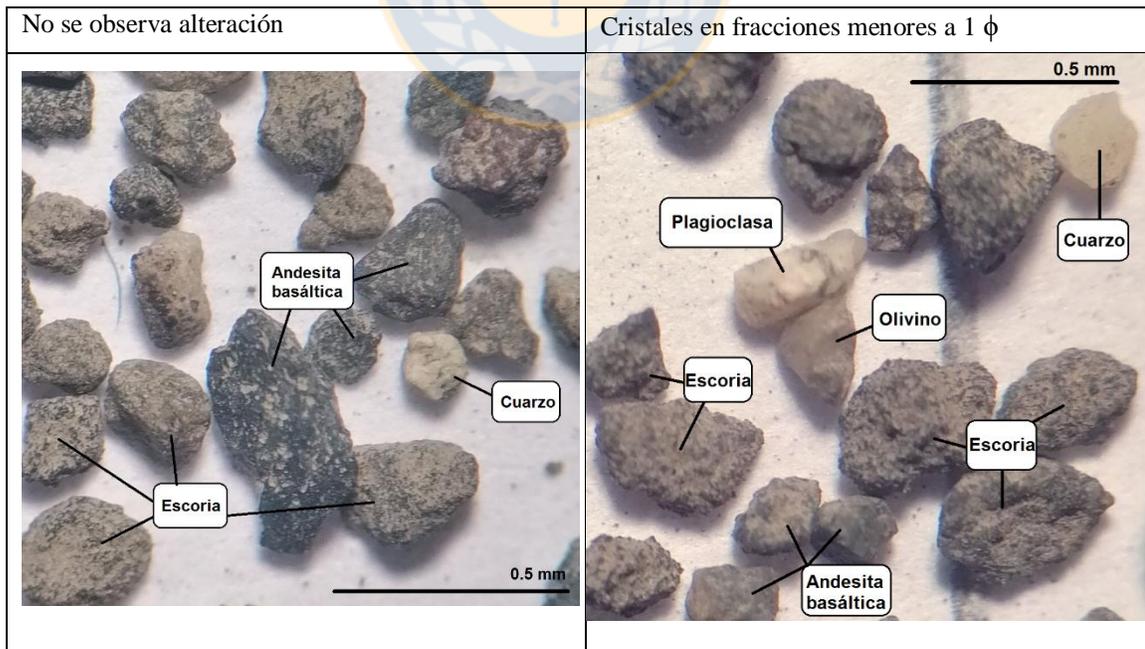
FRACCIÓN -6 φ a -3 φ	Composición	Color	Alteración	Forma	
				Redondez	Esféricidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	-	Subanguloso	Esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro grisáceo	-	Muy anguloso	Esférico a subprismático
	Andesita basáltica	Gris oscuro a marrón	-	Anguloso a subanguloso	Esférico
	Andesita	Negro grisáceo a marrón	-	Anguloso	Esférico a subprismático
	Granodiorita	Gris claro	Débil	Anguloso a subanguloso	Esférico
FRACCIÓN -2 φ a 1 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esféricidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	-	Anguloso a subanguloso	Esférico a subprismático
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro grisáceo	-	Anguloso	Esférico
	Andesita basáltica	Gris a marrón oscuro	-	Anguloso	Esférico
	Andesita	Negro marrón	-	Subanguloso	Esférico
	Granodiorita	Gris claro a oscuro	Débil	Redondeado	Esférico a subprismático

		<i>Cristales</i>				
		Cuarzo	Blanco lechoso	-	Subredondeado	Subprismático
		Olivino	Gris verdoso	-	Redondeado	Esférico
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ		Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
		<i>Accidentales</i>	Negro parduzco	Selectiva	Anguloso a subanguloso	Esférico a subprismático
		<i>Juveniles</i>	Negro	-	Subredondeado a redondeado	Subdiscoidal
		<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	-	Subredondeado	Subprismático
		<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Subanguloso a subredondeado	Subdiscoidal a esférico
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: Muestra parte inferior del afloramiento a 1 m de altura. Predomina material juvenil. No se observan signos de alteración.						



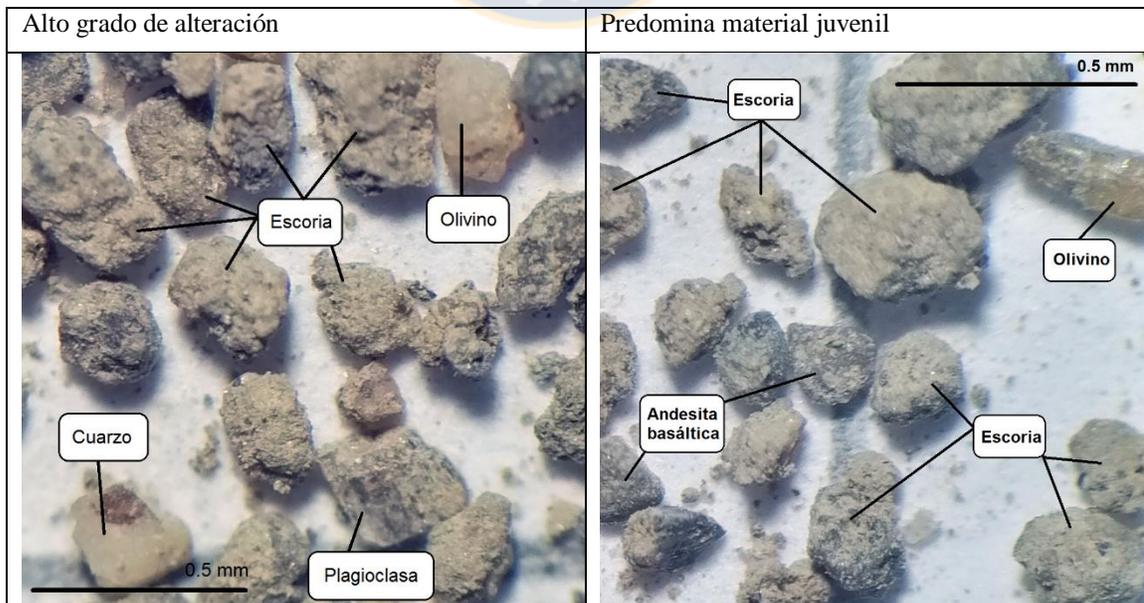
1.7. MUESTRA 1-18-19-L36					
COORDENADAS	19H 0257848 5726337				
LOCALIDAD	Cercano a "Llaima camp" hacia el NE del volcán Llaima				
COLOR	Roca fresca: Negro grisáceo				
	Roca alterada: Marrón oscuro				
FÁBRICA	Matriz soportada				
SELECCIÓN	Mala selección				
					
			Forma		
FRACCIÓN -6 φ a -3 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	-	Subanguloso a subredondeado	Subdiscoidal a esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro a gris oscuro	-	Muy anguloso a subredondeado	Esférico a subprismático
	Andesita basáltica	Negro marrón	-	Anguloso a subanguloso	Subdiscoidal a esférico
	Andesita	Negro grisáceo a marrón	-	Muy anguloso a anguloso	Esférico
	Granodiorita	Gris claro a oscuro	Débil	Anguloso	Esférico
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Marrón oscuro	Moderada	Redondeado	Esférico
FRACCIÓN -2 φ a 1 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	-	Subanguloso	Esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro	-	Anguloso	Esférico a subprismático
	Andesita basáltica	Negro con tonos marrones	Débil	Redondeado	Esférico

	Andesita	Negro con tonos morados	Selectiva	Subanguloso	Esférico
	Granodiorita	Gris claro a pardo	Pervasiva	Redondeado	Esférico
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	-	Subanguloso	Subprismático
	Olivino	Gris con tonos verdosos	-	Subredondeado	Esférico
	Plagioclasa	Blanco	-	Anguloso	Subprismático
FRACCIÓN 2 φ a 3 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Negro con tonos marrones	Selectiva	Subanguloso	Esférico a subprismático
	<i>Juveniles</i>	Negro	-	Subredondeado a redondeado	Subdiscoidal a esférico
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	-	Redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Subanguloso a subredondeado	Subdiscoidal a esférico
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: Muestra a 5 m de altura desde la base del afloramiento (mismo que L35). No se observa alteración.					



1.8. MUESTRA 1-18-19-L37						
COORDENADAS	19H 0257848 5726337					
LOCALIDAD	Cercano a "Llaima camp" hacia el NE del volcán Llaima					
COLOR	Roca fresca: Negro grisáceo Roca alterada: Marrón oscuro					
FÁBRICA	Matriz soportada					
SELECCIÓN	Mala selección					
						
						5 mm
					Forma	
FRACCIÓN -6 ϕ a -3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad	
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>					
	Escoria	Negro a marrón	Pervasiva	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático	
	<i>Accidentales (líticos)</i>					
	Basalto	Marrón oscuro	Selectiva	Anguloso	Discoidal a subprismático	
	Andesita basáltica	Pardo	Selectiva	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático	
	Andesita	Marrón a pardo	Selectiva	Anguloso	Esférico	
	Granodiorita	Gris claro a blanco	Pervasiva	Muy anguloso	Esférico a subprismático	
	<i>Alterados</i>					
	Hidrotermales	Pardo rojizo	Pervasiva	Redondeado	Esférico a subprismático	
FRACCIÓN -2 ϕ a 1 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad	
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>					
	Escoria	Negro marrón	Pervasiva	Redondeado	Esférico a subprismático	
	<i>Accidentales (líticos)</i>					
	Basalto	Negro	Moderada	Anguloso	Esférico	
	Andesita basáltica	Marrón oscuro	Selectiva	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático	

	Andesita	Pardo	Moderada	Subanguloso	Subprismático
	Granodiorita	Gris a blanco	Pervasiva	Muy anguloso a anguloso	Esférico a subprismático
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo rojizo	Pervasiva	Subredondeado a redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	Selectiva	Muy redondeado	Esférico
	Plagioclasa	Blanco	-	Anguloso	Subprismático
	Olivino	Gris a blanco con tonos verdoso	Selectiva	Redondeado	Esférico
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Marrón a pardo	Moderada	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático
	<i>Juveniles</i>	Negro	Pervasiva	Redondeado	Subdiscoidal a esférico
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	Selectiva	Subredondeado a redondeado	Esférico
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Subanguloso a subredondeado	Subdiscoidal a esférico
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: cerca de 1.5 m del techo, mismo afloramiento que L35 y L36. Presenta abundantes “cúmulos” de sedimentos fluviales					



1.9. MUESTRA 1-19-19-L38					
COORDENADAS	19H 0254662 5725503				
LOCALIDAD	Lado N cerca del lago ruta S-209-R				
COLOR	Roca fresca: Negro a marrón oscuro				
	Roca alterada: Pardo oscuro				
FÁBRICA	Matriz soportada				
SELECCIÓN	Mala selección				



FRACCIÓN -6 φ a -3 φ	Composición	Color	Alteración	Forma	
				Redondez	Esféricidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Marrón claro a pardo	Pervasiva	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Marrón oscuro	Pervasiva	Muy anguloso	Subdiscoidal a esférico
	Andesita basáltica	Marrón a pardo	Selectiva	Anguloso a subanguloso	Esférico a subprismático
	Andesita	Pardo oscuro	Pervasiva	Anguloso	Esférico
	Granodiorita	Gris claro a blanco	Selectiva	Muy anguloso	Esférico a subprismático
	<i>Alterados</i>				
Hidrotermales	Pardo oscuro a rojizo	Pervasiva	Subredondeado a redondeado	Esférico a subprismático	
FRACCIÓN -2 φ a 1 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esféricidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro con tonos marrones	Pervasiva	Anguloso	Esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro parduzco	Selectiva	Anguloso	Subprismático
	Andesita basáltica	Negra con tonos rojizos	Pervasiva	Subredondeado	Esférico a subprismático
	Andesita	Marrón a rojizo oscuro	Pervasiva	Subanguloso	Esférico

	Granodiorita	Gris claro a blanco	Selectiva	Subredondeado	Esférico
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo anaranjado	Pervasiva	Subanguloso	Esférico
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	-	Subredondeado	Subprismático
	Plagioclasa	Semitransparente	Débil	Anguloso	Subprismático
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Marrón oscuro	Selectiva	Subanguloso	Esférico a subprismático
	<i>Juveniles</i>	Negro a pardo	Pervasiva	Redondeado	Subdiscoidal a esférico
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	-	Subredondeado a redondeado	Esférico
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Subanguloso a subredondeado	Subdiscoidal a esférico
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: 0.5 m desde parte inferior. Abundancia de líticos accidentales. Presencia de andesitas oxidadas con coloración rojiza.					



