



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ERUPTIVOS DE FLUJOS DE LAVA DEL COMPLEJO VOLCÁNICO LONQUIMAY (38°S), ANDES DEL SUR.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

RAYEN ALINA GHO INZUNZA

PROFESOR GUÍA

ÁNGELO CASTRUCIO ÁLVAREZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

EDMUNDO POLANCO VALENZUELA

ÁLVARO MAURICIO AMIGO RAMOS

SANTIAGO DE CHILE

DICIEMBRE, 2013

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Geóloga
POR: Rayen Alina Gho Inzunza
FECHA: Octubre 2013
PROFESOR GUÍA: Ángelo Castruccio Álvarez

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ERUPTIVOS DE FLUJOS DE LAVA DEL COMPLEJO VOLCÁNICO LONQUIMAY (38°S), ANDES DEL SUR.

El Complejo Volcánico Lonquimay (CVL) se encuentra en la Zona Volcánica Sur (38°). Ha estado activo principalmente durante el Holoceno, y ha generado productos esencialmente andesíticos. El CVL está compuesto por un estratovolcán principal, de un volumen cercano a los 20 km³, que se encuentra dividido en cinco unidades, donde las lavas más antiguas presentan longitudes de hasta 15 km, con morfologías de tipo aa, mientras que las coladas más jóvenes, tienen longitudes de hasta solo 3 km, y morfologías de tipo bloques. El Cordón Fisural Oriental (CFO, 10 km de largo), corresponde un sistema de fisuras ubicado en sector este del CVL, compuesto por numerosos conos piroclásticos en orientación NE. Las coladas del CFO presentan longitudes de hasta 10 km de largo, con morfologías de tipo bloques. En esta zona es donde han ocurrido las erupciones históricas del complejo. La petrografía de todas las unidades del CVL, se mantiene muy uniforme en el tiempo.

Los parámetros eruptivos que controlaron la formación de estas coladas de lava no históricas fueron determinados gracias a un estudio detallado de sus morfologías, dimensiones y petrografía, obteniendo variaciones de estos valores en el tiempo a partir de mediciones y muestreos a diferentes distancias de la fuente de emisión. Esto se realizó con análisis dimensional de las coladas de lava, basado en un flujo de tipo Herschel-Bulkley,

Los resultados obtenidos indican que las coladas de lava más antiguas del cono principal presentaron altas tasas eruptivas (hasta 433 m³ s⁻¹), lo que junto al alto volumen emitido (~0,1 km³), permitieron la formación de largas coladas; estos valores habrían ido disminuyendo, a medida que se formó el estratovolcán, hasta el punto en que las últimas coladas solo alcanzan un par de kilómetros de largo, con tasas eruptivas del orden de 2 m³ s⁻¹, y volúmenes de solo 0,01 km³. De acuerdo a las variaciones observadas, las dimensiones de las coladas estarían estrictamente ligadas a la tasa eruptiva y a los volúmenes emitidos. Estos parámetros estarían, a su vez, determinados por la presión que ejerce la masa de material acumulado sobre la cámara magmática, debido a la formación del estratovolcán: cuando mayor es el volumen del volcán, menores serán las tasas eruptivas y volúmenes generados. Por lo que luego de la superposición de las últimas unidades en el estratovolcán, los magmas habrían perdido la capacidad de ascender por el conducto principal, por lo que la actividad volcánica reciente se estaría llevando a cabo en el CFO, por las facilidades que presenta el sistema de fallas.

A mi familia maravillosa

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a los que hicieron que este trabajo saliera a flote: a mi profesor guía Ángelo Castruccio, gracias a sus enseñanzas, paciencia, compromiso y dedicación, fue posible terminar esta larga tarea. También agradezco a Álvaro Amigo y Edmundo Polanco por sus comentarios siempre bien acertados, por el apoyo y la buena onda. A los que nos ayudaron a sacar los cortes transparentes: Julio Jr., Poldie (de Sax), y Pancho Fuentes, y a los que nos enseñaron a usar el SEM, Coni Nicolau y Cristian Nievas. A los profes Parada, Charrier y Hervé, por su apoyo. Gracias por todo!

A mis compañeritos volcanólogos. Todos los terrenos, los buenos momentos, conversaciones, caminatas. Marihui, gran compañera de memoria! Tanto que sufrimos oh... fórmulas, microscopios, congresos jajaja lo logramos al final, sobrevivimos!. A Oscarito, otro grande de los volcanes, gracias por la buena onda, paciencia y el cariño. A Monsita Pura vida! Vuelve luegoooo, te extraño.

Gracias al Proyecto FONDECYT N° 11121298, que financió este trabajo y la asistencia a los congresos IAVCEI y GeoSur; al CEGA, que financió la estadía en cada uno de ellos.

Se termina el pregrado! Durante todo este tiempo, largos 8 años, he estado acompañada por personas gigantes y únicas, a las que les debo infinito, en todos los sentidos de la vida.

Empezaré por las de siempre: Pioji, Delpi, Doli, BBto y Pía, la eterna compañía, por todas esas noches de cantos, alegrías y risas infinitas, en plena luz. Y a las otras de siempre, que aunque no nos juntamos nunca, en todos los momentos están ahí! Paul, Klau y Piñita. Las amo.

Después, a los compañeros de los años de terror!! Plan común: Carlitos, Gómez, Karli, Natio, Félix, Pipe. Todos los viernes felices de gorbea, y todos los miles de taca que nos jugamos! Nada que decir, solo que fue hermoso.

Finalmente geología. Otros años de puro y sano estudio junto a mis compañeritos favoritos: Feña, Danimuno, Buki Buki, Perreo, Vicho L., María Vicki, Vicho G., Nico G., Nico A., Turco, Frani, y a los que conocí más cuando ya casi éramos geólogos: Valeri, Momo, Quiroga, Ore, Estrellita, Chinito, Claudito, Juanito, al Gordo, Chichito, Vladito... puras estrellas!, y a todos los cabros de geología-pdl, los mejores terrenos de la vida!. A Blanquis y Berni, que tanto que nos han ayudado desde que llegaron! Tanta paciencia y conversaciones eternas en la oficina, por los escapes de la monotonía. Al Quilo, grande Quilo! Gracias a todos!

Quisiera también agradecer a la gente maravillosa que conocí durante mi práctica en el Geoparque Kütralkura, aprendí tanto de ellos y me llené de pura buena energía: a la Tía Susana, el Tío Juanka, y Hendri de Melipeuco, a Jose y Suyai de Curacautín, y a los del proyecto Manuel, Dani, Marli, Pato y Karin. Una de las mejores experiencias que he tenido.

Finalmente a los más importantes, a los que están conmigo desde que nací, mi familia: Gordito, Normita, Jandri, Carola, los mejores que me podían tocar. Awela María y Awelo Wilo, Awela Eulogia y Awelo Santiago, que crearon las bases de lo que somos. Tía Velvet, Lotty, Ceci, Vivi, Biachi, a los cabros chicos del Pasqui y el Gaspi. Al Maxi, Chico, Toco, Pisti, Pichi, Domi, Dharma, Violeta, Gordo, Moshe, Chica, Blaqui, Nueva. Mención honrosa a Leoncio. Los amo a todos! Sin ustedes, no lo habría logrado.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 FORMULACIÓN DEL ESTUDIO PROPUESTO	1
1.2 UBICACIÓN Y ACCESOS	2
1.3 HIPÓTESIS	4
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 OBJETIVOS GENERALES	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5 METODOLOGÍA	4
CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO	6
2.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	6
2.1.1 ROCAS ESTRATIFICADAS DEL BASAMENTO	6
2.1.2 ROCAS INTRUSIVAS	7
2.1.3 DEPÓSITOS CUATERNARIOS	8
2.2 MARCO GEOLÓGICO DEL VOLCÁN LONQUIMAY	9
2.2.1 COMPLEJO VOLCÁNICO LONQUIMAY	9
2.2.2 VOLCÁN TOLGUACA	12
2.2.3 CONOS MONOGÉNICOS PERIFÉRICOS	13
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	15
3.1 ESTUDIOS ANTERIORES	15
3.2 MODELACIÓN DE LOS FLUJOS DE LAVA	18
3.2.1 REOLOGÍA DE LOS FLUJOS DE LAVA	18
3.2.2 DINÁMICA DE LOS FLUJOS DE LAVA	20
CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CVL	24
4.1 CRITERIOS DESCRIPTIVOS	24
4.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS	24
4.1.2 CRITERIOS TEXTURALES	27
4.2 DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA DE LAS COLADAS	30
4.2.1 COLADA LONQUIMAY 5-1 (LQ5-1)	31
4.2.2 COLADA LONQUIMAY 5-2	38
4.2.3 COLADA LONQUIMAY 4 (LQ4)	40
4.2.4 COLADA LONQUIMAY 3 (LQ3)	43
4.2.5 COLADA CORDÓN FISURAL ORIENTAL 1 (CFO1)	46
4.2.6 COLADA CORDÓN FISURAL ORIENTAL 2 (CFO2)	49

CAPÍTULO V: OBTENCIÓN DE DATOS Y CÁLCULO DE PARÁMETROS	54
5.1 DIMENSIONES DE LAS COLADAS.....	54
5.1.1 LARGO Y ANCHO DE COLADAS	54
5.1.2 ESPESOR DE COLADAS	55
5.1.3 VOLUMEN DE COLADAS.....	57
5.1.4 PENDIENTE	58
5.2 PARÁMETROS PARA REOLOGÍA DE HERSCHEL-BULKLEY.....	58
5.2.1 DATOS PARA CÁLCULO DE LOS PARAMETROS	59
5.2.2 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS PARA LA REOLOGÍA DE HERSCHEL-BULKLEY.....	68
5.3 CÁLCULO DE PARÁMETROS ERUPTIVOS	70
5.3.1 COLADA LQ5-1.....	73
5.3.2 COLADA LQ5-2.....	75
5.3.3 COLADA LQ4	76
5.3.4 COLADA CFO1	77
5.3.5 COLADA CFO2	78
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN	80
6.1 COMPARACIÓN DE MÉTODOS	80
6.2 REGÍMENES DINÁMICOS DE LAS COLADAS	82
6.3 ANÁLISIS DE VARIACIONES EN LOS CENTROS ERUPTIVOS.....	86
6.3.1 VOLCÁN LONQUIMAY	89
6.3.2 CORDÓN FISURAL ORIENTAL.....	95
6.3.3 EVOLUCIÓN DEL COMPLEJO VOLCÁNICO LONQUIMAY.....	97
6.4 REPRESENTATIVIDAD DE LAS COLADAS ESTUDIADAS	101
6.5 COROLARIO	102
6.6 COMENTARIOS FINALES.....	103
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES	104
REFERENCIAS	107
ANEXOS	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación Volcán Lonquimay y vías de acceso.	3
Figura 2: Mapa Geológico de la zona de estudio.	14
Figura 3: Curvas esquemáticas de los modelos reológicos	19
Figura 4: Dibujo ilustrativo de los 3 casos presentados	22
Figura 5: Esquemas de coladas	25
Figura 6: Esquema representativo de los tipos de levées que se encuentran en las coladas estudiadas	26
Figura 7: Imágenes representativas de diferentes tipos de cortezas	29
Figura 8: Ubicación de los flujos de lava estudiados	30
Figura 9: Ubicación de la Colada LQ5-1	32
Figura 10: Imágenes de la Colada LQ5-1	33
Figura 11: Imágenes de la Colada LQ5-1a	34
Figura 12: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra LON5-08)	35
Figura 13: Imágenes de la Colada LQ5-1b	36
Figura 14: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra LON5-01)	37
Figura 15: Ubicación de Colada LQ5-2	38
Figura 16: Imágenes de la Colada LQ5-2	39
Figura 17: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra LON5c-04)	40
Figura 18: Ubicación de la Colada LQ4	41
Figura 19: Imágenes de la Colada LQ4	42
Figura 20: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra LON4-07a)	43
Figura 21: Ubicación de la Colada LQ3	44
Figura 22: Detalles Colada LQ3	45
Figura 23: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra LON2-01)	46
Figura 24: Ubicación de la Colada CFO1	47
Figura 25: Imágenes de la Colada CFO1	48
Figura 26: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra CFO1-03a)	49
Figura 27: Ubicación de la Colada CFO2	50
Figura 28: Imágenes de la Colada CFO2	51
Figura 29: Detalles Colada CFO2	52
Figura 30: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra CFO2-01A).	53
Figura 31: Anchos de colada vs Distancia a la fuente	55
Figura 32: Cálculo de altura de levée	56
Figura 33: Espesores vs Distancia a la fuente.	56
Figura 34: Pendiente vs Distancia a la fuente.	58
Figura 35: Imagen explicativa del trabajo en microscopio electrónico	59
Figura 36: Cuadro Comparativo de las composiciones del vidrio volcánico	60
Figura 37: Temperaturas versus distancia a la fuente	61
Figura 38: Imagen explicativa del trabajo de conteo modal	64
Figura 39: Comparación de los resultados del conteo modal para todas las coladas	65
Figura 40: Resultados del conteo modal para cada colada	65
Figura 41: Viscosidad del líquido o vidrio volcánico de las coladas en estudio	67
Figura 42: Consistencia de las coladas en estudio	69
Figura 43: Distancia vs Tiempo para todas las coladas en estudio.	73
Figura 44: Tasa Eruptiva para la Colada LQ5-1a	73
Figura 45: Velocidad para la Colada LQ5-1a	74