1.10. MUESTRA 1-20-19-L39					
COORDENADAS	19H 0256997 5727546				
LOCALIDAD	En la ruta S-297-R al N, corte de camino				
COLOR	Roca fresca: Negro				
	Roca alterada: Marrón claro				
FÁBRICA	Matriz soportada				
SELECCIÓN	Mala selección				
					
			Forma		
FRACCIÓN -6 ϕ a -3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro oscuro	-	Subanguloso a redondeado	Subdiscoidal a subprismático
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro	-	Muy anguloso a anguloso	Esférico a subprismático
	Andesita basáltica	Negro grisáceo	-	Anguloso	Esférico a subprismático
	Andesita	Negro grisáceo	-	Anguloso a subanguloso	Esférico
	Granodiorita	Gris claro	Débil	Anguloso	Esférico
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Marrón oscuro	Moderada	Subredondeado	Subprismático
FRACCIÓN -2 ϕ a 1 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	-	Subanguloso	Subprismático
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro	-	Anguloso	Esférico
	Andesita basáltica	Negro grisáceo	Selectiva	Subanguloso	Esférico a subprismático
	Andesita	Negro con tonos morados	-	Subanguloso	Esférico

	Granodiorita	Gris claro	Débil	Anguloso a subanguloso	Esférico
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	Débil	Subredondeado a redondeado	Esférico a subprismático
	Plagioclasa	Semitransparente	-	Anguloso	Subprismático
	Olivino	Gris claro con tonos verdoso	-	Redondeado a muy redondeado	Esférico
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Negro a marrón oscuro	Selectiva	Subredondeado a redondeado	Subdiscoidal
	<i>Juveniles</i>	Negro con tonos pardos	-	Redondeado a bien redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	Débil	Subanguloso	Esférico
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Redondeado	Esférico a subprismático
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: sin grado de alteración hidrotermal ni oxidación. Casi la totalidad de los componentes mantienen su color negro.					



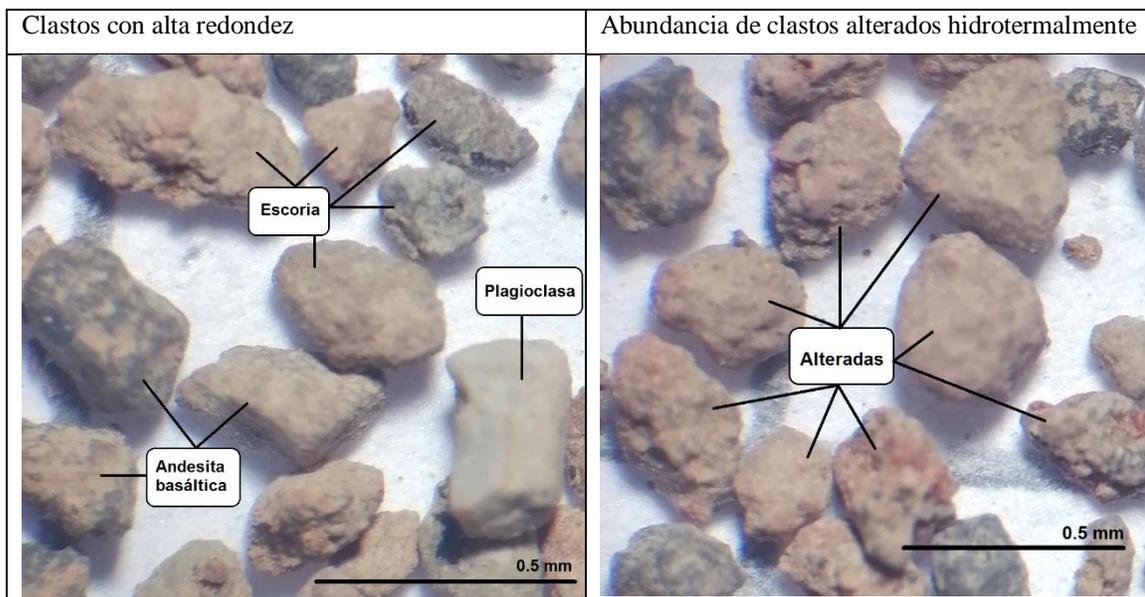
1.11. MUESTRA 1-22-19-L40						
COORDENADAS	19H 0251676 5718323					
LOCALIDAD	Camino privado hacia laguna Quepe, ruta S-209					
COLOR	Roca fresca:					
	Roca alterada:					
FÁBRICA	Matriz soportada					
SELECCIÓN	Mala selección					
						
					Forma	
FRACCIÓN -6 φ a -3 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad	
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>					
	Escoria	Negro a gris oscuro	Débil	Subanguloso a subredondeado	Subdiscoidal a esférico	
	<i>Accidentales (líticos)</i>					
	Basalto	Negro	-	Anguloso	Esférico a subdiscoidal	
	Andesita basáltica	Negro a marrón oscuro	Selectiva	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático	
	Andesita	Negro grisáceo	Débil	Muy anguloso	Esférico	
	Granodiorita	Gris claro	Débil	Anguloso	Esférico	
	<i>Alterados</i>					
	Hidrotermales	Marrón oscuro	Débil	Subredondeado	Subdiscoidal a esférico	
FRACCIÓN -2 φ a 1 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad	
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>					
	Escoria	Negro	Moderada	Subredondeado	Subprismático	
	<i>Accidentales (líticos)</i>					
	Basalto	Negro	Débil	Subanguloso	Esférico	
	Andesita basáltica	Negro a marrón	Débil	Subredondeado	Esférico a subprismático	

	Andesita	Marrón oscuro a pardo	Débil	Subredondeado	Subdiscoidal
	Granodiorita	Gris claro a blanco	Selectiva	Anguloso	Esférico a subprismático
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo oscuro	Pervasiva	Subanguloso	Esférico
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	-	Subredondeado a redondeado	Esférico a subprismático
	Plagioclasa	Semitransparente	-	Muy anguloso a anguloso	Subprismático
	Olivino	Gris con tonos verdoso	Débil	Redondeado a muy redondeado	Esférico
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Marrón oscuro	Moderada	Subanguloso	Subdiscoidal a esférico
	<i>Juveniles</i>	Negro a pardo	Selectiva	Subredondeado a redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	Débil	Subanguloso	Esférico
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	Selectiva	Redondeado	Esférico a subprismático
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: Componentes presentan un alto grado de redondez y se encuentran cubiertos por una capa de arcilla de coloración blanquecina. Indica mayor transporte.					



1.12. MUESTRA 1-25-19-L41					
COORDENADAS	19H 0245296 5716247				
LOCALIDAD	Ruta S-263 hacia Santa María				
COLOR	Roca fresca: Marrón oscuro				
	Roca alterada: Pardo rojizo				
FÁBRICA	Matriz soportada				
SELECCIÓN	Mala selección				
					
			Forma		
FRACCIÓN -6 ϕ a -3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	Moderada	Anguloso a subredondeado	Esférico a subprismático
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro	-	Muy anguloso	Esférico a subprismático
	Andesita basáltica	Negro con tonos marrones	Selectiva	Subanguloso	Subdiscoidal a esférico
	Andesita	Negro a pardo	Selectiva	Subanguloso	Esférico
	Granodiorita	Gris claro a blanco	Moderada	Muy anguloso a anguloso	Esférico
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo	Pervasiva	Redondeado a bien redondeado	Subprismático
FRACCIÓN -2 ϕ a 1 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	Débil	Subanguloso	Subprismático
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro	-	Anguloso	Esférico a subdiscoidal
	Andesita basáltica	Negro a marrón	Selectiva	Subredondeado	Esférico a subdiscoidal

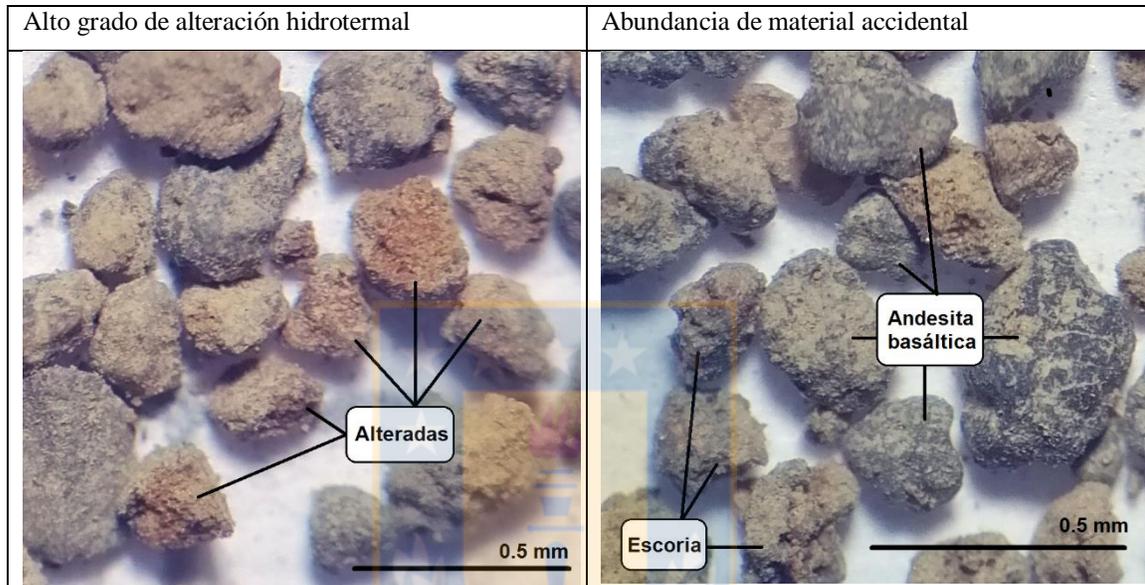
	Andesita	Negro con tonos parduzcos	-	Anguloso a subanguloso	Esférico
	Granodiorita	Gris claro a blanco	Moderada	Muy anguloso	Esférico
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo rojizo	Pervasiva	Redondeando	Subprismático
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	Selectiva	Anguloso	Esférico a subprismático
	Plagioclasa	Semitransparente	-	Muy anguloso a anguloso	Subprismático
	Olivino	Gris con tonos verdoso	Selectiva	Redondeado	Esférico
FRACCIÓN 2 φ a 3 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Marrón oscuro a negro	Moderada	Subredondeado a redondeado	Subdiscoidal
	<i>Juveniles</i>	Negro a pardo	Moderada	Redondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	Débil	Subanguloso	Esférico
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Redondeado	Esférico a subprismático
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: afloramiento muy pequeño al borde del camino ~1 m de espesor. Algunos accidentales tienen alto grado de redondez.					



1.13. MUESTRA 1-28-19-L42					
COORDENADAS	19H 0251158 5700831				
LOCALIDAD	Ruta S-335 forestal lado W del volcán				
COLOR	Roca fresca: Gris oscuro a negro				
	Roca alterada: Marrón claro				
FÁBRICA	Matriz soportada				
SELECCIÓN	Mala selección				
					
FRACCIÓN -2 ϕ a 1 ϕ	Composición	Color	Alteración	Forma	
				Redondez	Esfericidad
<i>Juveniles (piroclastos)</i>					
	Escoria	Negro	Pervasiva	Redondeados	Esféricos
<i>Accidentales (líticos)</i>					
	Basalto	Negro	Selectiva	Muy anguloso a anguloso	Esférico a subprismático
	Andesita basáltica	Negro a marrón	Moderada	Subredondeado	Subdiscoidal
	Andesita	Marrón oscuro a rojizo	Moderada	Subredondeado	Esférico
<i>Alterados</i>					
	Hidrotermales	Pardo rojizo	Pervasiva	Redondeado	Esférico a subprismático
<i>Cristales</i>					
	Cuarzo	Blanco lechoso	Débil	Subredondeado a redondeado	Esférico
	Plagioclasa	Semitransparente	-	Muy anguloso a anguloso	Subprismático
	Olivino	Gris verdoso	Selectiva	Redondeado	Esférico
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Negro con tonos pardos	Moderada	Anguloso a subredondeado	Esférico
	<i>Juveniles</i>	Negro a gris oscuro	Moderada	Subanguloso a redondeado	Esférico a subprismático

<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	Selectiva	Subredondeado	Subprismático
<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Redondeado	Esférico a subprismático

ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: En los bloques se encontró una vesícula rellena de un material más félsico. Grado de compactación bajo. Mayor % de accidentales. Alto grado de alteración hidrotermal.



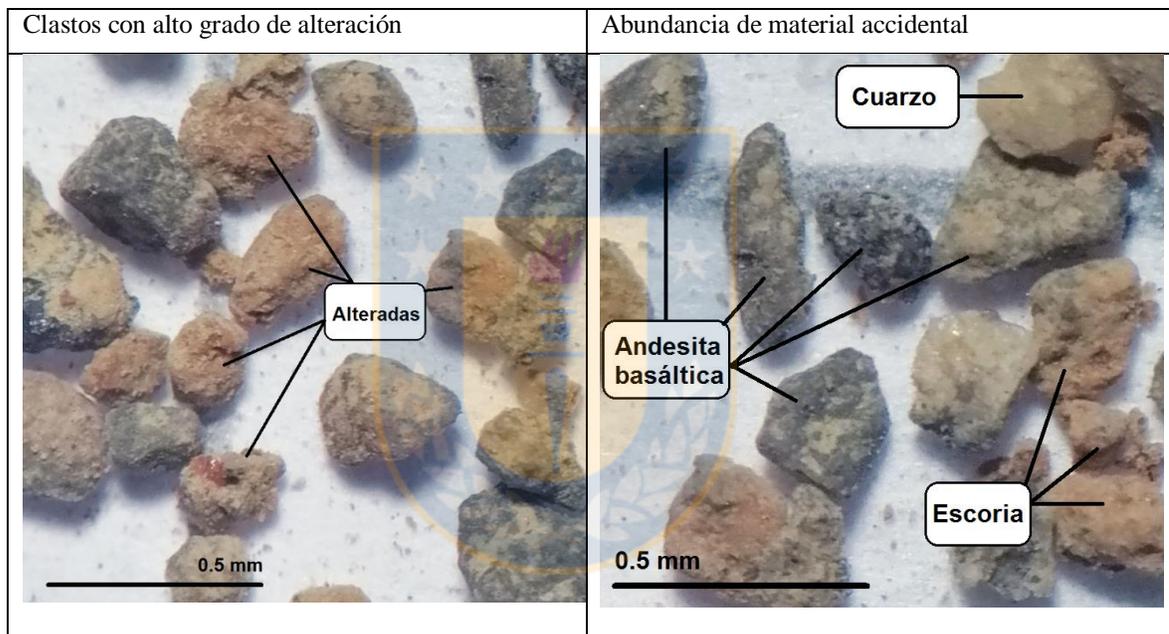
1.14. MUESTRA 1-30-19-L43	
COORDENADAS	19H 0250698 5701758
LOCALIDAD	Ruta S-353, lado W del volcán
COLOR	Roca fresca: Negro a marrón Roca alterada: Pardo claro
FÁBRICA	Matriz soportada
SELECCIÓN	Mala selección



		Forma			
FRACCIÓN -6 ϕ a -3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro a marrón oscuro	Moderada	Subanguloso	Subdiscoidal a subprismático
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Andesita basáltica	Marrón oscuro	Moderada	Anguloso	Esférico a subprismático
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo rojizo	Pervasiva	Redondeado a muy redondeado	Esférico a subprismático
FRACCIÓN -2 ϕ a 1 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Pardo con tonos anaranjados	Pervasiva	Subredondeado a redondeado	Esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Andesita basáltica	Negros con tonos marrones	Moderada	Subanguloso	Esférico
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Tonos anaranjados	Pervasiva	Redondeado a muy redondeado	Esférico
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	Selectiva	Subredondeado a redondeado	Esférico

FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Negro a marrón	Moderada	Anguloso a subanguloso	Esférico
	<i>Juveniles</i>	Pardo oscuro	Pervasiva	Subanguloso a subredondeado	Esférico a subprismático
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	Selectiva	Subredondeado	Subprismático
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	Selectiva	Redondeado	Esférico a subprismático

ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: Capa inferior del afloramiento, alto grado de alteración hidrotermal dificultando clasificación de accidentales.



1.15. MUESTRA 1-30-19-L44					
COORDENADAS	19H 0250698 5701758				
LOCALIDAD	Ruta S-353, lado W del volcán				
COLOR	Roca fresca: Negro a marrón				
	Roca alterada: Pardo claro				
FÁBRICA	Matriz soportada				
SELECCIÓN	Mala selección				



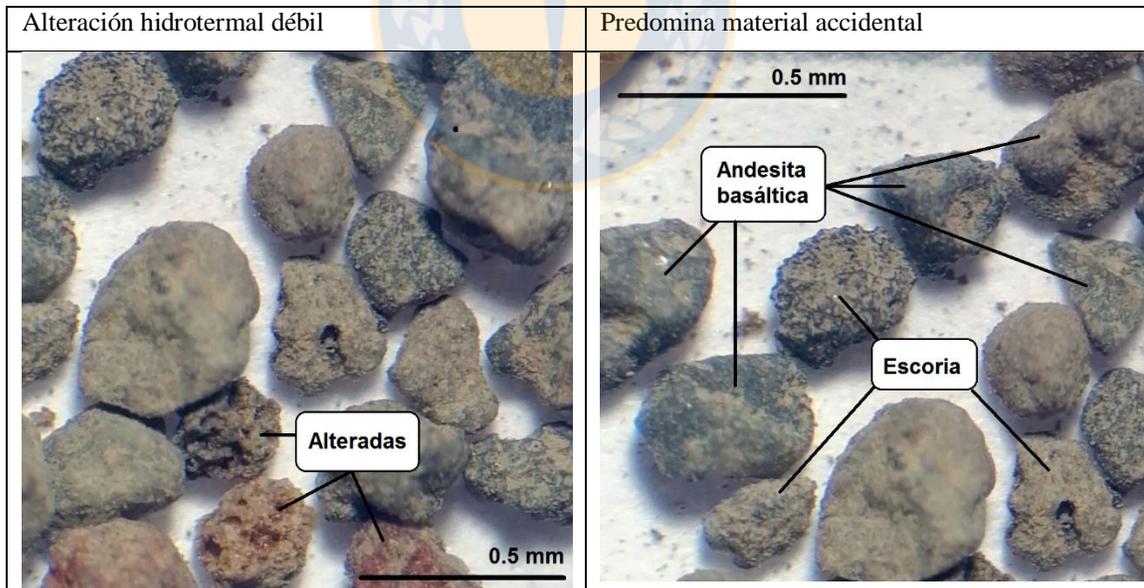
FRACCIÓN -6 φ a -3 φ	Composición	Color	Alteración	Forma	
				Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro con tonos marrones	Moderada	Subanguloso	Subdiscoidal a esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Andesita basáltica	Marrón oscuro a claro	Selectiva	Muy anguloso a anguloso	Esférico a subprismático
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo rojizo	Pervasiva	Redondeado a muy redondeado	Esférico a subprismático
FRACCIÓN -2 φ a 1 φ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Pardo anaranjado	Pervasiva	Subredondeado	Subdiscoidal a subprismático
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Andesita basáltica	Negro con tonos marrones	Moderada	Subanguloso	Subprismático
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Tonos anaranjado	Pervasiva	Redondeados a bien redondeado	Esférico
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	Moderada	Redondeado	Esférico

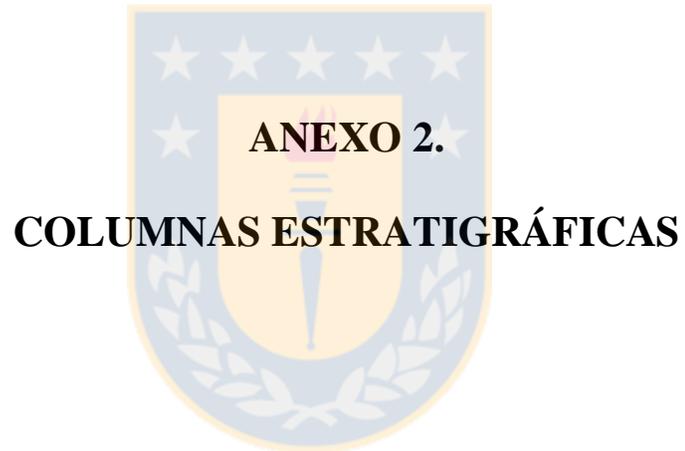
	Plagioclasa	Semitranspa- rente	Selectiva	Anguloso	Subprismático
	Olivino	Gris verdoso	Selectiva	Redondeado	Esférico
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Negro a marrón	Moderada	Muy anguloso a subanguloso	Esférico
	<i>Juveniles</i>	Pardo oscuro	Pervasiva	Subanguloso a subredondeado	Esférico
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	Selectiva	Subredondeado	Subprismático
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	Selectiva	Redondeado	Esférico a subprismático
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: Capa inferior del afloramiento (mismo que L43), menor grado de alteración hidrotermal que L43 afectando a componentes juveniles y accidentales, estos últimos conservan bordes más angulosos.					



1.16. MUESTRA 1-30-19-L45					
COORDENADAS	19H 0248529 5707924				
LOCALIDAD	Fundo Los Lleuques, lado W del volcán				
COLOR	Roca fresca: negro a gris oscuro				
	Roca alterada: tonos marrones				
FÁBRICA	Matriz soportada				
SELECCIÓN	Mala selección				
					
			Forma		
FRACCIÓN -6 ϕ a -3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	Débil	Subanguloso a subredondeado	Subdiscoidal
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro	-	Muy anguloso	Esférico
	Andesita basáltica	Negro a marrón	Débil	Anguloso a subanguloso	Esférico a subprismático
	Andesita	Tonos marrones	Selectiva	Subanguloso	Subprismático
	Granodiorita	Gris a blanco	Débil	Muy anguloso	Esférico
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo	Pervasiva	Redondeado	Subprismático
FRACCIÓN -2 ϕ a 1 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Juveniles (piroclastos)</i>				
	Escoria	Negro	Débil	Subanguloso	Subdiscoidal a esférico
	<i>Accidentales (líticos)</i>				
	Basalto	Negro	-	Muy anguloso a anguloso	Esférico a subprismático
	Andesita basáltica	Gris oscuro con tonos marrones	Selectiva	Anguloso	Esférico
	Andesita	Marrón oscuro	Selectiva	Subanguloso	Esférico

	Granodiorita	Gris claro a blanco	Débil	Muy anguloso	Esférico a subprismático
	<i>Alterados</i>				
	Hidrotermales	Pardo rojizo	Pervasiva	Redondeado	Subprismático
	<i>Cristales</i>				
	Cuarzo	Blanco lechoso	-	Subredondeado a redondeado	Esférico a subprismático
	Plagioclasa	Semitransparente	-	Anguloso	Prismático
FRACCIÓN 2 ϕ a 3 ϕ	Composición	Color	Alteración	Redondez	Esfericidad
	<i>Accidentales</i>	Negro con tonos pardos	Selectiva	Subanguloso	Esférico a subprismático
	<i>Juveniles</i>	Negro	Débil	Subanguloso a redondeado	Subdiscoidal
	<i>Cristales accidentales</i>	Blanco opaco	-	Subredondeado	Subprismático
	<i>Cristales juveniles</i>	Tonos café y verdosos	-	Subanguloso	Esférico
ALTERACIÓN Y OTRAS OBSERVACIONES: grado muy leve de alteración hidrotermal.					