Figura 46: Tasa eruptiva para la Colada LQ5-1b.	75
Figura 47: Velocidad para la Colada LQ5-1b	75
Figura 48: Tasa eruptiva para la Colada LQ5-2	76
Figura 49: Velocidad para la Colada LQ5-2	76
Figura 50: Tasa eruptiva para la Colada LQ4	77
Figura 51: Velocidad para la Colada LQ4	77
Figura 52: Tasa eruptiva para la Colada CFO1	78
Figura 53: Velocidad para la Colada CFO1	78
Figura 54: Tasa eruptiva para la Colada CFO2	78
Figura 55: Velocidad para la Colada CFO2	79
Figura 56: Gráfico comparativo del modelo utilizado en este estudio, y el Modelo de Graetz	81
Figura 57: Gráfico explicativo del comportamiento del largo de colada con los cambios en la tasa eruptiva	86
Figura 58: Gráfico del contenido de SiO ₂ vs Edad relativa, y TAS (álcalis total vs sílice).	89
Figura 59: Gráficos de las variaciones, con respecto a la edad relativa	99
Figura 60: Gráficos de las variaciones, con respecto a la pendiente	100
Figura 61: Gráficos de las variaciones, con respecto a la longitud	100
Figura 62: Gráfico Velocidad Máxima vs Yield Strength	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Volúmenes	57
Tabla 2: Temperatura promedio de las coladas, de acuerdo a Putirka (2008).	61
Tabla 3: Composiciones de roca total para las coladas en estudio y colada del Volcán Navidad	62
Tabla 4: Valores para Φm , de acuerdo a Mueller (2009)	66
Tabla 5: Yield Strength	70
Tabla 6: Tasas eruptivas calculadas con el Método de Graetz comparadas con las obtenidas en este trabajo	82
Tabla 7: Propiedades físicas y dimensiones de las lavas con sus rangos de valor esperados para distintas composiciones (Modificado de Pinkerton y Wilson (1994)).	82
Tabla 8: Resultados para el valor de la fuerza ejercida por la reología interna de la colada.	84
Tabla 9: Tabla resumen de las propiedades y parámetros eruptivos para todas las coladas en estudio	88

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL ESTUDIO PROPUESTO

Los flujos de lava son los productos volcánicos más comunes sobre la Tierra. Estos flujos presentan rasgos característicos de las condiciones en las que fueron emitidos, por lo que las morfologías, dimensiones, y texturas de sus productos serán originadas por las características intrínsecas del material en el momento de la erupción.

Los flujos de lava, si bien no se caracterizan por su rapidez, generan daños a la infraestructura, por lo que es importante comprender su dinámica para poder anticipar posibles desastres. Por lo cual, el estudio de la dinámica de flujos de lava es muy importante para poder hacer una relación entre el comportamiento de estos flujos y los peligros que generan.

Para la modelación de los flujos de lava, es trascendental comprender los factores de los cuales depende su movimiento. Se han realizado variados estudios para analizar su comportamiento (Walker (1973), Hulme (1974), Malin (1980), etc), y se ha logrado determinar que los flujos de lava son controlados principalmente por la tasa eruptiva, la topografía y su reología. La reología está definida, a su vez, por el contenido de cristales y volátiles presentes, la composición de la fase fluida y su temperatura.

Para este estudio, se trabajará en la Zona Volcánica Sur (ZVS), que se encuentra entre los 39° y 41,5° S, específicamente en el Complejo Volcánico Lonquimay, y donde coexisten dos estilos de volcanismo característicos: el poligenético, que da origen a estratovolcanes, y el monogenético, que configura campos volcánicos con numerosos centros eruptivos. Los centros poligenéticos, se caracterizan por emitir lavas de composición basáltica a riolítica y forman cadenas volcánicas NE y NW (López-Escobar, 1995; Cembrano & Lara, 2009). Por otro lado, los volcanes monogenéticos conforman cadenas transversales de rumbo NE, o forman alineamientos NS sobre la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO) (López-Escobar, 1995; Cembrano & Lara, 2009).

Específicamente, se estudiará el Complejo Volcánico Lonquimay (CVL, 38°22'S y 71°35'W), de edad pleistocena-holocena, que se encuentra ubicado en el arco volcánico de los Andes, ZVS, y genera esencialmente, productos de composición andesítica. El CVL se compone de un cono principal y conos adventicios. El Volcán Lonquimay (VL) corresponde a un estratovolcán de laderas pronunciadas (30-40°), alcanza una altura de 2.865 msnm y su cráter tiene un diámetro de 700 m, se encuentra ligeramente elongado en la dirección WSW-ENE. Los conos adventicios se encuentran ordenados a lo largo de una fisura noreste-suroeste llamada Cordón Fisural Oriental (CFO) (Moreno y Gardeweg, 1989). El CFO comprende 8 km de largo, y consta de decenas de conos de piroclastos en orientación NE.

El trabajo en esta zona comprenderá el estudio de coladas de lava no históricas, que presentan sus características morfológicas bien preservadas. Estas coladas pertenecen a distintas unidades del CVL, tanto del cono principal, como del CFO. De estas coladas, se tomarán datos morfológicos, y muestras de roca, para luego ser caracterizadas petrográficamente. Con estos datos, y utilizando un análisis dimensional, se estimarán los parámetros eruptivos que caracterizaron al evento volcánico en el que se generó cada colada: tanto el régimen dinámico de los flujos de lava, como la tasa eruptiva y la velocidad alcanzada por éstas. Con los resultados obtenidos, se podrá calcular la distancia que alcanzará una colada de lava, así como también, el tiempo que demorará en lograrlo.

La zona de este estudio comprende una serie de centros eruptivos que se encuentran cercanos a varios poblados, por lo que caracterizar los productos, para generar un modelo evolutivo, podría ayudar en el caso que se realizara un mapa de peligros en la zona.

1.2 UBICACIÓN Y ACCESOS

La zona de estudio se encuentra en la IX Región de la Araucanía, Chile, en la Provincia de Malleco, entre la Comuna de Curacautín y la de Lonquimay, a 100 km de Temuco, capital regional, y a 10 km de Malalcahuello, el pueblo más cercano (ambas

medidas tomadas en línea recta), tal como se aprecia en la Figura 1. El Complejo Volcánico Lonquimay se encuentra en el territorio de la Reserva Nacional Nalcas-Malcalhuello, a cargo de la Corporación Nacional Forestal (CONAF).

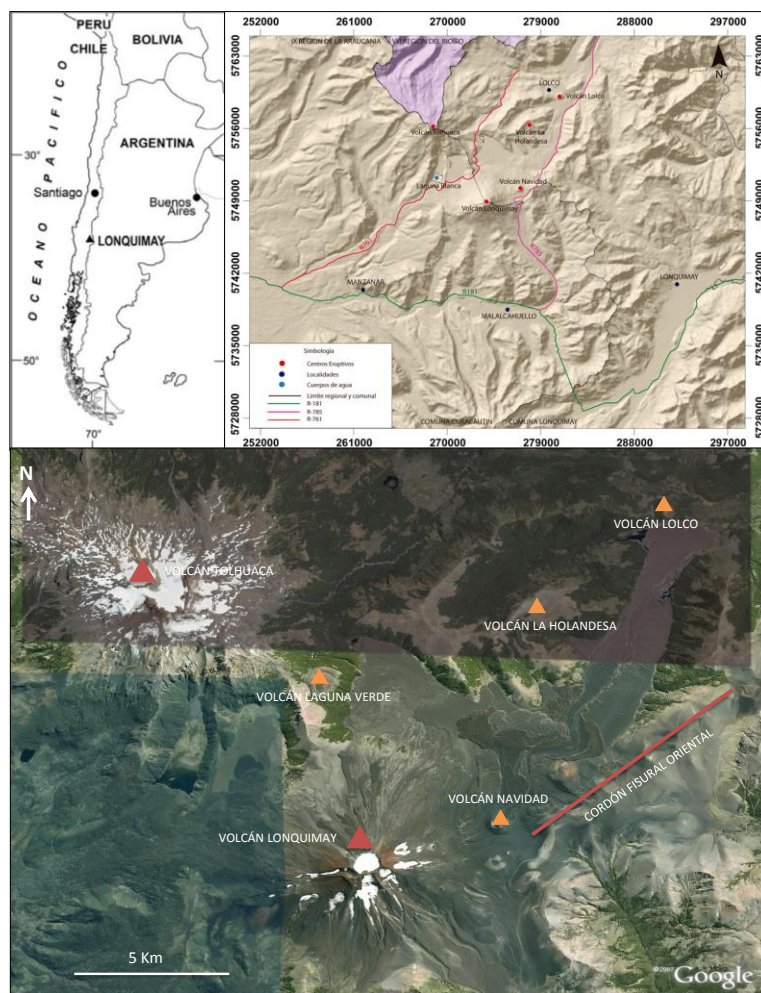


Figura 1: Ubicación Volcán Lonquimay y vías de acceso.
Las coordenadas refieren al sistema WGS84, UTM 19 Sur.

El acceso a esta zona es, en su mayoría, a través de caminos pavimentados: Ruta 5-Sur desde Santiago a Victoria, para luego seguir por la Ruta 181 hacia el este, hasta Curacautín. Luego, para acceder al sector este del volcán, se continúa por caminos de ripio y tierra (R785), esta ruta atraviesa el Cordón Fisural Oriental, hasta la Hacienda Lolco; para acceder al sector norte y oeste del volcán, dirección Laguna Blanca, se debe tomar la ruta R-761.

1.3 HIPÓTESIS

El régimen dinámico de un flujo de lava, así como la tasa eruptiva y la velocidad alcanzada por ésta, puede ser modelado a partir de las características morfológicas y petrográficas de los productos emitidos durante la erupción. Así, con trabajo de terreno y petrográfico se puede realizar una estimación de estos valores para los productos del VL y del CFO, y junto con esto, realizar un estudio evolutivo de estos parámetros para un mismo centro eruptivo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVOS GENERALES

Estimar la evolución en el tiempo de los parámetros de las erupciones que generaron flujos de lava del Volcán Lonquimay y Cordón Fisural Oriental.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Determinar el régimen dinámico que controló el avance de los flujos de lava de las erupciones antes mencionadas.
- ii. Estimar la tasa eruptiva y velocidad de las coladas estudiadas.
- iii. Ver variaciones en el tiempo para las diferentes coladas de lava de cada centro eruptivo.
- iv. Comparar los resultados encontrados para el Volcán Lonquimay y para el CFO, y discutir causas de lo señalado.

1.5 METODOLOGÍA

- i. Trabajo pre-terreno, consistente en la elección de las coladas de lava a estudiar, junto con la obtención de datos dimensionales de ellas, con imágenes satelitales.