ÍNDICE

		Página
2. 1.	Leyenda generalizada de las columnas estratigráficas	152
2. 2.	Columna L13S y L14S	153
2. 3.	Columna L35/L36/L37	155
2. 4.	Columna L38	157
2. 5.	Columna L39	158
2. 6.	Columna L40	160
2. 7.	Columna C2	162
2. 8.	Columna L34	164
2. 9.	Columna L30	165
2.10.	Columna L31	166
2.11.	Columna L41	167
2.12.	Columna L42	168
2.13.	Columna L43/44	169
2.14.	Columna L45	170
2.15.	Dataciones radiocarbono calibradas	171



2.1. Leyenda generalizada de las columnas estratigráficas

LEYENDA

	Suelo
	Retrabajo
	Secuencia limosa
	Depósito piroclástico con estratificación cruzada y paralela
	Depósito de flujo de ceniza y escoria con estratificación difusa
	Depósito macizo de flujo de ceniza y escoria
	Depósito macizo de flujo de escoria y ceniza, rico en material juvenil

Simbología

	Contacto neto
	Carbón
	Pipas de desgasificación
	Bloques

Granulometría

Cf: Ceniza fina (< 0.06 mm)

Cg: Ceniza gruesa (0.06 - 2 mm)

Lpf: Lapilli fino (2 - 16 mm)

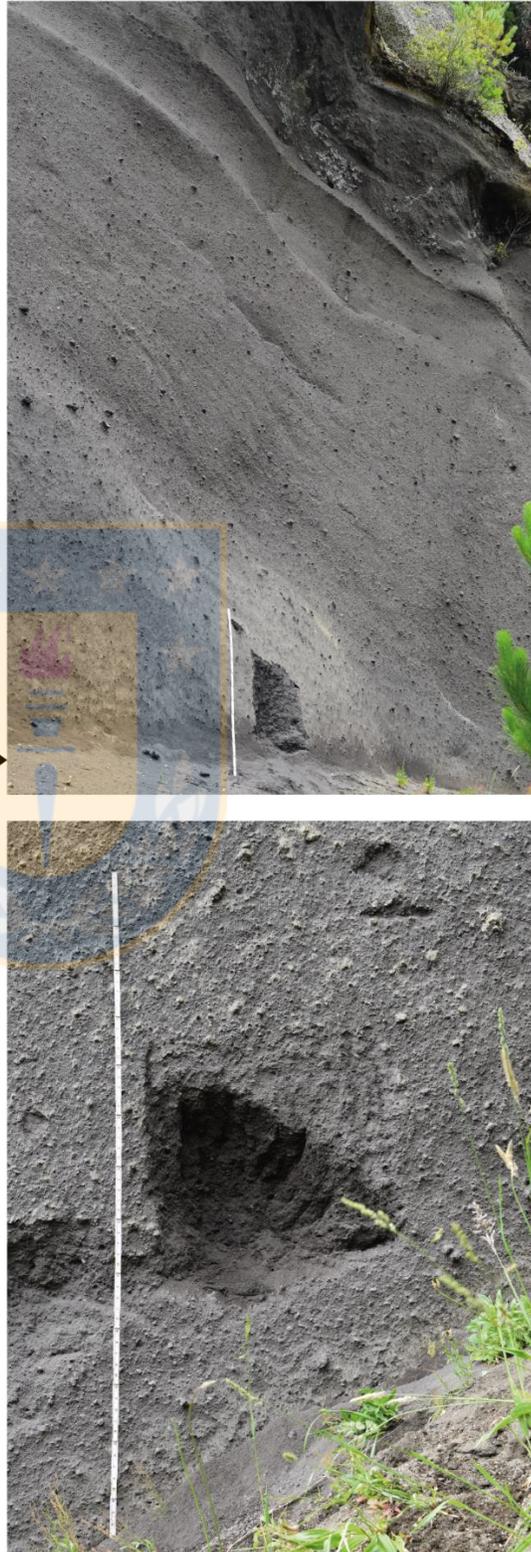
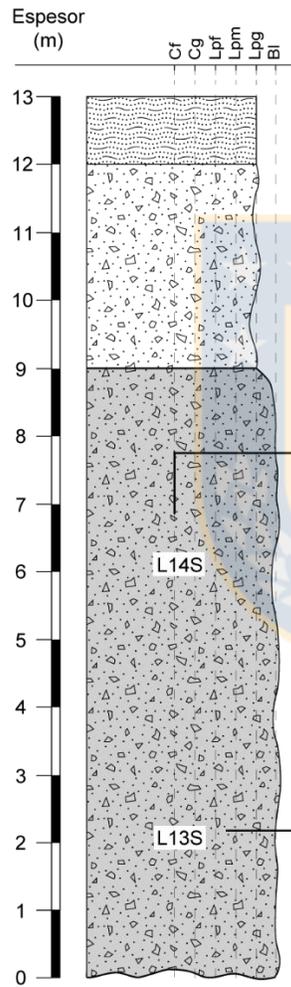
Lpm: Lapilli medio (16 - 32 mm)

Lpg: Lapilli grueso (32 - 64 mm)

Bl: Bloques (> 64 mm)

2.2. Columna L13S y L14S (19H 0271804 E / 5705515 S)

Unidad inferior: Curacautín 1. Sector E del volcán



0 – 9 m: Base no expuesta de capa escoriácea de color gris oscuro, matriz soportada, con clastos subangulosos a esféricos y subprismáticos, masiva con pobre selección, no se observa gradación ni estructuras. Se encuentran líticos de granodiorita. Hay abundante material juvenil.

9 – 12 m: Capa de color pardo con escasos bloques y menor porcentaje de partículas juveniles, matriz soportada con clastos subredondeados a esféricos, con mala selección y sin presencia de estratificación o estructuras.

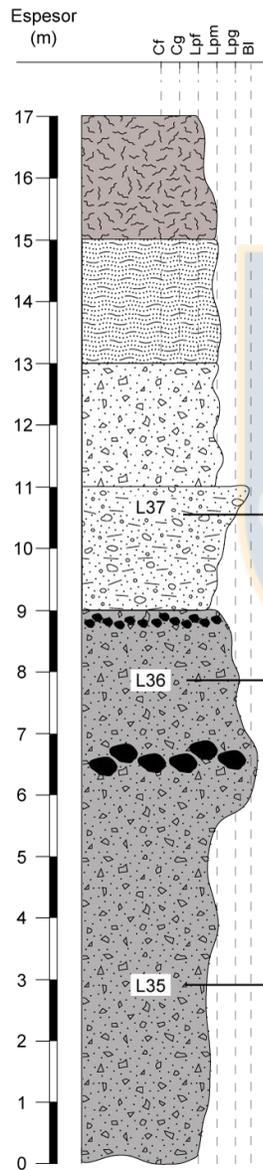
12 – 13 m: Depósito retrabajado con mayor grado de redondeamiento en sus clastos y coloración parduzca. Presenta estratificación paralela difusa.

*Escala de 2 metros en las fotografías.



2.3. Columna L35/L36/L37 (19H 0257848 E / 5726337 S)

Unidad inferior: Curacautín 1. Sector N del volcán



0 – 9 m: Capa masiva, matriz soportada, granodecreciente hacia techo, con tamaño ceniza fina a gruesa y lapilli con presencia de bloques. Moda de piroclastos lapilli fino, con 3-5 % de accidentales y ~1% bloques. Grado de compactación bajo a moderado. Sobre los 6 m aumenta abruptamente la concentración de bloques (en la misma unidad). Luego, vuelve a predominar la ceniza y lapilli en la capa masiva, con ≤ 1 % bloques, empobrecido en accidentales hacia techo.

9 – 11 m: Estratificación difusa. Otro cambio con aumento de bloques hacia techo (~ 25%) pero estos son de menor tamaño.

11 – 13 m: Capa masiva y matriz soportada con abundante ceniza. Ausencia de bloques, ≤ 1 % de accidentales, con una incipiente estratificación difusa en la parte inferior.

13 – 15 m: Depósito retrabajado con $> 90\%$ de los bloques son accidentales y muy redondeados.

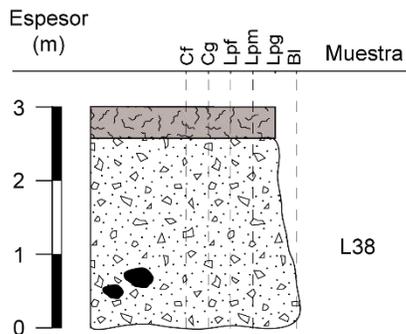
15 – 17 m: Depósito de paleosuelo, con retrabajo y ceniza entre sus capas.

*Escala de 2 metros en las fotografías.



2.4. Columna L38 (19H 0254662 E / 5725503 S)

Unidad inferior: Curacautín 1. Sector N del volcán.



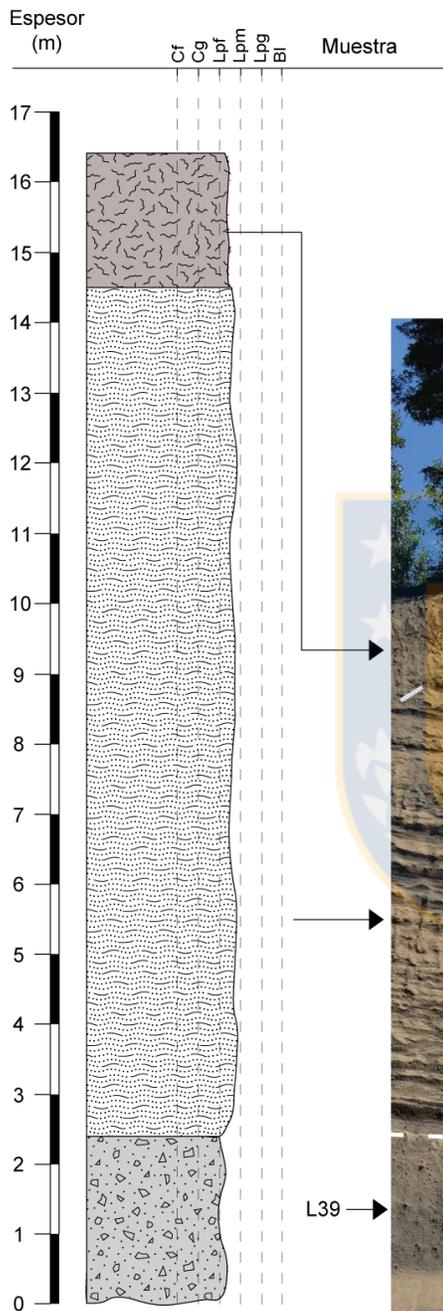
0 – 2,5 m: Capa masiva con escasos bloques, matriz soportado con clastos félsicos y abundante ceniza fina a lapilli grueso (moda). Partículas angulares a subangulares y esfericidad baja a moderada. No se expone la base ni se observa capas de retrabajo. Depósito con bajo grado de compactación.

2,5 – 3 m: Cubierta de suelo con abundantes raíces que se distribuyen incluso en la ignimbrita.

*Escala de 2 metros en las fotografías.

2.5. Columna L39 (19H 0256997 E / 5727546 S)

Unidad inferior: Curacautín 1. Sector N del volcán.



L39 →

0 – 2,5 m: Depósito masivo y de pobre selección, matriz soportado. Con cerca de 10 a 15% de matriz de ceniza a lapilli con moda lapilli fino. El material juvenil es subredondeado, máfico de grano fino y vesicular. Contiene inclusiones líticas y cumulosos. Los accidentales son subangulares de composición intermedia a félsica y tamaño lapilli como moda.

2,5 – 14,5 m: Capas de retrabajo laminadas que no siguen la topografía. Son grano soportados, con poco material juvenil. Las partículas son muy redondeadas y de coloración parduzca muy disgregables inmersas en una matriz de barro. Moda lapilli grueso

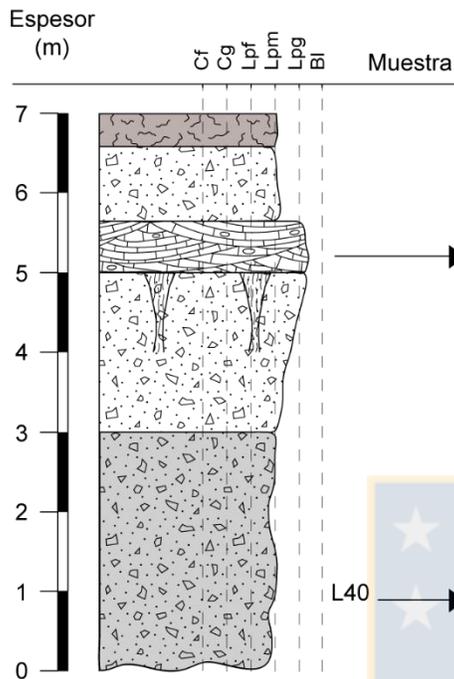
14,5 – 16,5 m: Cubierta de suelo.

*Escala de 2 metros en las fotografías.



2.6. Columna L40 (19H 0251676 E / 5718323 S)

Unidad inferior: Curacautín 1. Sector W del volcán.



0 – 3 m: Depósito masivo de selección moderada a pobre y matriz soportado. Tiene < 1% de bloques con abundante ceniza fina en superficie fresca. La matriz es de ceniza fina a lapilli medio y grueso, cuya moda es lapilli medio. El material juvenil es vesicular a denso, subredondeado y los bloques son grisáceos. Algunos juveniles contienen pequeñas inclusiones líticas (< 2 mm). Las partículas accidentales son subangulares y de composición intermedia. El depósito está indurado debido al gran porcentaje de ceniza. La base no está expuesta. No hay evidencia de retrabajo.

3 – 5 m: Capa masiva, matriz soportada con aumento de tamaño de los clastos a ceniza gruesa y lapilli grueso. Estos son angulares a subangulares con esfericidad moderada. Presenta pipas de desgasificación que terminan abruptamente en el contacto con la capa de oleada.

5 – 5,5 m: Depósito de oleada con estratificación cruzada y paralela. Aumento de granulometría en general y es clastosoportado. Representa un pulso eruptivo diferente.

5,5 – 6,5 m: Depósito masivo, matriz soportado con ceniza gruesa a lapilli medio, moda lapilli medio, algunos piroclastos están finamente vesiculados. El contacto con el paleosuelo es abrupto.

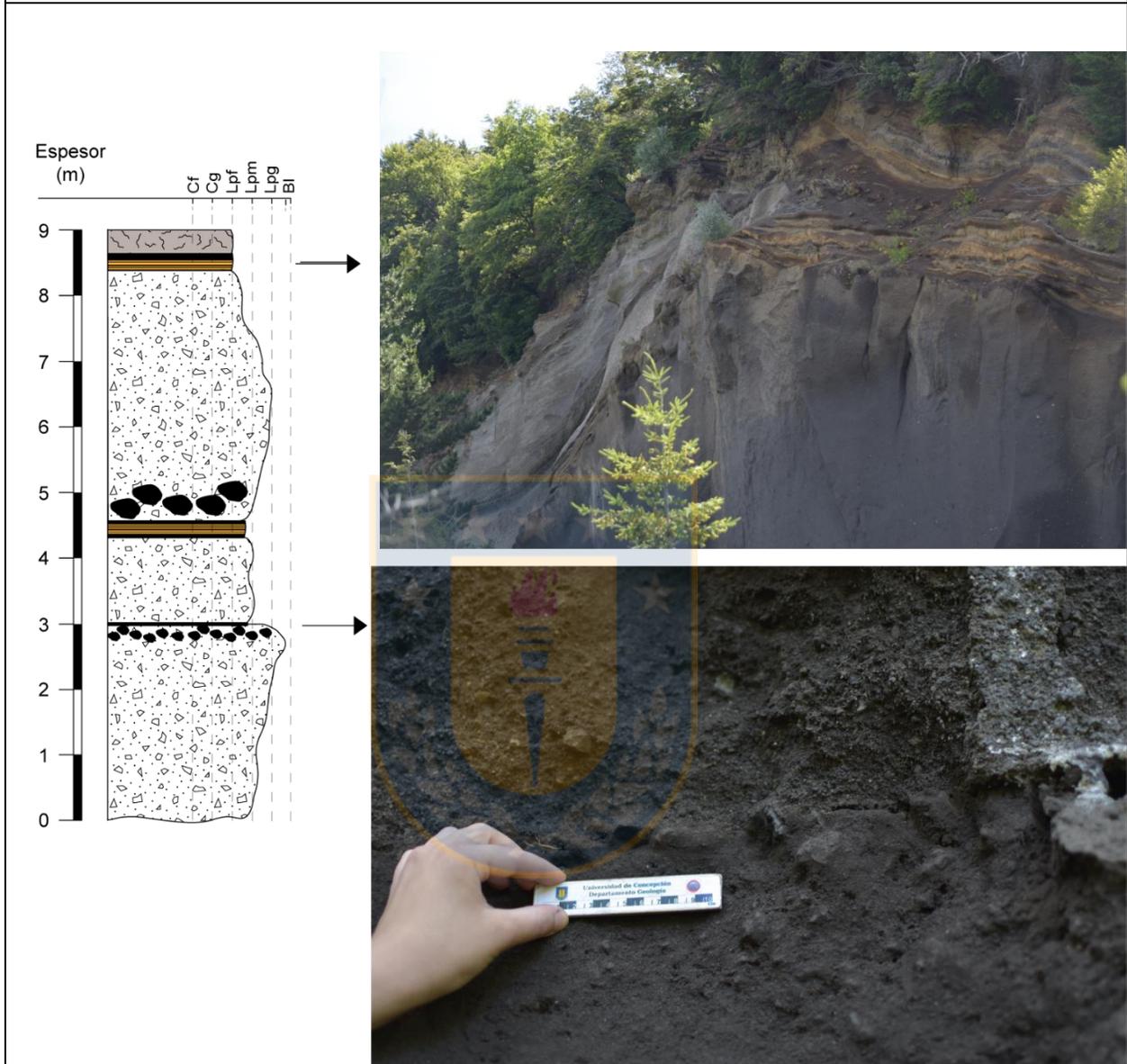
6,5 – 7 m: Cubierta de suelo y paleosuelo con abundantes raíces.

*Escala de 2 metros en las fotografías.



2.7. Columna C2 (19H 0271717 E / 5705328 S)

Unidad superior: Curacautín 2. Sector E del volcán.



0 – 3 m: Unidad C2a. Depósito masivo de color negro en superficie fresca, matriz soportada y disgregable. Tiene clastos de granodiorita y material accidental. Presenta mala selección y las partículas son de ceniza fina hasta bloques cercanos a los 6 cm que se hacen más recurrentes hacia techo, sus partículas tienen poca esfericidad y los clastos son subangulosos a subredondeados.

3 – 4,5 m: Unidad C2b. En la parte inferior está el contacto neto y concordante que separa C2a y C2b. La base del contacto tiene buena selección que disminuye mientras se aleja del contacto.

Superior al contacto está la unidad C2b con un espesor de 1.30 m. Es matriz soportada con ceniza gruesa a fina, de mediana selección y piroclastos de escorias subangulosos hacia techo, donde disminuye el % de los mismos formando una capa de 4 a 5 cm de ceniza fina. Tiene una granulometría más fina que C2a, siendo más competente. Hacia techo aparece una secuencia de retrabajo limosos que la separa de C2c

4,5 – 8,5 m: Unidad C2c. Corresponde al techo de la secuencia completa de Curacautín 2. En base aumenta el % de bloques, estos son de mayor tamaño superando los 10 cm. Es matriz soportado, con pobre selección, partículas juveniles subangulosas y con esfericidad moderada a baja. Granulometría desde ceniza gruesa a fina hasta lapilli grueso, con media de lapilli fino.

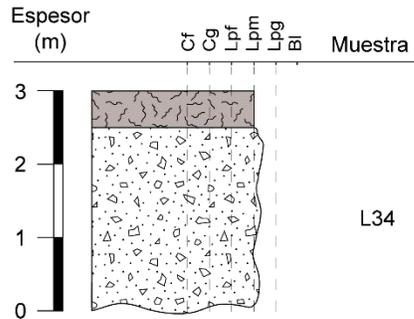
8,5 – 9 m: Reaparece la secuencia de retrabajo limosa seguida por la superficie de paleosuelo que cubre a la unidad superior.

*Escala de 10 cm en la fotografía.



2.8. Columna L34 (19H 0257641 E / 5727122 S)

Unidad superior: Curacautín 2. Sector N del volcán.



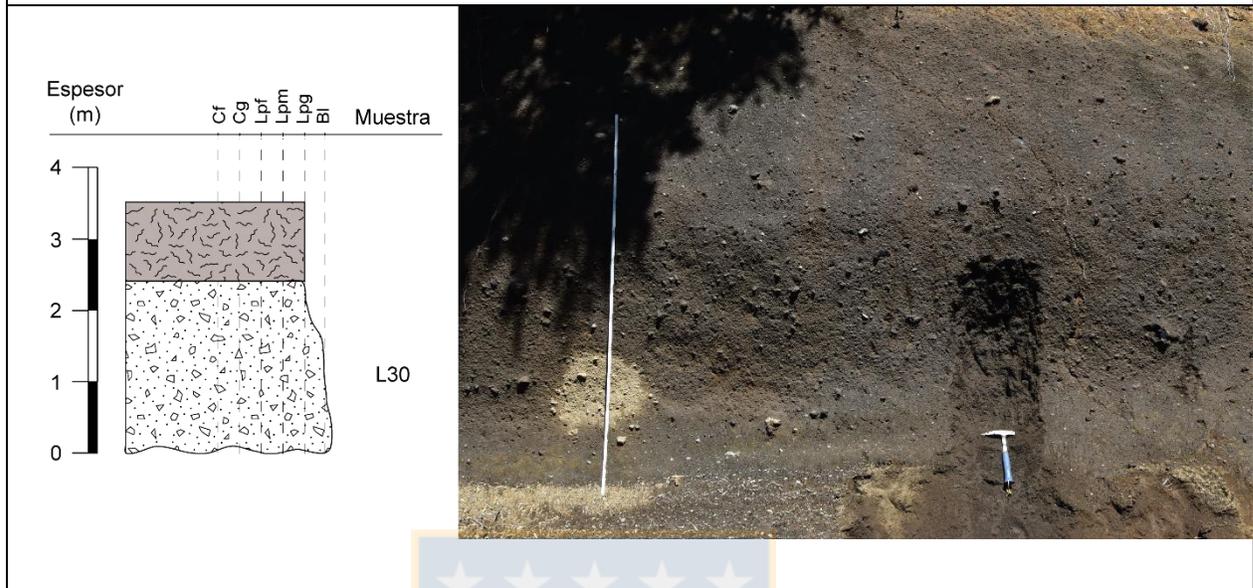
0 – 2,5 m: Depósito de capa masiva, matriz soportada de ceniza fina a gruesa con una media de lapilli grueso de coloración grisácea. Las raíces de los árboles atraviesan gran parte del depósito. No hay evidencia de trabajo. Tiene <1% de bloques, <1 % líticos y accidentales. Los líticos son subangulares y los piroclastos juveniles son subredondeados. El material juvenil contiene inclusiones de partículas accidentales. El material accidental es máfico, no se ve granodiorita en la superficie expuesta. Las partículas juveniles son una mezcla entre densas y vesiculares. Líticos incrementan ligeramente hacia techo.