- ii. Trabajo en terreno: se realizaron tres campañas de terreno (25-30 de diciembre de 2012; 9-13 de enero de 2013; 11-20 de abril de 2013) en las cuales se obtuvieron características texturales y morfológicas de las coladas de lava, espesor de ellas y pendiente del sector; junto con la obtención de muestras de roca, con un total de 62.
- iii. Con los datos anteriores, y junto con estimaciones de imágenes satelitales (para largo de las coladas), se obtendrá el volumen total para cada depósito.
- iv. Con el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), se determinará la composición química del vidrio de las muestras, y junto con la caracterización petrográfica de éstas, se podrá estimar la viscosidad de la fase fluida, de acuerdo al modelo de Giordano *et al.* (2008). Para esto, se analizó un total de 23 cortes transparentes.
- v. Con el software *JMicroVision*, se realizará un conteo modal de cristales, otro dato con el que será posible estimar la consistencia del flujo, y el parámetro n , que generó las coladas, de acuerdo la ecuación presentada en Castruccio *et al.* (2013).
- vi. Con los valores para la consistencia, *yield strength* y el parámetro n (Castruccio *et al.*, 2013), junto con los datos de las morfologías de las coladas, se podrá definir la reología de cada colada, utilizando relaciones obtenidas de análisis dimensional de las fuerzas involucradas, de acuerdo a Castruccio (2012) y Castruccio *et al.* (2013)
- vii. Con estos datos, se calculará la velocidad y tasa eruptiva de las mismas.
- viii. Con los resultados obtenidos, se realizarán comparaciones entre ambos casos (VL y CFO).
- ix. Finalmente, se hará un estudio de la evolución que han tenido estos parámetros dentro del Complejo Volcánico Lonquimay.

CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO

2.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

En los alrededores del Complejo Volcánico Lonquimay-Tolguaca (CVLT), afloran rocas sedimentarias, intrusivas y volcánicas, cuyas edades comprenden desde el Cretácico al Holoceno, las cuales conforman el basamento de los edificios volcánicos actuales que se encuentran en el sector.

2.1.1 ROCAS ESTRATIFICADAS DEL BASAMENTO

COMPLEJO VIZCACHA-CUMILAO (Cretácico-Paleógeno)

Unidad Informal descrita en Suarez y Emparan (1997). Secuencias principalmente volcánica, con presencia de lavas andesíticas macizas, que alcanzan espesores de hasta 350 m; subordinadamente, lavas basálticas, y rocas piroclásticas, que incluyen a tobas de lapilli y brechas volcánicas andesíticas. Además, se presentan intercalaciones sedimentarias clásticas, compuestas por lutitas negras, areniscas de grano fino, medio y grueso, y brechas sinsedimentarias.

La base de la secuencia no se encuentra expuesta. Por otro lado, se encuentra sobreyacida, en partes, por las formaciones Curamallín y Malleco. Se le asocia una edad Cretácico-Paleógeno, de acuerdo a relaciones estratigráficas y dataciones (Suarez y Emparán, 1997).

FORMACIÓN CURAMALLÍN (Mioceno Inferior-Medio)

Corresponde a rocas volcánicas andesíticas, dacíticas y riolíticas, y rocas sedimentarias, principalmente lacustres y subordinadamente fluviales (Suarez y Emparán, 1997). En la zona de estudio se reconocen el Miembro Guatripío, principalmente volcánico, y el Miembro Pedregoso, principalmente sedimentario, los cuales son equivalentes a los miembros Río Queuco y Malla-Malla respectivamente, de Niemeyer y Muñoz (1983), que conforman la Formación Curamallín en su localidad tipo.

Además, el Miembro Guatripío probablemente sea equivalente a parte de la Formación Trapa-Trapa (Niemeyer y Muñoz, 1983), y parte de la asociación deltaica volcanogénica del Miembro Río Pedregoso, también, podría ser equivalente con la Formación Trapa-Trapa.

FORMACIÓN MALLECO (Plioceno-Pleistoceno Inferior)

Unidad definida en Suarez y Emparán (1997), que comprende principalmente, rocas volcánicas con intercalaciones sedimentarias continentales ocasionales. La formación se encuentra dividida en cuatro unidades informales, tres de ellas en sucesión estratigráfica y denominadas unidad inferior, media y superior, la cuarta unidad corresponde a las lavas de valle, apoyadas sobre las unidades media y superior.

2.1.2 ROCAS INTRUSIVAS

GRUPO PLUTÓNICO MELIPEUCO (Mioceno)

Corresponde a rocas intrusivas extensamente distribuidas en la zona que afloran al norte y sur del CVLT, se trata de un conjunto de granitos, granodioritas, tonalitas y monzonitas subordinadas, de hornblenda y biotita. Intruyen al Complejo Vizcacha-Cumilao, subyacen a la Formación Malleco, además, parece subyacer a la Formación Curamallín en sus niveles superiores, y la intruye en sus niveles inferiores (edad Miocena) (Suarez y Emparán, 1997).

INTRUSIVOS HIPABISALES (Mioceno-Plioceno, ca. 7-3.5 Ma)

Corresponden a cuerpos intrusivos macizos de tipo stock, típicamente de composición andesítica, porfíricos, con plagioclasas, anfíbolos y fuerte silicificación. Se les encuentra cortando los estratos plegados de la Formación Curamallín, y localmente subyacen en discordancia erosiva a la Formación Malleco (Moreno *et al.*, 2012).

2.1.3 DEPÓSITOS CUATERNARIOS

DEPÓSITOS GLACIARES

- Morrenas frontales y de fondo: Se presentan en los faldeos del volcán Lonquimay y Tolguaca, y en varios sectores del río Biobío (Thiele *et al.*, 1987; Suarez y Emparán, 1997). Son depósitos de matriz soportada, caóticos e internamente macizos. La matriz corresponde a arena, ceniza y contenidos variables de limo y arcilla. Los clastos se presentan redondeados a angulosos con tamaños desde milimétricos a un par de metros, son de composición variable, y ocasionalmente se encuentran estriados.
- Depósitos Glaciolacustres: Se encuentran principalmente en el curso superior del río Biobío (Thiele *et al.*, 1987; Suarez y Emparán, 1997). Se trata de depósitos finos de color gris pardo, que presentan laminación varvada fina de entre 1-5 mm de espesor.

DEPÓSITOS FLUVIALES

Corresponden a depósitos de terrazas fluviales, de algunos metros a decenas de metros de potencia, a ambos lados de los ríos Biobío, Queuco, Ralco, Lomin y Lolco (Thiele *et al.*, 1987; Suarez y Emparán, 1997). Son depósitos de gravas, gravas arenosas, arenas y algunos depósitos de limo-arcilla. Presentan estratificación con clastos redondeados desde 5 a 80 cm, generalmente imbricados.

DEPÓSITOS COLUVIALES Y DESLIZAMIENTOS

- Depósitos coluviales: se encuentran bajo relieves abruptos, corresponden a clastos angulosos de tamaños variables y de composición monomítica.
- Depósitos gravitacionales: corresponden a material de tamaños variables, hasta decenas de metros, irregulares, y generalmente monomíticos. Los depósitos presentan formas lobuladas o abanicos polilobulados, y en su parte alta, presentan escarpes de deslizamientos o coronas.

2.2 MARCO GEOLÓGICO DEL VOLCÁN LONQUIMAY

El Complejo Volcánico Lonquimay-Tolguaca está constituido por tres estructuras volcánicas principales: el Volcán Lonquimay, el Volcán Tolguaca y el Cordón Fisural Oriental (Figura 2). Junto a éstos, se reconocen 5 volcanes monogénicos orientados NE-SW, entre los dos estratovolcanes principales. Estos últimos, se encuentran, a su vez, orientados en dirección NE-SW, a lo largo de una estructura de unos 20 km de longitud (Moreno *et al.*, 2012; Moreno y Gardeweg, 1989).

2.2.1 COMPLEJO VOLCÁNICO LONQUIMAY

El Complejo Volcánico Lonquimay (38°22'S y 71°35'W), de edad pleistocena-holocena, se encuentra ubicado en el arco volcánico de los Andes del Sur y genera, predominantemente, productos de composición andesítica. Se compone de un cono principal, y varios conos adventicios, ubicados sobre una fisura de dirección NE-SW, en el lado oeste del cono principal.

El CVL ha presentado frecuente actividad durante el Holoceno, con 5 erupciones históricas (Petit-Breuilh, 1996), y al menos, 19 eventos piroclásticos entre 10.200 y 190 AP (Polanco, 1998; Polanco, 2000). Thiele *et al.* (1987), resume en cuatro fechas las erupciones documentadas del CVL, que en adición a la estudiada por Moreno y Gardeweg (1989), conforman los registros de erupciones históricas del complejo volcánico:

- 1853 (Febrero): Volcán Lonquimay. Fuertes explosiones, proyección de material piroclástico y derrames de lava.
- 1887 (24 de Junio) hasta 1889 (Diciembre): Cordón Fisural Oriental y Volcán Lonquimay (?). Violento ciclo eruptivo con proyección de material piroclástico y grandes emisiones de lavas de bloques.
- 1933 (4 de Enero): Volcán Lonquimay. Erupción de piroclastos.
- 1940 (Febrero): Volcán Lonquimay. Fumarola o erupción de piroclastos (?)

- 1988-1990 Volcán Navidad (Cono de Flanco del volcán Lonquimay). Erupción estromboliana con índices de explosividad volcánica (VEI) que variaron desde 3 a 1 (Moreno y Gardeweg, 1989).

VOLCÁN LONQUIMAY

El volcán Lonquimay corresponde a un estratovolcán de laderas pronunciadas (30-40°), alcanza una altura de 2.865 msnm y su cráter tiene un diámetro de 700 m, se encuentra ligeramente elongado en la dirección WSW-ENE (Thiele *et al.*, 1987; Moreno y Gardeweg, 1989; Moreno *et al.*, 2012).

Luego de la erupción de 1988-1989, Moreno y Gardeweg (1989) definen cinco unidades que componen al estratovolcán (Figura 2), tal como se presentan a continuación:

- Unidad Lonquimay 1 (Pleistoceno Superior): Comprende lavas de composición andesítica y basáltica (51,5-55,2% SiO₂) con intercalaciones volcanoclásticas, que afloran en el flanco norte, noroeste y suroeste del cono principal. Estos depósitos se encuentran cubiertos por las secuencias posteriores, y además presentan erosión glacial y se encuentran cubiertas por vegetación (Moreno y Gardeweg, 1989).
- Unidad Lonquimay 2 (Pleistoceno Superior - Holoceno temprano): Corresponde a emisiones postglaciares de lavas de composición basáltica y andesítico-basálticas (53,7-58,9% SiO₂). Forma gran parte de la ladera oriental y del cráter del cono principal (Moreno y Gardeweg, 1989).
- Unidad Lonquimay 3 (Holoceno Temprano): Constituida únicamente por lavas andesítico-basálticas (51-59,3% SiO₂). Estos productos se encuentran en los flancos norte, oeste y sur del volcán (Moreno y Gardeweg, 1989).
- Unidad Lonquimay 4 (Holoceno): Corresponde derrames de lava hacia el norte y este del volcán, principalmente son de composición basáltica a andesítica-basáltica (Moreno y Gardeweg, 1989).
- Unidad Lonquimay 5 (Holoceno Tardío): Está constituida por lavas emitidas desde el cono principal y desde una fisura de 1,5 km ubicada en el flanco oeste del

mismo. Su composición es preferentemente andesítica-basáltica (54% SiO₂). Presentan morfologías de tipo aa y bloques (Moreno y Gardeweg, 1989).

CORDÓN FISURAL ORIENTAL

El Cordón Fisural Oriental (CFO) corresponde a conos adventicios que se encuentran ordenados a lo largo de una fisura noreste-suroeste (Moreno y Gardeweg, 1989), de unos 8 km de largo, entre los cuales se encuentran cráteres, domos, conos piroclásticos y pequeñas fisuras inferiores a 0,5 km de largo (Thiele *et al.*, 1987). Estas estructuras se emplazan sobre rocas de la Formación Malleco. Las composiciones varían desde andesitas-basálticas hasta dacitas (52,8-65% SiO₂) (Moreno *et al.*, 2012).

De acuerdo a lo anterior, se identifican las siguientes unidades:

- Volcanes Portezuelo (Holoceno): corresponden a un par de conos de piroclastos, de unos 150 m de altura. Se encuentran ubicados en las faldas del Volcán Lonquimay, hacia el lado este del mismo. Su composición es dacítica (62,3-65% SiO₂) y están cubiertos por piroclastos indiferenciados. (Moreno *et al.*, 2012),
- Conos, domos, lavas y cráteres de explosión (Holoceno): se trata de un conjunto de conos piroclásticos, domos, lavas de tipo aa y bloques, y cráteres de explosión, alineados en dirección NE-SW a lo largo del CFO. Son de composición principalmente andesítico-basáltico con algunas coladas andesíticas intermedias (53-57,7% SiO₂). Todas estas estructuras se encuentran cubiertas por piroclastos indiferenciados. (Moreno *et al.*, 2012).
- Lavas de Bloques Río Lolco (Holoceno histórico): colada tipo bloques, de erupción histórica no documentada, emitida desde un cráter en la zona central del CFO, que descendió hacia el valle del Río Lolco, y alcanzó una distancia aproximada de 5 km de largo. La colada es de composición andesítica intermedia (57,7-58,5% SiO₂), y su parte occidental, se encuentra cubierta parcialmente por la colada del Volcán Navidad (Moreno *et al.*, 2012).

- Lava de Bloques Las Paramelas (Holoceno histórico): derrames de lavas de tipo bloques de la erupción de 1853, que tuvo lugar al pie del volcán Lonquimay, de composición andesítica silícea (ca. 62% SiO₂) (Moreno *et al.*, 2012).
- Lavas de Bloques Diamante (Holoceno histórico): derrames de lava del ciclo eruptivo de 1887-89, que tuvo lugar en el pie del volcán Lonquimay, de composición dacítica (63-65% SiO₂) (Moreno *et al.*, 2012).
- Volcán Navidad (1988-1990) (Holoceno histórico): corresponde a la actividad más reciente del complejo, y consiste en un cono de piroclastos y una colada de 10 km de largo, de morfología intermedia entre aa y bloques, que descendió por el valle del Río Lolco, hasta las faldas del Volcán Lolco. La erupción, de tipo estromboliana, comenzó el 25 de diciembre de 1988, y se extendió hasta fines de enero de 1990. El cono alcanza una altura de 190 m y tiene 360 m de diámetro. La colada tiene un volumen aproximado de 0,25 km³, alcanzó 10,9 km de distancia, tiene un espesor de 55 m en su frente y un espesor promedio de 25 m, y cubre un área aproximada de 10 km² (Moreno *et al.*, 2012).

2.2.2 VOLCÁN TOLGUACA

El Volcán Tolguaca corresponde a un estratovolcán mixto, de 2806 msnm, su base es aproximadamente elíptica con diámetros de 20 km (NE-SO) y 13 km (NO-SE) (Thiele *et al.*, 1987), cubriendo una superficie de ca. 200 km². La composición principal es andesita basáltica y andesita, aunque también se presentan rocas de composiciones desde basaltos a dacitas. Las rocas son de carácter alcalino (Suarez y Emparán, 1997)

El edificio volcánico se presenta intensamente erodado, fundamentalmente por glaciares, los cuales todavía se encuentran sobre el volcán, y tapan una superficie de 5 km². Las morfologías erosivas encontradas son circos y valles glaciares en los flancos oriental y sur, donde se pueden observar la estratigrafía con lavas macizas de 5-20 m de espesor, farellones abruptos, rocas aborregadas, acanaladuras, estrías glaciares y depósitos morrénicos (Suarez y Emparán, 1997).

Se desconocen eventos eruptivos históricos, con antecedentes fidedignos; sin embargo, en National Geographic Magazine (1941) y en un trabajo inédito de G.

Hantke, se mencionan erupciones. Actualmente, se presenta actividad fumarólica desde una fisura en la cima (Suarez y Emparán, 1997).

2.2.3 CONOS MONOGÉNICOS PERIFÉRICOS

En el área se han identificado 5 volcanes monogenéticos independientes, que presentan una alineación de orientación N65°E (Moreno *et al.*, 2012)

- Volcán La Holandesa (Holoceno): Corresponde a un cráter de 300 m de diámetro (Moreno y Gardeweg, 1989), alojado en un circo glaciar, que coincide con un cráter de explosión de tipo maar. Se emplaza sobre rocas de la Formación Curamallín, y su composición es andesítico-basáltica (53,2% SiO₂) (Moreno *et al.*, 2012).
- Volcán Laguna Verde (Holoceno): Corresponde a un cono de piroclastos de 100 m de altura alojado en un cráter mayor de 300 m de diámetro (Moreno y Gardeweg, 1989). Se formó sobre unidades del Volcán Tolguaca, y presenta coladas de lava asociadas, de composición andesítico-basáltica (54,5% SiO₂) (Moreno *et al.*, 2012).
- Volcán Lolco (Holoceno): Corresponde a un cono de piroclastos, ubicado en el valle del Río Lolco, a 12 km al NE del Volcán Lonquimay (Moreno y Gardeweg, 1989). Presenta 3 coladas de lava de tipo aa, de composición andesítico-basáltico (54,2% SiO₂) (Moreno *et al.*, 2012).
- Volcán Caracol (Holoceno): Conjunto de pequeños centros de emisión, que consiste en un cono piroclástico (Moreno y Gardeweg, 1989), con un cráter de 250 m de diámetro, anidado en uno mayor de 500 m de diámetro abierto al sur, y de un cráter adjacente de 350 m de diámetro. Su composición es andesítica-basáltica (53,4% SiO₂) (Moreno *et al.*, 2012).
- Volcán Colli (Holoceno): Corresponde a un cono piroclástico fisural alargado de 400 m de longitud, en dirección NW-SE, formado por salpicaduras de tamaño bomba a lapilli grueso, de intenso color rojizo, ubicado en el flanco suroeste del Volcán Tolguaca. Su composición es andesítica-basáltica (53,4% SiO₂) (Moreno *et al.*, 2012).

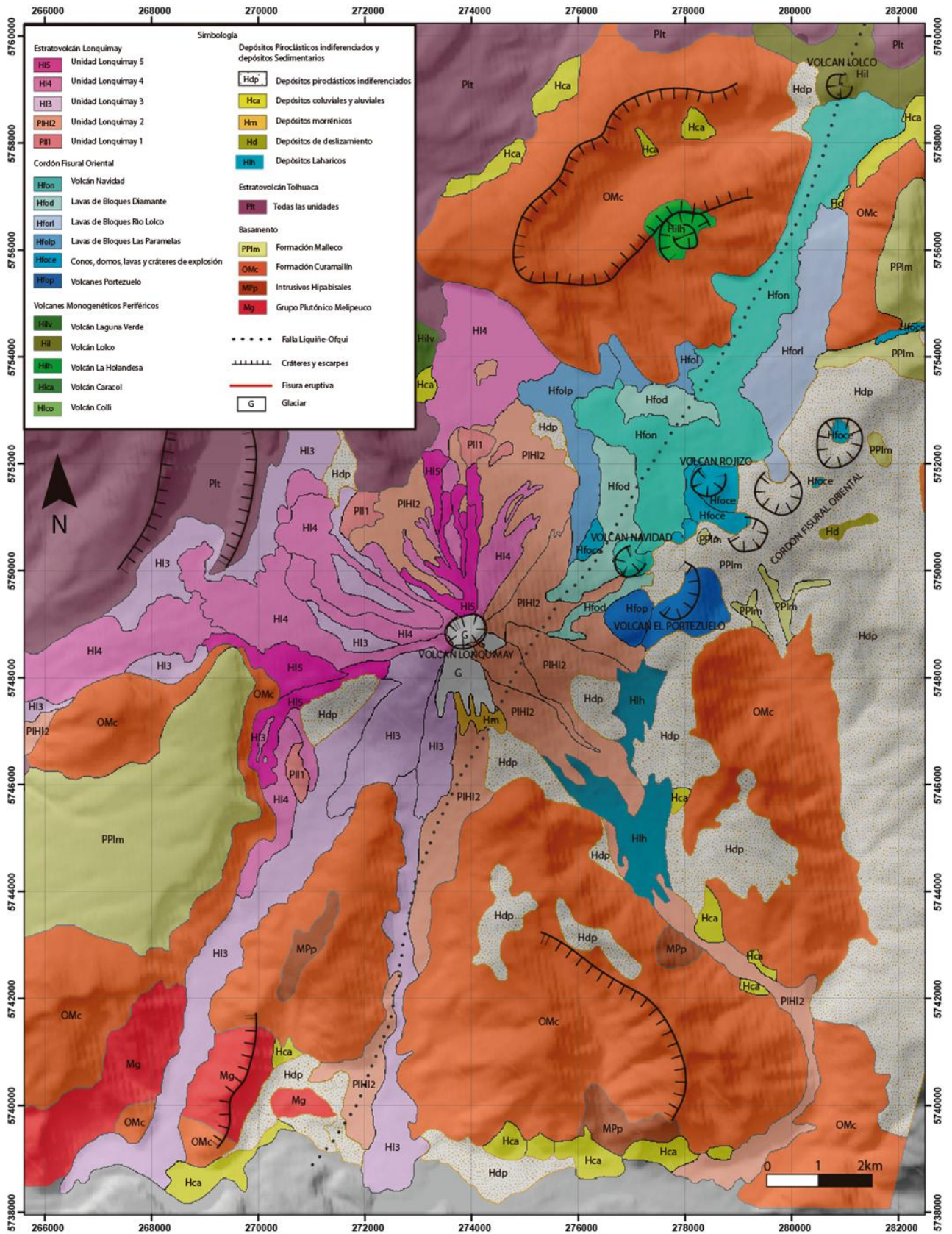


Figura 2: Mapa Geológico de la zona de estudio. Modificado de Moreno *et al.* (2012).

Las coordenadas refieren al sistema WGS84, UTM 19 Sur.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

El estudio de las coladas de lava ha sido un tema muy abordado en los trabajos volcanológicos (Walker (1973), Hulme (1974), Malin (1980), etc), tanto por la necesidad de conocer el comportamiento de éstas, así como, poder predecir las dimensiones y tiempo en que se demorarán en lograrlo, para así poder alertar a la población de posibles peligros.

Para poder comprender cuales son los factores que determinan el comportamiento de las coladas de lava durante su avance, es necesario realizar modelos que predigan la conducta de estos flujos. Son innumerables los parámetros que determinarán su avance, además la morfología y dimensiones de las coladas también serán originados por la acción de estas variables. Impondrán mayor efecto sobre las coladas de lava, la tasa efusiva, la topografía, y la reología de la lava; a su vez, ésta última, depende de la composición de la fase fluida, de la temperatura y del contenido de cristales y burbujas (Sparks y Pinkerton, 1978; Pinkerton y Stevenson, 1992; Marsh, 1981; Mueller *et al.*, 2000; Castruccio *et al.*, 2013, etc.). Además, la formación y generación de *levées*, el hinchamiento, la formación de corteza, etc., también irán variando el comportamiento de las coladas.

Para el trabajo de este estudio, se utilizarán las ecuaciones obtenidas mediante análisis dimensional en Castruccio (2012) y Castruccio *et al.* (2013), las cuales se presentan en detalle en la sección 3.2.

3.1 ESTUDIOS ANTERIORES

A continuación se presentan los principales estudios que se han realizado sobre la dinámica de las lavas.

Las primeras investigaciones enfocadas a estudiar los factores que controlan el avance de las lavas son Walker (1973) y Hulme (1974). Walker (1973) fue el primer

autor en notar la influencia de la tasa eruptiva en el largo de las coladas, proponiendo que a mayor tasa eruptiva, el depósito alcanzará distancias mayores y generará coladas simples. En el caso de que la tasa eruptiva sea baja, se generarán coladas superpuestas, generando un depósito potente pero limitado lateralmente, que alcanzarán poca distancia desde la fuente.

Hulme (1974), propone que los flujos de lava se comportan como fluidos no-newtonianos, que poseen *yield strength* (que corresponde al mínimo stress necesario para generar deformación en el flujo), y que sería este factor el que determinaría las dimensiones de la colada. En este trabajo, se realizaron experimentos, en los que se identificó el comportamiento de las lavas, como un flujo de tipo Bingham, además se identificó que los *levées* observados en flujos reales, corresponden a una morfología que se predice con el modelo utilizado.

Malin (1980), identifica el volumen total eruptado como otro factor determinante en las dimensiones alcanzadas por las coladas de lava. Así, propone que el largo de la colada dependerá tanto de la tasa efusiva, como del área de una sección transversal y del volumen eruptado, sin reconocer ninguno de estos factores como el más importante.

Huppert *et al.* (1982) indica que el domo de lava basáltica andesítica del Volcán Soufriere en 1979 habría tenido una viscosidad efectiva de hasta $2 \cdot 10^{12}$ poise; este valor tan alto, se debería a la influencia de una corteza de muy alta viscosidad que se habría formado por enfriamiento en los márgenes del domo. Indican también, que después de 70 días del inicio de la erupción, la tasa de crecimiento de la extrusión habría disminuido notablemente debido a un collar de escombros acumulados en el frente de flujo. Debido a este collar, el crecimiento del domo cesó después de 150 días. Además, se observó desde aproximadamente dos semanas después de la iniciación de la extrusión, la velocidad de descarga de lava disminuyó de forma casi lineal con el aumento de altura de la cúpula. Esta observación sugiere que la lava asciende a una presión hidrostática de conducción decreciente y que la extrusión cesa cuando la columna de la lava alcanza el equilibrio hidrostático.