2,5 m – 3 m: Cobertura de paleosuelo con abundantes raíces.

*Escala de 2 metros en las fotografías.

2.9. Columna L30 (19H 0250840 E / 5701665 S)

Unidad superior: Curacautín 2. Sector W del volcán.



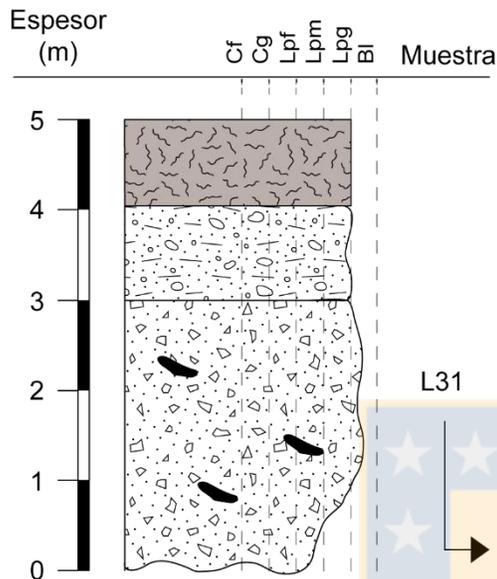
0 – 2,5 m: Exposición de color café en superficie con piroclastos máficos de mayor tamaño. Clastos son negros a gris oscuro, son vesiculares, subangulares a subredondeados. El depósito es matriz soportado, no hay evidencia de estructuras de flujo. El material accidental es angular a subangular. Existe abundante lapilli medio a grueso y bloques, y se reconoce ceniza en superficie fresca.

2,5 m – 3,5 m: Cobertura de paleosuelo.

*Escala de 2 metros en las fotografías.

2.10. Columna L31 (19H 0246420 E / 5703080 S)

Unidad superior: Curacautín 2. Sector W del volcán.



0 – 3 m: Depósito masivo, con abundantes restos de carbón. Hacia la parte inferior es grano creciente hacia techo con granulometría de ceniza a lapilli fino, con partículas vesiculares, subangulosas a redondeadas y con esfericidad moderada. Presencia de bloques esporádicos. En la parte superior la unidad matriz soportada tiene partículas de ceniza gruesa a lapilli grueso, con mala selección y disgregable. Los clastos son más angulosos a subangulosos entre 0.5 a 10 cm. Se observan líticos vesiculares y en general es grano decreciente.

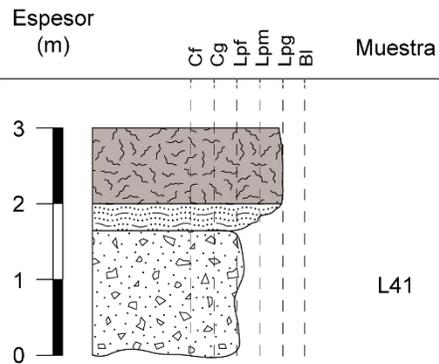
3 m – 4 m: Capa con estratificación difusa que aparece de forma intermitente. Es matriz soportado, con clastos subangulosos y redondeados. La granulometría tiende a ser de menor tamaño con moda lapilli grueso. Presenta escasos bloques.

4 m – 5 m: Cobertura de paleosuelo con abundantes raíces que atraviesan la unidad subyacente.

*Escala de 34 cm (martillo geológico) en la fotografía.

2.11. Columna L41 (19H 0245296 E / 5716247 S)

Unidad superior: Curacautín 2. Sector W del volcán.



0 – 1,5 m: Capa masiva, matriz soportada, con clastos angulares y redondeados, disgregable y la superficie está cubierta por una capa de tierra. No presenta estructuras ni restos de carbón. Predomina el material accidental. Los fragmentos juveniles son ceniza fina a grueso hasta lapilli fino. Algunos clastos presentan inclusiones y xenocristales o cumulados de ~ 4 mm de largo.

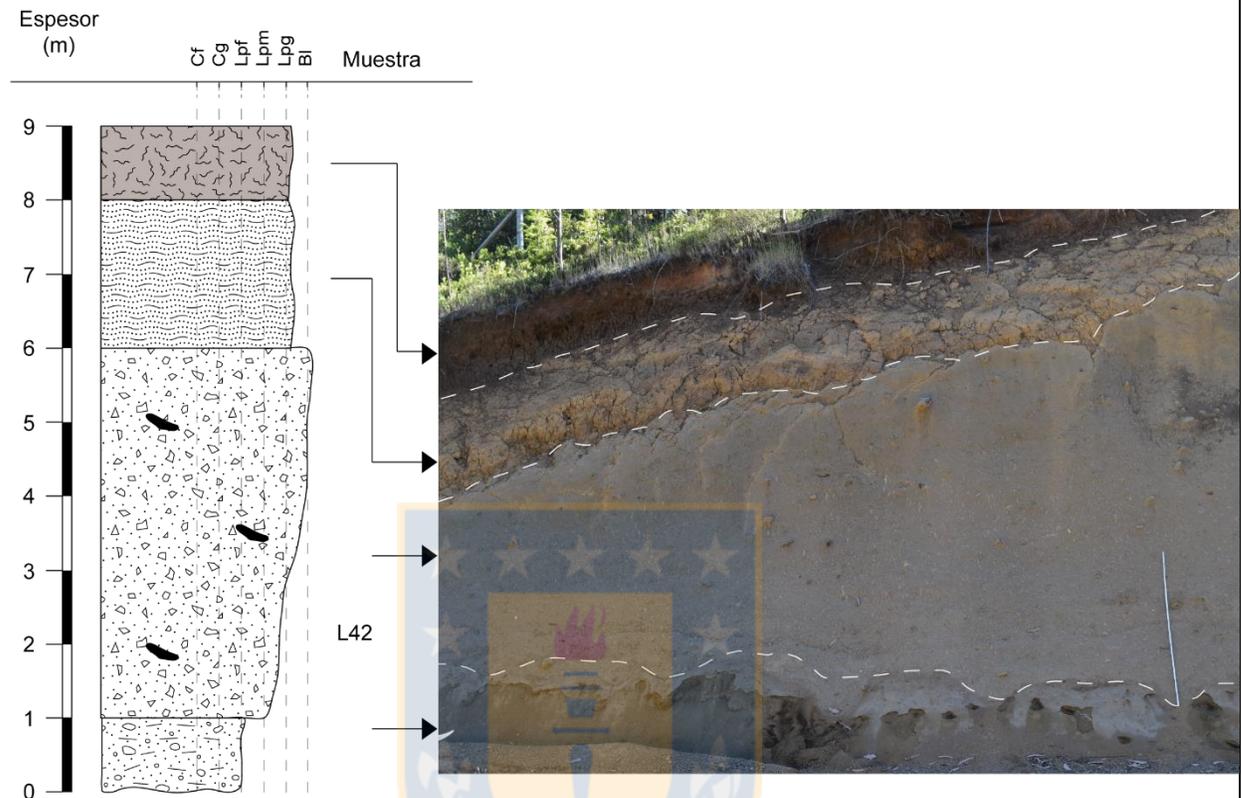
1,5 m – 2 m: Capa delgada de retrabajo que aumenta de espesor en otros sectores adyacentes.

2 m – 3 m: Cobertura de paleosuelo con abundantes raíces.

*Escala de 2 m en la fotografía.

2.12. Columna L42 (19H 0251158 E / 5700831 S)

Unidad superior: Curacautín 2. Sector W del volcán.



0 – 1 m: Capa con estratificación difusa, matriz soportada y de pobre selección. Material juvenil subangular y redondeados de ceniza fina a lapilli fino. Ausencia de bloques.

1 m – 6 m: Depósito masivo con presencia de carbón de moderada selección, matriz soportado y con ~ 1 a 2 % de bloques más frecuentes hacia techo. Partículas juveniles son negras, muy vesiculares y con inclusiones de granodiorita. Algunos juveniles están alterados. La superficie expuesta es de color café. Juveniles son redondeados a subredondeados y los accidentales son de composición intermedia, angulares a subangulares. No hay evidencia de gradación.

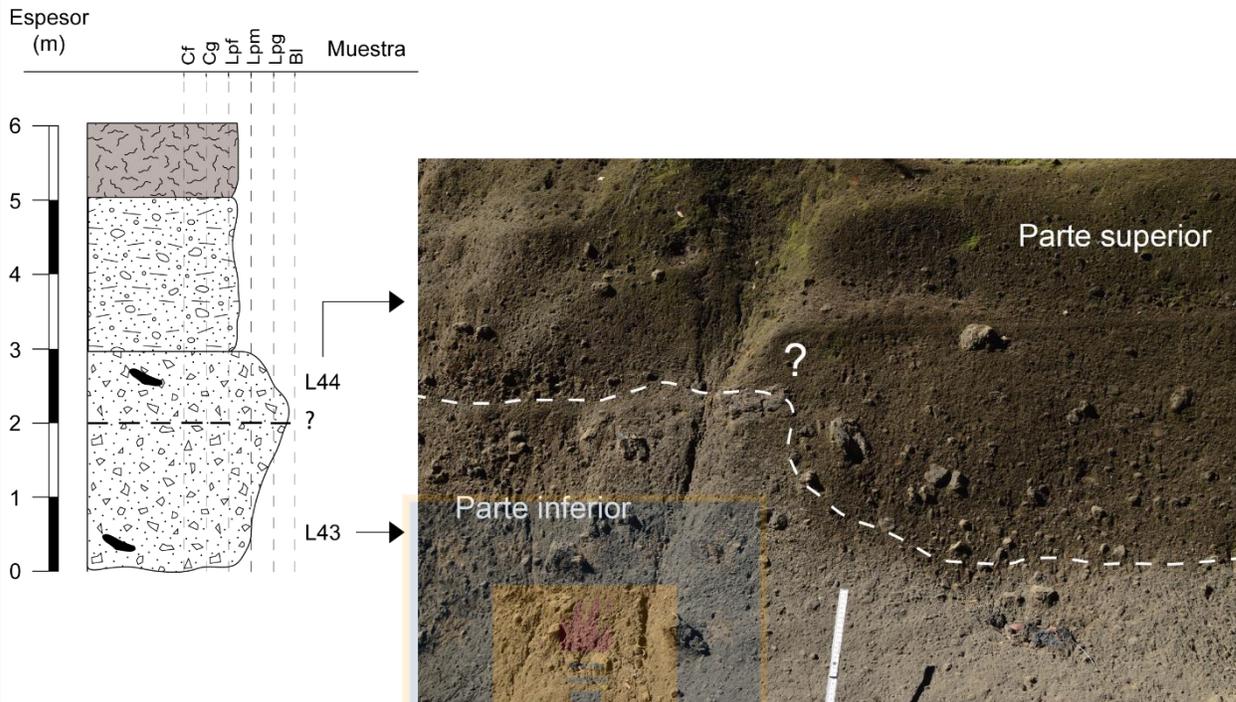
6 m – 8 m: Depósito retrabajado con matriz de barro y partículas similares al depósito que sobryace. Presenta leve estratificación difusa. Moda tamaño lapilli grueso.

8 m – 9 m: Cobertura de paleosuelo.

*Escala de 2 m en la fotografía.

2.13. Columna L43/44 (19H 0250698 E / 5701758 S)

Unidad superior: Curacautín 2. Sector W del volcán.