Flink y Griffiths (1992), realizan un estudio en el cuál determinan que las estructuras presentes en las cortezas de los flujos de lava, son un efecto combinado de la velocidad del flujo, condiciones termales y de la aspereza de la superficie. En cada caso, el enfriamiento de la corteza durante el flujo dará diferentes morfologías superficiales. Las más comunes corresponden a las llamadas *pillows*, *rifts*, y *levées*, todas observadas en flujos reales.

Asumiendo que una colada está compuesta por un material interior isotermal, y una corteza externa, Griffiths y Flink (1993), muestran que el esfuerzo de la corteza enfriada dominará sobre la viscosidad y el *yield strength* interno, en el movimiento del flujo, cuando ésta es lo suficientemente gruesa.

Blake y Bruno (2000), mediante experimentos de laboratorio con cera como material análogo, caracterizaron la generación de coladas compuestas, encontrando que el avance y la morfología que alcanzan las coladas dependen fuertemente del crecimiento, deformación y ruptura de su corteza. El rol de la corteza, también es importante en la canalización del flujo, formación de nuevas ramas de éste y la formación de texturas características.

En los trabajos de Balmforth (Balmforth N. J., 2000a; Balmforth N. J., 2002), se investigó el comportamiento de flujos viscoplásticos en un plano inclinado, sería el primer modelo en introducir la idea de considerar el contenido de cristales en la reología del flujo, usando un modelo reológico de Herschel-Bulkley.

Lyman *et al.* (2005), luego de una serie de papers, muestra que en modelos con *yield strength* interno, los flujos se detendrán por efecto de éste mismo o por el enfriamiento de la corteza. Junto con esto, encontraron que el *yield strength* de la corteza en enfriamiento, aumenta con el ascenso del *yield strength* interno. Además realizan un estudio para el caso de que no exista *yield strength* interno, donde encontraron que, estos flujos se detienen por el aumento del *yield strength* de la corteza.

Takagi y Huppert (2010), identifican a partir de un análisis dimensional, que la tasa de avance del frente de los flujos de lava, se encuentra controlado principalmente por la tasa eruptiva, y en menor medida por la topografía. Junto con esto, indican que la viscosidad aparente del flujo se va incrementando en las etapas posteriores del avance, cuando el enfriamiento de éste se vuelve más importante. Identifican que lavas del Volcán Kilauea, se comportan inicialmente como un fluido newtoniano de viscosidad constante, que solo aumentaría en los últimos estadios de avance de estos flujos; en cambio, coladas de lava de los volcanes Etna y Lonquimay incrementan importantemente su viscosidad desde el comienzo de su avance.

3.2 MODELACIÓN DE LOS FLUJOS DE LAVA

Para la determinación de los parámetros eruptivos de las coladas de lava estudiadas en este trabajo, se utilizarán las fórmulas presentadas en Castruccio (2012) y Castruccio *et al.* (2013), las cuales se presentan a continuación:

3.2.1 REOLOGÍA DE LOS FLUJOS DE LAVA

De acuerdo a observaciones, como se ilustra en la Figura 3, el comportamiento de las coladas de lava se puede modelar utilizando distintos casos para la reología:

El caso Newtoniano es el caso más simple de comprender, ya que el *stress* aplicado ($\tau = \text{applied stress}$) depende de manera lineal con la viscosidad (μ) y de la tasa de deformación ($\dot{\gamma} = \text{strain rate}$):

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

Otro caso, corresponde a los flujos que se comportan como fluidos de tipo Bingham, propuesto por Robson (1967) y Shaw (1969):

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma} \quad (2)$$

donde, τ_y es el *yield strength*, que corresponde al mínimo *stress* aplicado necesario para generar una deformación permanente en el fluido, y μ_p es la viscosidad plástica.

El tercer caso corresponde al modelo de Herschel-Bulkley (1926), donde se toma en cuenta tanto el *yield strength* de la lava, como los efectos de la tasa de deformación, y puede ser utilizado en lavas con contenido cristalino:

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

donde, K es la llamada consistencia, y n corresponde a un parámetro adimensional.

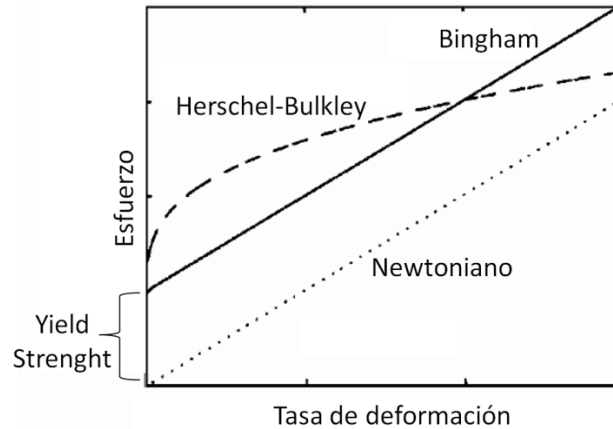


Figura 3: Curvas esquemáticas de los modelos reológicos: Bingham (curva de línea continua), Newtoniano (curva de línea punteada) y Herschel-Bulkley (curva de línea discontinua). Modificado de Balmforth *et al.* (2000b)

La consistencia K corresponde un parámetro que tiene relación con la viscosidad, cuando la tasa de deformación es igual a la unidad, y considerando $\tau_y = 0$ (Griffiths, 2000). Para poder obtener su valor, se cuenta con la ecuación presentada en Castruccio *et al.* (2013), donde la consistencia de las lavas se calcula de acuerdo a:

$$K = \mu_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2.3} \quad (4)$$

con μ_0 la viscosidad de la fase líquida, ϕ el contenido de cristales, y ϕ_m el empaquetamiento máximo cristalino. Este último parámetro corresponde a la fracción volumétrica máxima de las partículas cristalinas dentro del fluido, y representaría la estructura de ellas en suspensión, además de la distribución de tamaños y forma de los cristales (Zhou *et al.*, 1995).

Así, para el cálculo de la viscosidad del líquido, se cuenta con el modelo de Giordano *et al.* (2008):

$$\log\mu_0 = A + \frac{B}{T(K)-C} \quad (5)$$

donde A es el valor de $\log(\mu_0)$ cuando la temperatura tiende a infinito, B y C son constantes dependientes de la composición del fluido, incluyendo los volátiles.

Para obtener el valor del *yield strength*, Hulme (1974) presenta una fórmula con la que es posible obtener el valor de este parámetro a partir de las dimensiones del *levée* de la lava, que representaría las dimensiones del flujo que paso por primera vez por un lugar. Si w_1 es el ancho del *levée*, entonces el *yield strength* está determinado por:

$$\tau_y = 2w_1\rho g \sin^2 \beta \quad (6)$$

con ρ la densidad, g la gravedad y β la pendiente del sector.

Pero, cuando la lava se encuentra estacionaria, como en el frente de la colada, el *yield strength* está dado por la fórmula presentada en Johnson (1970):

$$\tau_y = \rho g H \sin \beta \quad (7)$$

con H la altura de la colada.

3.2.2 DINÁMICA DE LOS FLUJOS DE LAVA

Para el cálculo de la tasa eruptiva, se ocupa el caso de un fluido tipo Herschel-Bulkley, donde el movimiento de la lava estará determinado por la gravedad y el esfuerzo, se tiene:

$$\tau = z\rho g \sin \beta \quad (8)$$

donde, z será la coordenada que dará la altura de la colada, con el cero sobre ella, ρ es la densidad de la lava, g es la aceleración de gravedad y β la pendiente de la superficie.

Si se considera,

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dz} \quad (9)$$

con u la velocidad del flujo, entonces, de acuerdo a Castruccio (2012), la velocidad promedio será:

$$\bar{u} = \frac{H^2 \rho g \sin \beta}{3K} \left(\frac{3n}{H^{3(n+1)}} \left(\frac{\rho g \sin \beta}{K} \right)^{\frac{1-n}{n}} \right) \left(H(H - h_c)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{n}{2n+1} (H - h_c)^{\frac{2n+1}{n}} \right) \quad (10)$$

con \bar{u} la velocidad promedio, H la altura de la colada, y $h_c = \frac{\tau_y}{\rho g \sin \beta}$.

Si se asume que la tasa eruptiva Q es (Castruccio, 2012):

$$Q \cong \bar{u}HW \quad (10)$$

con W el ancho del flujo, entonces la ecuación anterior queda:

$$Q = \frac{H^3 W \rho g \sin \beta}{3K} \left(\frac{3n}{H^{3(n+1)}} \left(\frac{\rho g \sin \beta}{K} \right)^{\frac{1-n}{n}} \right) \left(H(H - h_c)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{n}{2n+1} (H - h_c)^{\frac{2n+1}{n}} \right) \quad (11)$$

Luego, de acuerdo a Castruccio (2012), existen casos especiales en que las ecuaciones se pueden simplificar, considerando solo las fuerzas de primer orden, a partir de esto, propone unos modelos donde el flujo de lava es llevado pendiente abajo producto de la fuerza de gravedad, tal que la masa del flujo no produce ningún efecto sobre este movimiento, así, la fuerza de movimiento F_d estaría dada por:

$$F_d \sim V \rho g \sin \beta \quad (12)$$

con V , el volumen del flujo.

Así, dependiendo de la fuerza que actúe para detener la lava, se proponen tres regímenes: uno controlado principalmente por la viscosidad del flujo, caso Newtoniano (Figura 4a); uno controlado por el *yield strength* de la corteza en crecimiento (Figura 4b); y el otro, donde se considera un *yield strength* en todo el flujo, como un núcleo (Figura 4c).

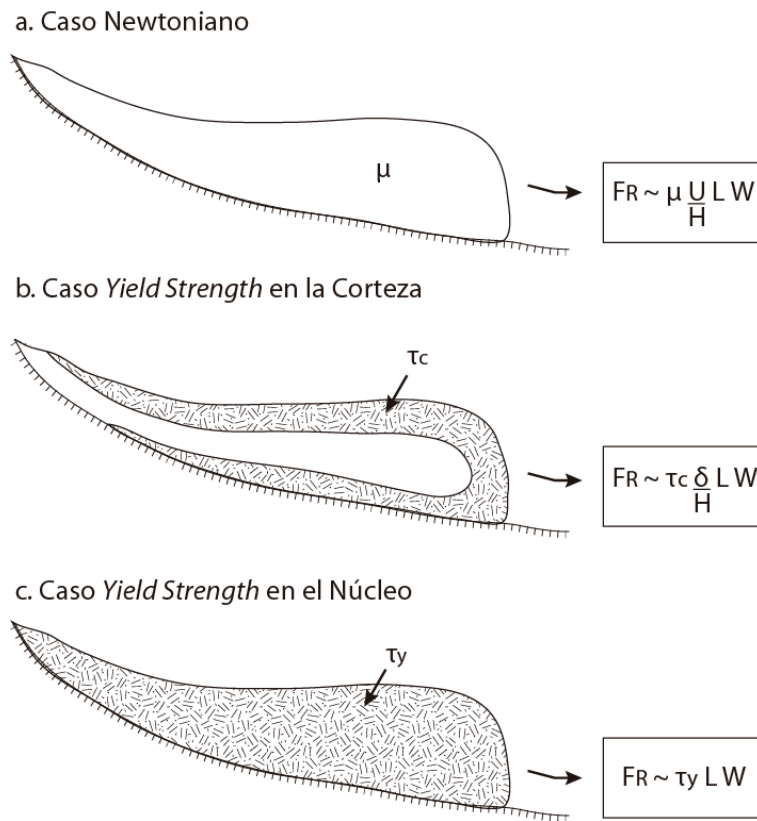


Figura 4: Dibujo ilustrativo de los 3 casos presentados: (a) Caso Newtoniano, (b) Caso *Yield Strength* en la Corteza, (c) Caso *Yield Strength* en el Núcleo. Modificado de Castruccio (2012).