0 – 2 m: Depósito masivo, matriz soportado, con mala selección de ceniza gruesa y material escoriáceo muy vesicular. Clastos en su mayoría tamaño lapilli bimodal (lapilli fino y lapilli grueso). Partículas juveniles varían de angulosas a redondeadas. Líticos angulosos de andesita y basalto en la matriz. Bloques alcanzan 10 cm con inclusiones líticas de 3 mm. No hay estructuras sedimentarias ni gradación evidente.

2 m – 3 m: Depósito con una leve estratificación de forma local con zonas clastosoportadas cerca del contacto entre las subunidades. Es matriz soportado de ceniza fina a gruesa con disminución en granulometría de juveniles. Bloques disminuyen hacia techo.

3 m – 5 m: Capa con estratificación difusa, matriz soportada con ceniza fina y lapilli fino. Conserva la litología de la subunidad subyacente, pero con ausencia de bloques.

5 m – 6 m: Cobertura de paleosuelo.

*Escala de 40 cm en la fotografía.

2.14. Columna L45 (19H 0248529 E / 5707924 S)

Unidad superior: Curacautín 2. Sector W del volcán.



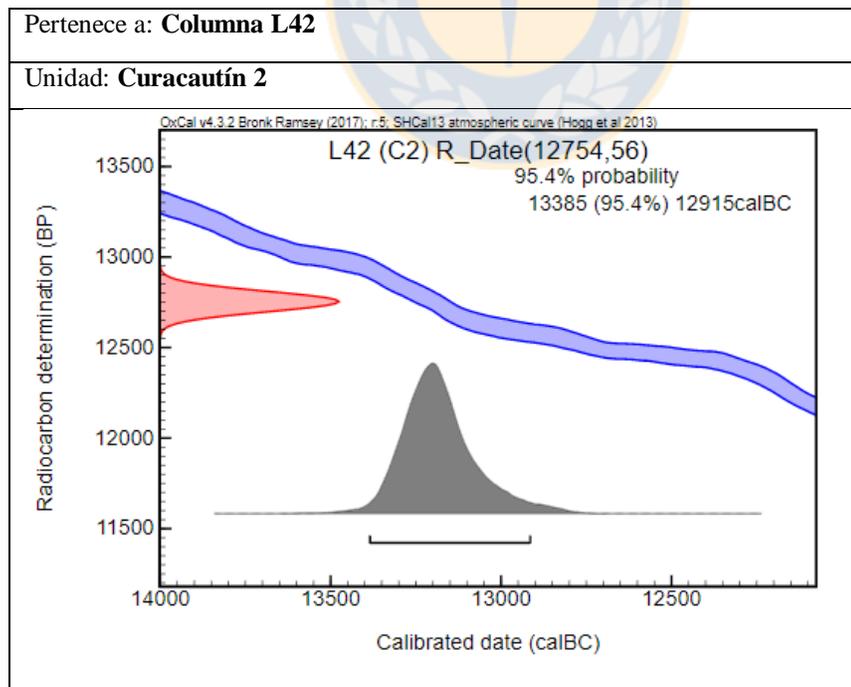
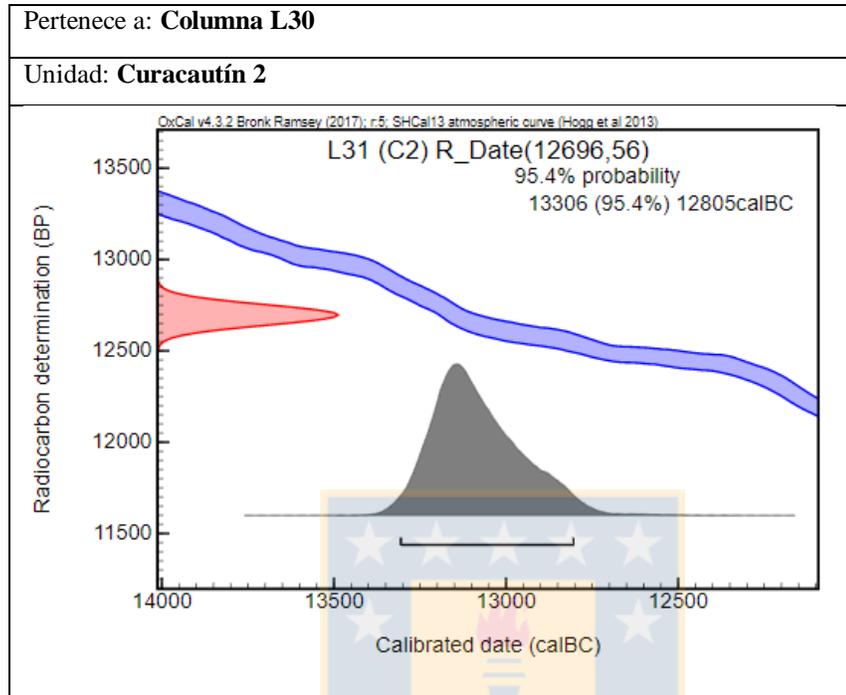
0 – 2 m: Depósito masivo, matriz soportado con ceniza fina a lapilli medio y pobremente seleccionado. Con cerca de 1 % de bloques juveniles pequeños. El material juvenil es subredondeado a vesicular. Las partículas accidentales son subangulares y de composición intermedia a félsica. Abundante lapilli. Los juveniles pueden tener inclusiones líticas.

2 m – 2,5 m: Cobertura de paleosuelo.

*Escala de 2 m en la fotografía.

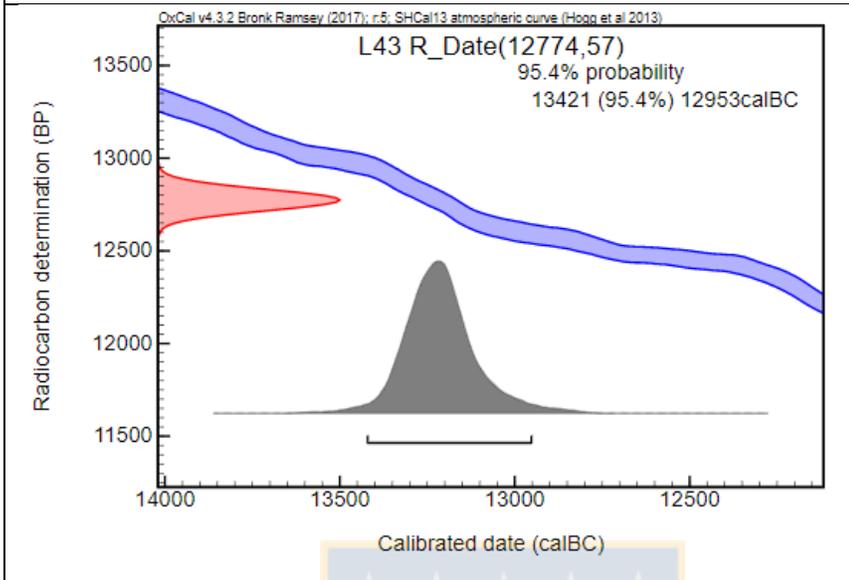
2.15. Dataciones radiocarbono calibradas

Edades calibradas se entregan con un rango de confianza de 95.4% (2σ)



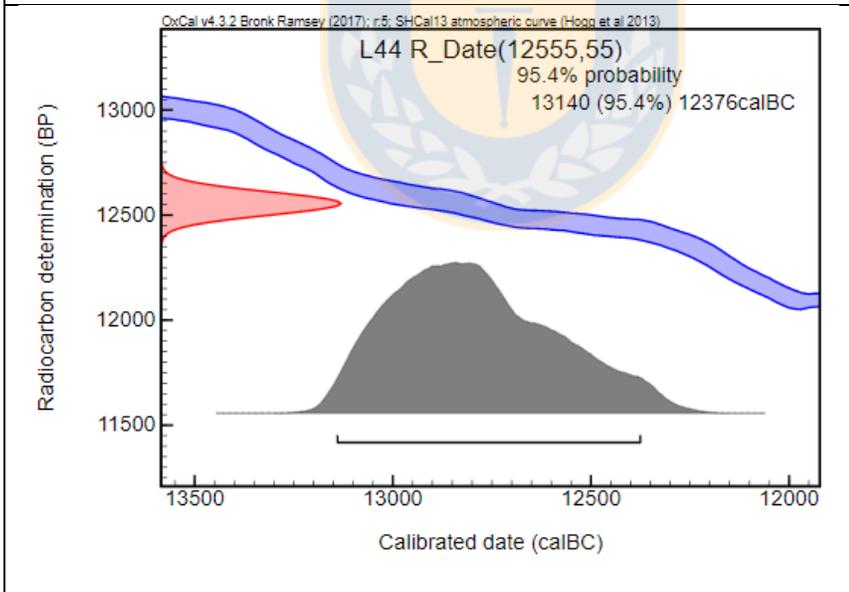
Pertenece a: **Columna L43/44**

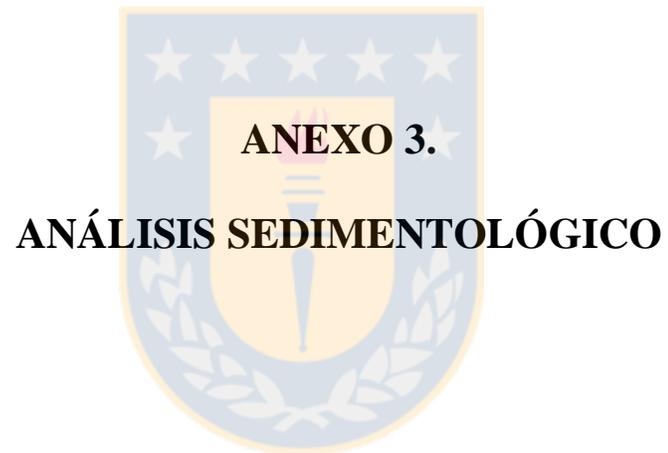
Unidad: **Curacautín 2a**



Pertenece a: **Columna L43/44**

Unidad: **Curacautín 2b**





ÍNDICE

		Página
3. 1.	Curvas de distribución del tamaño de grano en sector E	175
3. 2.	Curvas de distribución del tamaño de grano en sector W	175
3. 3.	Curvas de distribución del tamaño de grano en sector N	176
3. 4.	Gráficos de selección de facies y unidades por sector	176
3. 5.	Curvas de distribución del tamaño de grano para Curacautín 1	177
3. 6.	Curvas de distribución del tamaño de grano para Curacautín 2.....	177
3. 7.	Desviación estándar gráfica versus mediana gráfica por unidad	178
3. 8.	Diagrama ternario de la distribución del tamaño de grano por unidad	178
3. 9.	Diagramas de caja de los componentes por unidad	179
3.10.	Datos obtenidos de facies y distancia de la fuente eruptiva	179
3.11.	Histogramas de componentes	180



3.1. Curvas de distribución del tamaño de grano en sector E

% peso retenido acumulado	ϕ												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0,25	1	2	3	4	5	6
L1	1,4	2,6	8,2	19,0	29,9	43,8	57,0	67,9	76,9	83,4	91,3	100,0	100,0
L2	1,0	3,4	7,9	18,3	29,0	43,2	56,7	67,7	76,2	83,2	90,2	100,0	100,0
L3	0,9	3,1	7,0	16,3	25,4	37,0	48,3	59,6	69,5	78,4	88,1	100,0	100,0
L4	1,0	1,5	3,4	9,1	16,4	27,5	40,8	54,1	66,2	76,9	87,9	100,0	100,0
L5	1,2	3,1	8,6	21,2	32,8	47,3	60,7	71,6	79,6	86,1	93,0	100,0	100,0
L6	1,0	2,5	6,4	14,6	23,0	34,4	47,4	60,0	71,3	80,9	90,6	100,0	100,0
L7	0,0	0,0	0,0	0,7	8,9	29,5	53,2	72,4	85,4	93,1	97,2	100,0	100,0
L8	1,1	1,5	3,8	9,4	18,1	30,7	45,0	58,7	70,6	80,7	90,8	100,0	100,0
L10	0,0	0,0	2,7	17,6	24,2	35,9	50,9	66,0	77,4	86,8	93,4	100,0	100,0
L12	0,0	0,5	3,0	9,6	19,4	32,3	46,6	60,2	71,8	81,4	91,6	100,0	100,0
L13S	0,0	0,0	1,9	7,6	17,3	27,3	41,1	53,9	65,2	76,2	86,4	100,0	100,0
L14S	1,3	2,0	4,2	11,2	21,2	31,9	46,6	60,2	71,3	81,0	89,2	100,0	100,0