3.2.2.1 CASO NEWTONIANO

En este caso, el movimiento del flujo depende únicamente de la viscosidad interna, así, la fuerza retardante (F_R) será proporcional a $\mu\dot{\gamma}$, que es proporcional a U/H , donde U es la velocidad del flujo y H es la potencia del mismo. Como esta fuerza actúa sobre un área igual a la base del flujo, entonces será proporcional a LW , con L y W , largo y ancho de la colada respectivamente. Así, la fuerza retardante para el caso Newtoniano será:

$$F_R \sim \mu \frac{U}{H} L W \quad (13)$$

Así, la colada de lava mantendrá una velocidad constante cuando $F_d = F_R$.

Si se considera $U \sim \frac{L}{t}$ y $V \sim LWH$ (Castruccio, 2012), entonces se puede calcular la posición del frente del flujo de lava a lo largo de su avance con la siguiente fórmula:

$$L = \left(\frac{V^2 \rho g \sin \beta t}{\mu W^2} \right)^{1/3} \quad (14)$$

3.2.2.2 CASO *YIELD STRENGTH* EN EL NÚCLEO

Para este caso, se considera que la fuerza retardante corresponde al *yield strength*, que es aplicado en todo el flujo:

$$F_R \sim \tau_y LW \quad (15)$$

De la misma forma anterior, se puede calcular el largo de la colada:

$$L = \frac{V \rho g \sin \beta}{\tau_y W} \quad (16)$$

3.2.2.3 CASO *YIELD STRENGTH* EN LA CORTEZA

En este caso, el avance de la colada se debe al *yield strength* de la corteza, que va creciendo mientras se produce el movimiento, producto de un enfriamiento conductivo, de manera que el espesor de la corteza será:

$$\delta \sim \sqrt{kt} \quad (17)$$

donde, k es la difusibilidad termal de la lava, con un valor $\sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Pinkerton y Sparks, 1976; Kerr y Lyman, 2007).

Suponiendo que la fuerza retardante debido al *yield strength* de la corteza, es suficientemente mayor que la fuerza retardante debido a la viscosidad interna; que la conductividad térmica es significativa tanto en la superficie como en la base de la colada; y que la densidad de la corteza es idéntica a la densidad interna, entonces, la fuerza retardante para el Caso *Yield Strength* en la Corteza sería:

$$F_R \sim \tau_c \frac{\delta}{H} LW \quad (18)$$

donde τ_c es el *yield strength* de la corteza. Finalmente, la posición del frente de la colada estaría dado por:

$$L = \left(\frac{V^2 \rho g \sin \beta}{W^2 \tau_c \sqrt{kt}} \right)^{1/2} \quad (19)$$

CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CVL

En este capítulo se detallan las características morfológicas y petrológicas de las coladas de lava estudiadas. Para esto, se realizó un estudio acabado en terreno, junto con imágenes satelitales y aéreas. Con esto, se determinaran los parámetros eruptivos que caracterizaron las erupciones que dieron lugar a las diferentes coladas, en el Capítulo V.

4.1 CRITERIOS DESCRIPTIVOS

4.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Las coladas de lava se pueden dividir de acuerdo a su morfología en tres tipos principales (Macdonald, 1953), de esta manera, las de tipo pahoehoe se caracterizan por presentar superficies suaves, cordadas y ondulosas, con vesículas esferoidales, y alcanzan potencias de solo algunos metros. Las lavas aa se identifican por presentarse muy fragmentadas, con superficies espinosas, y sus vesículas son irregulares. Las de tipo bloques, difieren de las aa por presentar bloques con formas más regulares, y con superficies más lisas. Las lavas aa alcanzan espesores de hasta 50 m, pero generalmente, consiguen espesores de hasta 30 m, en cambio las lavas de tipo bloques, comúnmente exceden los 50 m de potencia (Macdonald, 1953). Estos tres tipos de morfología forman una secuencia continua.

Además, las coladas de lava presentan características morfológicas que las permiten separar en segmentos particulares. Lipman y Banks (1987), dividen las coladas del Mauna Loa de 1984, en 3 zonas longitudinalmente (Figura 5a): la zona de dispersión, que corresponde a la zona inmediatamente detrás del frente de la colada, donde el flujo se dispersa, y no presenta canal central; la zona transicional, donde se presenta un canal central desarrollado, donde además se forman por el avance de la lava, *ridges* o lentes de lava de tipo bloques, limitados por fracturas discretas; y la zona de canal estable, que se caracteriza por presentar un canal estable muy desarrollado y

marcado. Por otro lado, Borgia *et al.*, 1983, divide en dos unidades las coladas lateralmente: el canal central y los *levées* (Figura 5b), donde los *levées* representan los límites laterales del flujo, y se encuentran cubiertos exteriormente por detritos. El canal central, por otra parte, es el área entre ambos *levées*, presenta una superficie curva, que siempre se encuentra cubierta por detritos. Cuando se genera una colada de lava, el avance de ésta está marcado por el frente de la colada, pero una vez que pasa, el flujo del material fundido se va concentrando en la parte central, quedando de manera estática las zonas laterales, formando los *levées*. De esta forma, la posición y la altura de los *levées* representan el ancho y alto de la colada al pasar el frente por ese lugar. De acuerdo a esto, los *levées* serán la mejor representación del material que escurrió en primer lugar, por lo que las muestras tomadas desde ellos, serán las más representativas de la composición del material inicial. Hulme (1974) sugirió que la formación de esta morfología se debe a la reología de la lava, específicamente a la existencia de un *yield strength* en ésta.

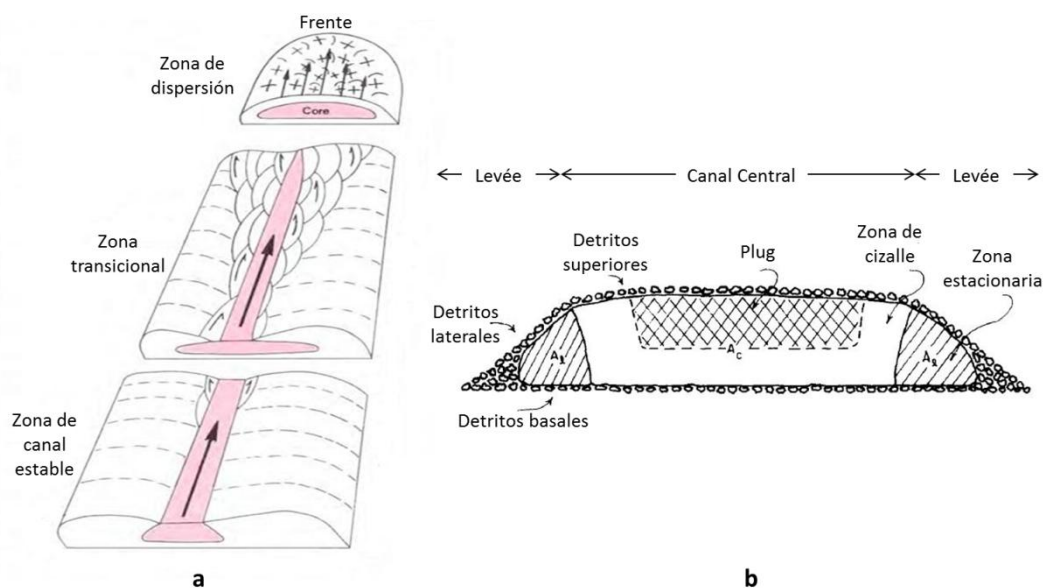


Figura 5: Esquemas de coladas. (a) Segmentación a lo largo de una colada. Modificado de Lipman y Banks (1987). (b) Unidades en un corte transversal. Modificado de Borgia *et al.* (1983).

De acuerdo a Sparks *et al.* (1976), se puede clasificar los *levées* en 4 tipos, pero solo tres de ellos se reconocen en las coladas de este estudio (Figura 6): *levées* de tipo inicial, que es el que delimitará el ancho de la colada; *levées* de tipo *rubble*, que se

caracterizan por los taludes con detritos, de lava de corteza rugosa, principalmente de tipo aa; y acrecionarios, que se generarán cercanos al centro efusivo, poseen alta pendiente en los taludes, y se caracterizan por ser macizos. Es por esto, que las muestras más representativas del fluido, en el momento que paso por un sector, corresponden a las obtenidas de los *levées* de tipo inicial.

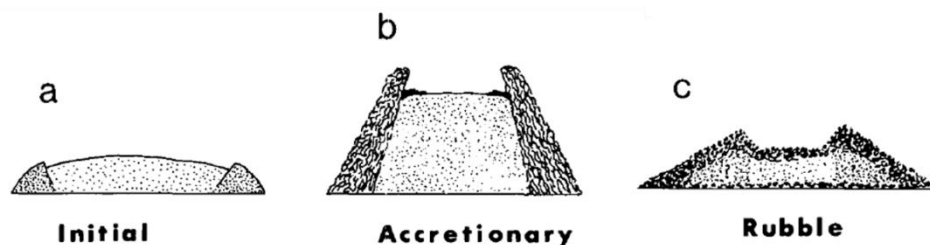


Figura 6: Esquema representativo de los tipos de *levées* que se encuentran en las coladas estudiadas. (a) *Levé*e inicial. (b) *Levé*e acrecionario. (c) *Levé*e tipo *rubble*. Modificado de Sparks *et al.* (1976).

Al mismo tiempo, las coladas de lava pueden ser simples o compuestas (Walker, 1972), las coladas compuestas se reconocen porque pueden ser divididas en unidades, en cambio las simples, corresponden a un solo flujo. De acuerdo a Dragoni y Tallarico (1996), la generación de coladas compuestas o efímeras, se produciría cuando el frente de la colada, que se comporta como una corteza viscoelástica, se va deformando producto de la acumulación de material en el frente, se rompe producto de que el *stress* normal sobrepasa la resistencia al esfuerzo de la corteza. La característica distintiva de estos brazos sería que no se encuentran conectadas directamente con la fuente de emisión. Calvari y Pinkerton (1998) clasifican este tipo de flujos en tres clases: coladas efímeras de primer orden, donde el nuevo flujo se produce desde la base del frente de la colada parental, que se habría detenido producto del enfriamiento, pero la adición de material habría continuado, generando el hinchamiento del frente de la colada. En su caso de estudio, el largo de algunas de estas coladas, alcanzaba más de la mitad del largo de la parental. Los flujos efímeros que se generan sobre el conducto administrador de material, corresponden a las coladas efímeras de segundo orden, que normalmente generan depósitos anchos y en forma de abanico, producto del poco material que se les suma. Finalmente, las coladas efímeras de tercer orden, corresponden a las que nacen desde los costados de las coladas parentales, y se

caracterizan por ser de muy corta duración, por lo que se trata de coladas muy pequeñas.

En general, las coladas estudiadas en este trabajo, presentan morfologías de tipo mixto aa-bloques, con *levées* y canal central bien desarrollado en las facies proximales medias, y un frente más ancho y potente, sin *levées*.

4.1.2 CRITERIOS TEXTURALES

Durante el trabajo en terreno, se ha realizado una caracterización detallada de las estructuras encontradas, como las texturas superficiales, los tamaños de bloques, las morfologías de las coladas, que serán información muy importante para poder decidir cuáles son los factores que determinan en mayor medida la reología de las coladas.

A continuación se presentan los principales tipos de texturas halladas:

- Bloques con corteza brechoza: se reconocen por presentar en la corteza una textura como un aglomerado de clastos, también de lava, que se adosan a la superficie del bloque (Figura 7a). Estos clastos, se presentan generalmente angulosos, pero en algunos casos, un tanto redondeados y el rango de tamaños para ellos es de 5-10 cm. Generalmente este tipo de corteza presenta un tinte rojizo, debido a óxido. Estos bloques, además, presentan un interior o centro macizo, casi sin vesículas.
- Bloques con corteza rugosa: se caracterizan por estar cubiertos por una superficie muy áspera y muy vesiculada, con salientes, producto de los bordes de vidrio que quedan alrededor de burbujas de gas (Guilbaud *et al.*, 2005). Corresponde a la textura típica de corteza en bloques de coladas aa. Estos bloques, al igual que los anteriores, presentan un interior o centro macizo, casi sin vesículas (Figura 7b).

- Textura lajada: es una textura que se caracterizan por la presencia de láminas paralelas de roca, que tienen superficies preferentemente lisas (Figura 7c).
- Marcas de cizalle: presentadas en Applegarth *et al.* (2010) como textura de tipo *peeling*, corresponden a bloques que sufrieron deformación frágil-dúctil sobre su corteza debido a la fricción entre bloques, además indican que el bloque se encontraba todavía en un estado plástico cuando se generaron, lo suficientemente dúctil como para deformarse bajo su propio peso (Figura 7d).
- Protuberancias: descritas por Applegarth (Applegarth *et al.*, 2010) como *spines*, se trata de lava que extruye a través de la corteza ya casi fría. El material que sale, se encuentra en un estado cercano al sólido, y generalmente, suceden cercanas al frente de la colada. Indican que el material interno todavía tiene un comportamiento dúctil, mientras que la superficie de la colada, se comporta como frágil. Estas protuberancias pueden alcanzar, en las lavas estudiadas, hasta 3 metros de altura (Figura 7e).
- *Ridges* transversales: se reconocen como “grietas” perpendiculares a la dirección del flujo de la lava (Figura 7f). Tienen una amplitud de entre 10-50 metros de valle a valle, dependiendo de la colada. Generalmente, se encuentran cubiertos por los bloques propios de la colada.
- *Ridges* longitudinales: corresponden a “grietas” a lo largo de la colada, en la misma dirección del flujo. La separación entre ambos lados es de aproximadamente 3-10 metros, y presentan superficies lisas, incluso en algunos casos se presentan lavas lajadas en su superficie, y también, presentan algunas marcas de cizalle.

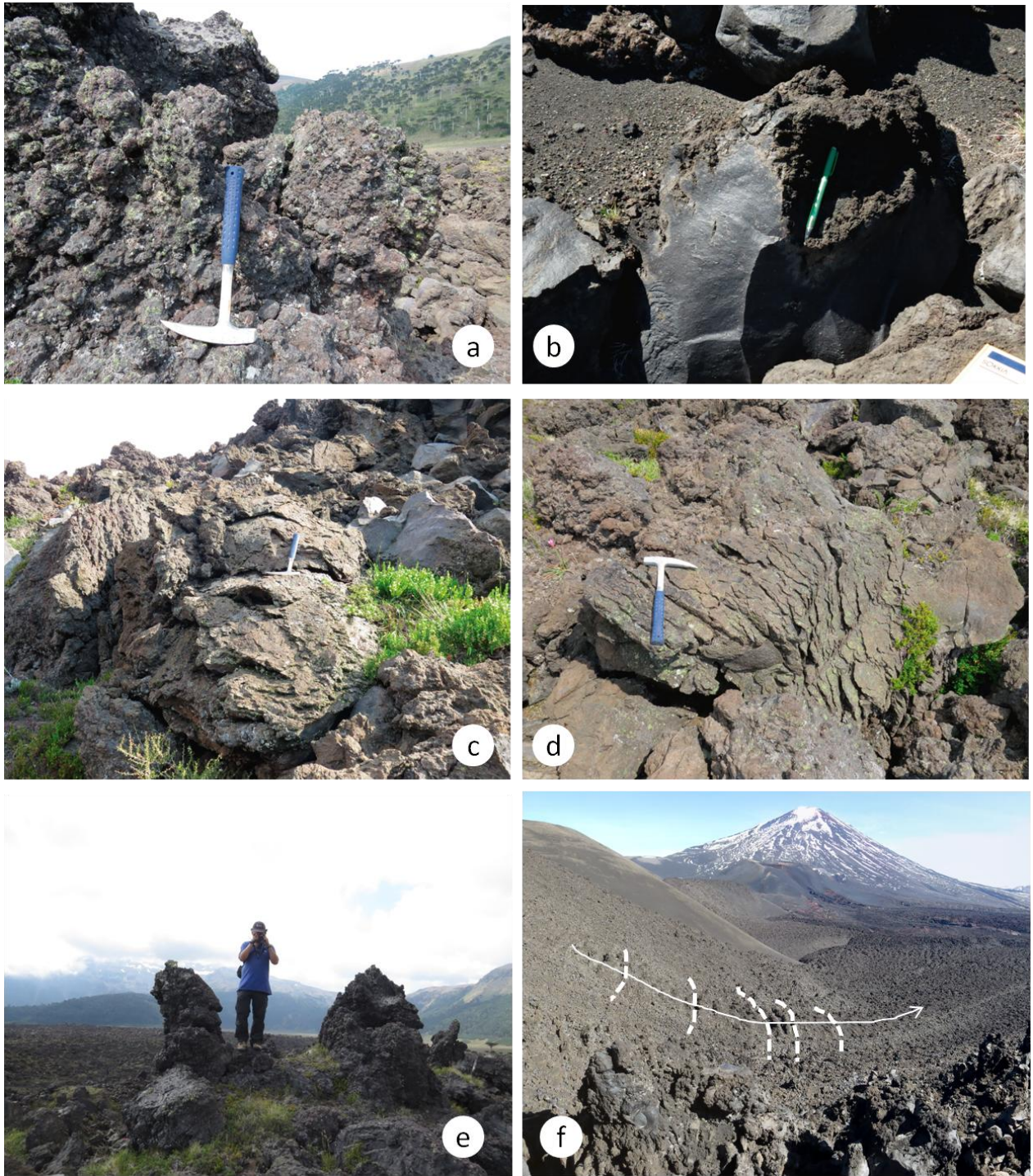


Figura 7: Imágenes representativas de diferentes tipos de cortezas. (a) Corteza brechoza. (b) Corteza rugosa y centro macizo. (c) Corteza lajada. (d) Marcas de cizalle. (e) Protuberancias. (f) *Ridges* Transversales (líneas discontinuas) a la dirección del flujo marcada con una flecha.

4.2 DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA DE LAS COLADAS

En esta sección, se presentan las seis coladas de lava estudiadas (Figura 8), con sus características principales, datos que fueron recolectados durante tres campañas a terreno a la zona de estudio, y algunos datos adquiridos de imágenes satelitales y aéreas.

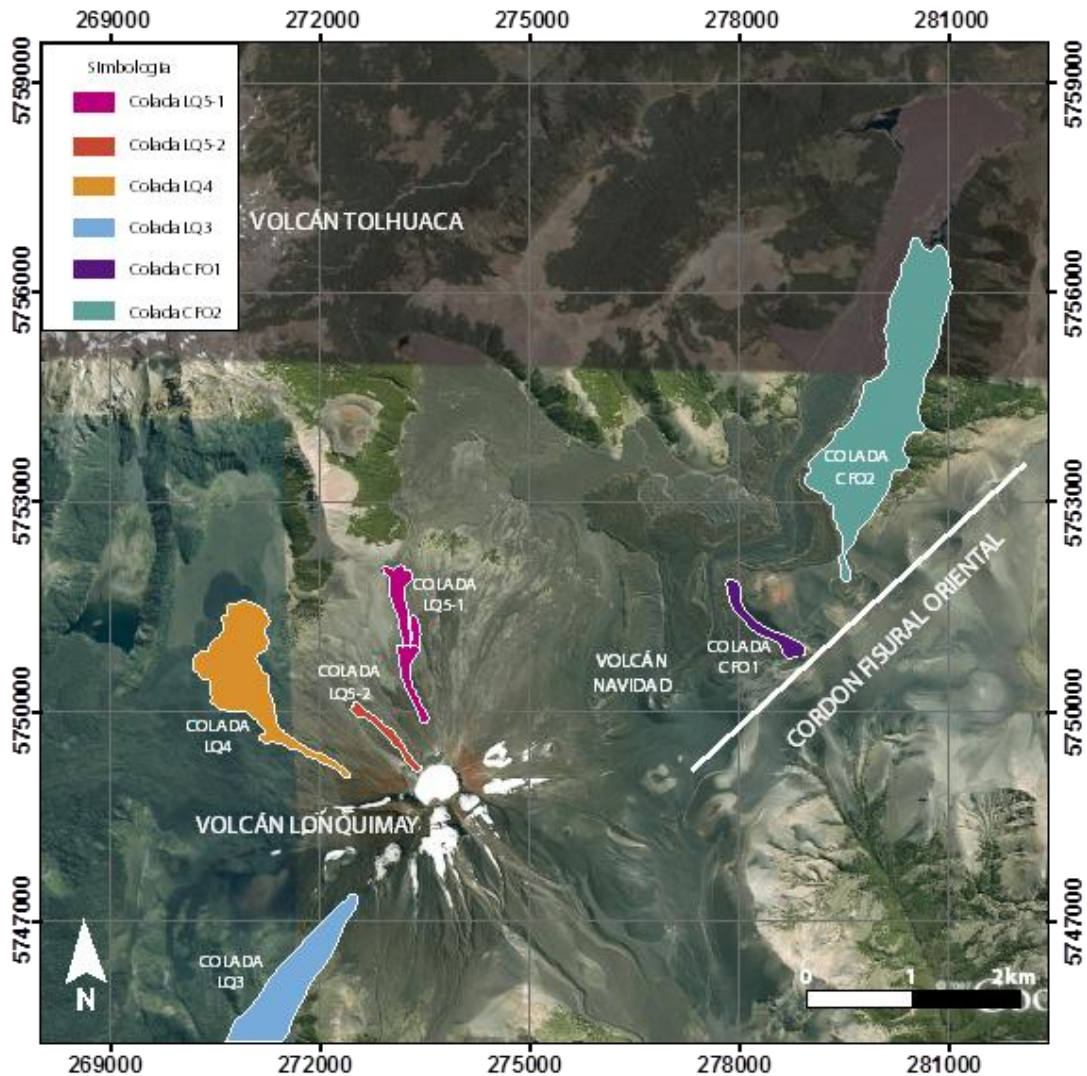


Figura 8: Ubicación de los flujos de lava estudiados: cuatro flujos provienen del Volcán Lonquimay (LQ5-LQ3) y dos flujos, del Cordón Fisural Oriental (CFO1-CFO2). En la imagen se muestran las estructuras principales del CVL: Volcán Lonquimay, Volcán Tolhuaca, y CFO, junto con el Cráter Navidad. Las coordenadas refieren al sistema WGS84, UTM 19 Sur.

4.2.1 COLADA LONQUIMAY 5-1 (LQ5-1)

La Colada Lonquimay 5-1 (LQ5-1), ubicada en el lado norte del Volcán Lonquimay, es parte de la Unidad Lonquimay 5, y se encuentra sobre coladas anteriores de las unidades Lonquimay 2 y 4.

De acuerdo a observaciones en terreno y a imágenes satelitales, se ha determinado que esta colada se trata de una colada compuesta, que es posible dividir en dos unidades: LQ5-1a como la unidad superior y LQ5-1b como la unidad inferior (Figura 9 y Figura 10). En terreno, se puede observar que la Colada LQ5-1b aparece desde la base de la Colada LQ5-1a, lo que indicaría que se trata de una colada efímera de primer orden, de acuerdo a Calvari y Pinkerton (1998); y además, en el contacto entre ambas, se observan marcas de cizalle y bloques alzados (Figura 13d), lo que podría indicar que esta colada se habría generado como un nuevo brazo de la anterior. Junto con esto, los fragmentos de la Colada LQ5-1a presentan un aspecto similar a los de la Colada LQ5-1b; incluso, la corteza de los bloques de la Colada LQ5-1a se presenta muy rugosa, por lo que tendrían una menor madurez termal que los bloques de la Colada LQ5-1b, de acuerdo a Naranjo *et al.* (1992), lo que indicaría que estaban a una mayor temperatura al momento de detenerse; además, la Colada LQ5-1a es mucho más potente en el frente, lo que podría significar que material se detuvo producto de la resistencia de la corteza externa, pero el material siguió saliendo desde la fuente, acumulándose en esta parte durante un tiempo, hasta que habría sido expulsado para formar la Colada LQ5-1b.