3.2. Curvas de distribución del tamaño de grano en sector W

% peso retenido acumulado	ϕ												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0,25	1	2	3	4	5	6
L30	0,0	1,9	6,5	16,9	29,3	42,7	58,8	71,2	80,3	87,2	92,8	100,0	100,0
L31	0,0	0,0	0,8	4,9	13,9	26,3	43,8	60,9	74,6	84,9	91,7	100,0	100,0
L40	0,0	0,3	4,3	15,0	29,2	44,9	62,0	74,9	84,0	91,4	96,0	100,0	100,0
L41	0,8	0,8	3,8	12,1	23,3	38,1	55,6	70,2	81,1	88,9	94,2	100,0	100,0
L42	0,0	0,4	6,0	20,0	30,5	41,8	56,9	70,4	80,5	88,3	93,7	100,0	100,0
L43	0,0	1,6	7,0	18,5	25,5	35,1	50,1	64,1	75,9	85,4	92,4	100,0	100,0
L44	0,6	1,7	4,4	12,4	20,7	31,7	47,8	63,1	75,5	85,3	92,4	100,0	100,0
L45	0,0	0,7	7,9	19,8	35,4	51,0	64,8	75,4	82,5	87,4	91,4	100,0	100,0

3.3. Curvas de distribución del tamaño de grano en sector N

% peso retenido acumulado	ϕ												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0,25	1	2	3	4	5	6
L34	7,1	9,8	14,4	25,1	38,8	53,5	67,3	77,9	85,5	90,9	94,5	100,0	100,0
L35	0,0	2,0	5,4	14,5	28,4	43,8	59,4	72,5	82,5	90,0	95,3	100,0	100,0
L36	1,0	2,0	4,7	11,8	22,5	37,5	53,9	68,0	78,7	87,2	93,6	100,0	100,0
L37	0,0	2,1	4,8	11,1	23,0	38,9	58,1	72,3	82,4	89,6	94,6	100,0	100,0
L38	1,0	1,3	3,0	11,3	24,1	40,3	59,4	75,4	86,3	92,8	96,6	100,0	100,0
L39	1,0	2,7	6,4	14,9	25,4	40,2	55,7	69,7	80,4	88,3	94,2	100,0	100,0

3.4. Gráficos de selección de facies y unidades por sector

Facies y unidad	Muestra	Unidad	Sector	Md ϕ	σ (sorting)	F2 (<0,06mm)	F1 (<1mm)	F2/F1
mLT (frich)-C1	L13S	C1	E	0,75	2,71477273	23,8344068	72,5918398	0,32833452
mLT (frich)-C1	L14S	C1	E	0,38333333	2,75757576	18,9777842	68,1192072	0,27859667
mLT (frich)-C1	L35	C1	N	-0,41666667	2,49962121	10,0027195	56,2114272	0,17794815
mLT (frich)-C1	L36	C1	N	-0,08333333	2,53484848	12,8333632	62,4750876	0,20541569
mLT (frich)-C1	L39	C1	N	-0,28333333	2,63787879	11,6981631	59,7799425	0,19568709
mLT (frich)-C1	L40	C1	W	-0,55	2,39166667	8,58427657	55,0515305	0,15593166
mLT-C1	L38	C1	N	-0,43333333	2,21363636	7,22906385	59,7394914	0,1210098
mLT-C2	L30	C2	N	-0,4	2,72045455	12,7955658	57,2949854	0,22332785
mLT-C2	L34	C2	N	-1,11666667	3,00075758	9,10185272	46,5249987	0,19563359
mLT-C2	L31	C2	W	0,51666667	2,28371212	15,115279	73,7318237	0,20500346
mLT-C2	L41	C2	W	-0,16666667	2,48712121	11,0857471	61,8703075	0,17917718
mLT-C2	L42	C2	W	-0,41666667	2,77083333	11,654631	58,1986002	0,20025621
mLT-C2	L43	C2	W	-0,05	2,94393939	14,6135939	64,8699312	0,22527531
mLT-C2	L44	C2	W	0,25	2,67575758	14,6518732	68,2887137	0,21455776
mLT-C2	L45	C2	W	-0,66666667	2,78333333	12,5547282	49,0288564	0,25606814
dsLT-C1	L37	C1	N	-0,28333333	2,42462121	10,385028	61,1446048	0,16984373

3.5. Curvas de distribución del tamaño de grano para Curacautín 1

% peso retenido acumulado	ϕ												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0,25	1	2	3	4	5	6
L13S	0,0	0,0	1,9	7,6	17,3	27,3	41,1	53,9	65,2	76,2	86,4	100,0	100,0
L14S	1,3	2,0	4,2	11,2	21,2	31,9	46,6	60,2	71,3	81,0	89,2	100,0	100,0
L1	1,4	2,6	8,2	19,0	29,9	43,8	57,0	67,9	76,9	83,4	91,3	100,0	100,0
L2	1,0	3,4	7,9	18,3	29,0	43,2	56,7	67,7	76,2	83,2	90,2	100,0	100,0
L3	0,9	3,1	7,0	16,3	25,4	37,0	48,3	59,6	69,5	78,4	88,1	100,0	100,0
L4	1,0	1,5	3,4	9,1	16,4	27,5	40,8	54,1	66,2	76,9	87,9	100,0	100,0
L5	1,2	3,1	8,6	21,2	32,8	47,3	60,7	71,6	79,6	86,1	93,0	100,0	100,0
L35	0,0	2,0	5,4	14,5	28,4	43,8	59,4	72,5	82,5	90,0	95,3	100,0	100,0
L36	1,0	2,0	4,7	11,8	22,5	37,5	53,9	68,0	78,7	87,2	93,6	100,0	100,0
L37	0,0	2,1	4,8	11,1	23,0	38,9	58,1	72,3	82,4	89,6	94,6	100,0	100,0
L38	1,0	1,3	3,0	11,3	24,1	40,3	59,4	75,4	86,3	92,8	96,6	100,0	100,0
L39	1,0	2,7	6,4	14,9	25,4	40,2	55,7	69,7	80,4	88,3	94,2	100,0	100,0
L40	0,0	0,3	4,3	15,0	29,2	44,9	62,0	74,9	84,0	91,4	96,0	100,0	100,0

3.6. Curvas de distribución del tamaño de grano para Curacautín 2

% peso retenido acumulado	ϕ												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0,25	1	2	3	4	5	6
L6	1,0	2,5	6,4	14,6	23,0	34,4	47,4	60,0	71,3	80,9	90,6	100,0	100,0
L7	0,0	0,0	0,0	0,7	8,9	29,5	53,2	72,4	85,4	93,1	97,2	100,0	100,0
L8	1,1	1,5	3,8	9,4	18,1	30,7	45,0	58,7	70,6	80,7	90,8	100,0	100,0
L10	0,0	0,0	2,7	17,6	24,2	35,9	50,9	66,0	77,4	86,8	93,4	100,0	100,0
L31	0,0	0,0	0,8	4,9	13,9	26,3	43,8	60,9	74,6	84,9	91,7	100,0	100,0
L34	7,1	9,8	14,4	25,1	38,8	53,5	67,3	77,9	85,5	90,9	94,5	100,0	100,0
L41	0,8	0,8	3,8	12,1	23,3	38,1	55,6	70,2	81,1	88,9	94,2	100,0	100,0
L42	0,0	0,4	6,0	20,0	30,5	41,8	56,9	70,4	80,5	88,3	93,7	100,0	100,0
L43	0,0	1,6	7,0	18,5	25,5	35,1	50,1	64,1	75,9	85,4	92,4	100,0	100,0
L44	0,6	1,7	4,4	12,4	20,7	31,7	47,8	63,1	75,5	85,3	92,4	100,0	100,0
L45	0,0	0,7	7,9	19,8	35,4	51,0	64,8	75,4	82,5	87,4	91,4	100,0	100,0

3.7. Desviación estándar gráfica versus mediana gráfica por unidad

Curacautín 1		
Muestra	Desviación estándar	Mediana
L13S	2,7148	0,7500
L14S	2,7576	0,3833
L35	2,4996	-0,4166
L36	2,5348	-0,0833
L37	2,4246	-0,2833
L38	2,2136	-0,4333
L39	2,6378	-0,2833
L40	2,3916	-0,5500

Curacautín 2		
Muestra	Desviación estándar	Mediana
L30	2,7204	-0,4000
L31	2,2837	0,5166
L34	18,489	30,606
L41	2,4871	-0,1666
L42	2,7708	-0,4166
L43	2,9439	-0,0500
L44	2,6757	0,2500
L45	2,7833	-0,6666

3.8. Diagrama ternario de la distribución del tamaño de grano por unidad

Curacautín 1			
Muestra	<0,006 mm	>1 mm	0,006 mm – 1 mm
L13S	0,230	0,171	0,599
L14S	0,210	0,193	0,597
L35	13,949	25,122	60,928
L36	16,123	21,462	62,415
L37	16,081	22,118	61,800
L38	12,702	22,079	65,218
L39	15,417	22,930	61,653
L40	9,206	43,163	47,631

Curacautín 2			
Muestra	<0,006 mm	>1 mm	0,006 mm – 1 mm
L30	18,939	24,815	56,245
L31	18,334	15,359	66,307
L34	18,489	30,606	50,904
L41	16,043	21,888	62,068
L42	16,583	24,155	59,262
L43	16,799	20,584	62,616
L44	16,860	18,679	64,461
L45	24,703	29,642	45,656

3.9. Diagramas de caja de los componentes por unidad

Curacautín 1			
Muestra	Accidentales	Juveniles	Cristales
L13S	40,2089	57,1802	2,6109
L14S	27,7055	67,2260	5,0685
L35	36,8066	57,5673	5,6260
L36	35,5259	60,1758	4,2983
L37	35,4817	59,7501	4,7682
L38	44,7082	51,9165	3,3753
L39	30,6079	64,8847	4,5073
L40	20,6601	74,4554	4,8845

Curacautín 2			
Muestra	Accidentales	Juveniles	Cristales
L30	44,9515	51,6318	3,4166
L31	50,9489	43,2117	5,8394
L34	51,4628	45,2393	3,2979
L41	38,0655	57,3607	4,5739
L42	58,1771	33,1250	8,6979
L43	25,4292	69,7750	4,7957
L44	31,4362	64,5411	4,0226
L45	39,8934	56,2771	3,8295

3.10. Datos obtenidos de facies y distancia de la fuente eruptiva.

Facies y unidad	Muestra	Unidad	Sector	Distancia (km)
mLT (frich)-C1	L13S	C1	E	12,2
mLT (frich)-C1	L14S	C1	E	12,2
mLT (frich)-C1	L35	C1	N	13,74
mLT (frich)-C1	L36	C1	N	13,74
mLT (frich)-C1	L39	C1	N	15,14
mLT (frich)-C1	L40	C1	W	11,88
mLT-C1	L38	C1	N	14,38
mLT-C2	L30	C2	N	16,53
mLT-C2	L34	C2	N	14,55
mLT-C2	L31	C2	W	19,1
mLT-C2	L41	C2	W	17,36
mLT-C2	L42	C2	W	16,93
mLT-C2	L43	C2	W	16,57
mLT-C2	L44	C2	W	16,57
mLT-C2	L45	C2	W	15,01
dsLT-C1	L37	C1	N	13,74

3.11. Histogramas de componentes