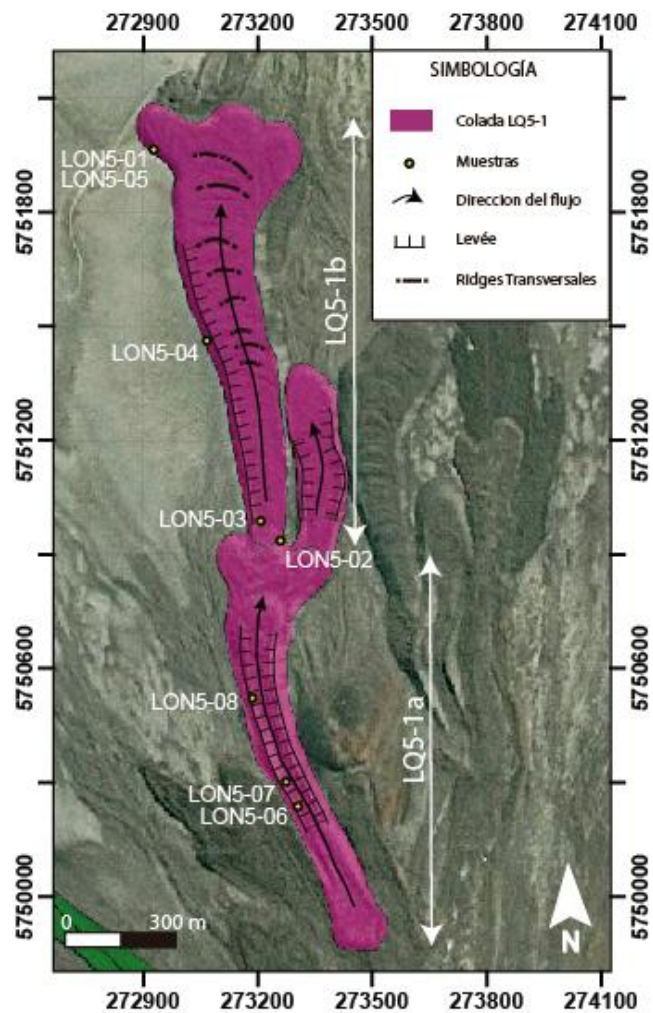


Figura 9: Ubicación de la Colada LQ5-1, la cual corresponde a un flujo compuesto por dos unidades: LQ5-1a es la unidad superior, y desde su base se habría generado la unidad inferior LQ5-1b. En el mapeo se indica la posición de los levées y de los ridges transversales que se observan en ella, además de la dirección del flujo. LON5-01 a LON5-08 corresponden a las muestras obtenidas desde esta colada de lava. Las coordenadas refieren al sistema WGS84, UTM 19 Sur.

Acorde a estas observaciones, las coladas se tratarán de forma separada, la Colada LQ5-1a proviene directamente de la fuente de emisión, y corresponde al flujo parental de la Colada LQ5-1b.

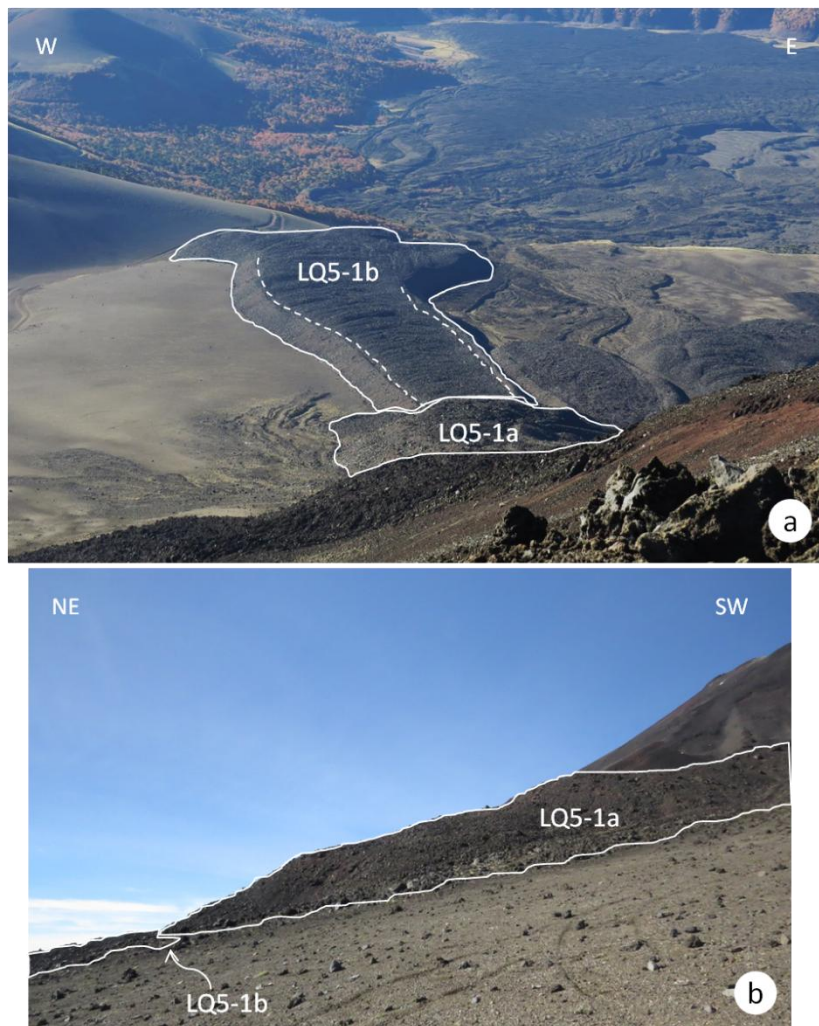


Figura 10: Imágenes de la Colada LQ5-1. Las líneas continuas indican límites de las coladas y las líneas discontinuas, límites de *levées*. (a) Vista de la colada, desde el Volcán Lonquimay. (b) Vista lateral, donde se observa la zona de dispersión hinchada de la Colada LQ5-1a.

- Unidad superior: Colada LQ5-1a

La unidad superior (LQ5-1a) de la Colada LQ5-1, se extiende desde un cono de piroclastos ubicado en el flanco del volcán, a los 2.400 m.s.n.m., hasta su frente en los 1.900 m.s.n.m., por una distancia aproximada de 1.100 m. Tiene un espesor que varía desde los ~30 m en el frente, a 10 m en la parte menos potente; el ancho promedio es de unos 200 m. El volumen estimado para esta colada es de $3,62 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$. La colada se encuentra sobre una superficie de pendiente casi constante, de alrededor de 20° .

La colada presenta una morfología de tipo aa-bloques, con su canal central y levées bien formados (Figura 11a), éstos levées parecen tener un centro macizo cubierto por bloques sueltos, que van entre 1 m a 10 cm, con la mayor parte entre 20-30 cm. Estos bloques presentan cortezas rugosas y brechozas e interior macizo (Figura 11b y c). Se reconocen, además, marcas de cizalle, y algunas rocas se muestran rojizas, debido al óxido.

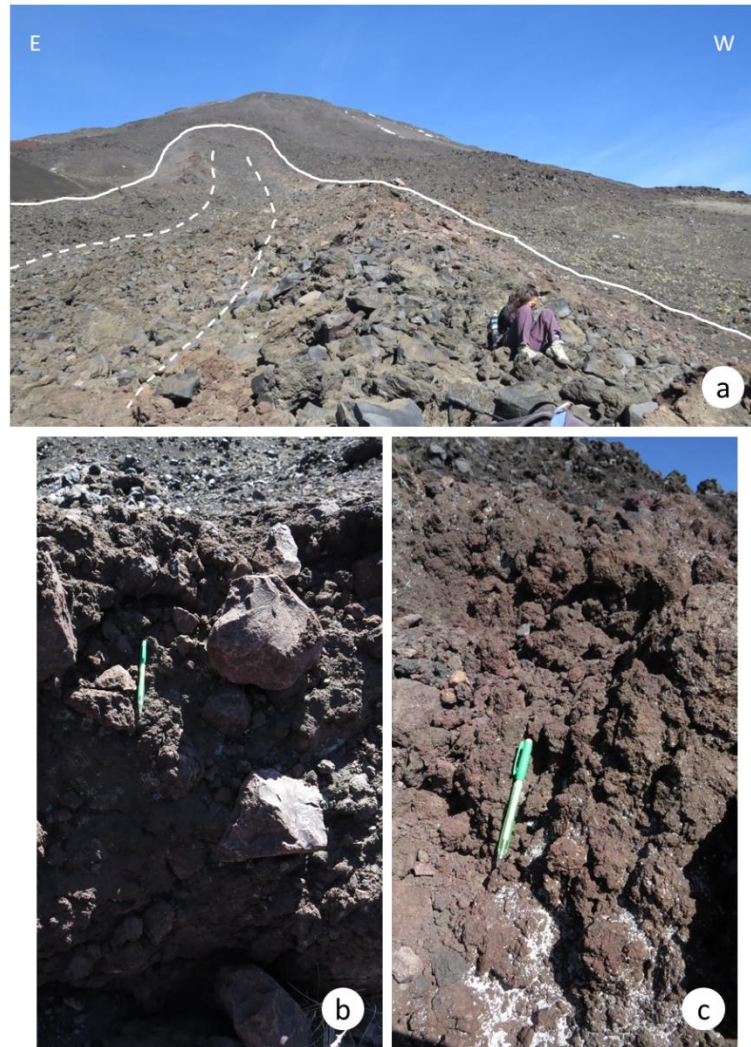


Figura 11: Imágenes de la Colada LQ5-1a. (a) Vista hacia la fuente de emisión. Las líneas continuas indican límites de la colada y las líneas discontinuas, límites del levée. (b) y (c) Textura brechoza superficial, se puede notar la variación de tamaños de los bloques que la componen.

En las muestras de mano obtenidas de la parte maciza de la roca, se puede observar que se trata de rocas porfídicas, donde la mayoría de los cristales son de

plagioclasa, y en menor proporción se observan minerales de tono verdoso. Luego, al microscopio (Figura 12^a) es posible distinguir que están compuestas por tres fases minerales: plagioclasa (15%), clinopiroxeno (~5%) y olivino (~1%). Además, presentan una masa fundamental de color negro, se observan vesículas <0,5 mm (10%), e incluso en algunas partes, no se distinguen. En algunas zonas de los cortes se observa textura traquítica, glomeroporfírica (cúmulos de plagioclasa y clinopiroxeno), zonación en algunos fenocristales de plagioclasa y textura sieve en plagioclasa. Es importante notar que la masa fundamental está compuesta por microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno, evidenciando textura intergranular, con una muy baja cantidad de vidrio, lo cual solo es posible de observar en el microscopio electrónico (Figura 12b).

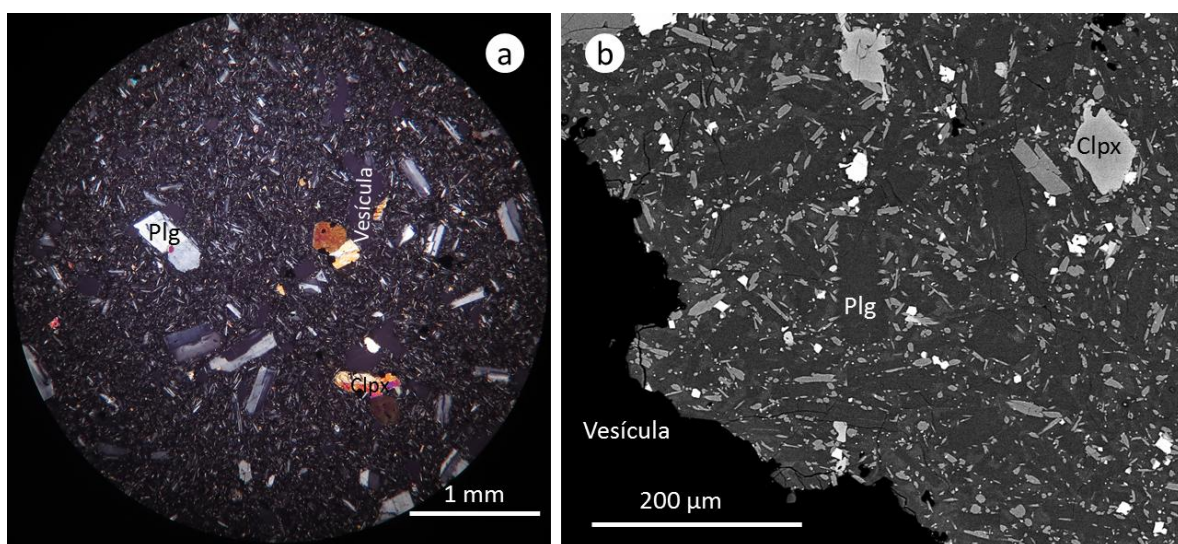


Figura 12: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra LON5-08). (a) Fotomicrografía en microscopio óptico, donde se observan los fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno, contenidos en una masa fundamental de textura intergranular. (b) Fotomicrografía en microscopio electrónico, donde se presenta en detalle la composición de la masa fundamental, compuesta de microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno.

- Unidad inferior: Colada LQ5-1b

La unidad inferior (LQ5-1b) de la Colada LQ5-1, corresponde a un flujo principalmente de bloques, con una potencia aproximada de 20 m en el frente y que va disminuyendo hacia su origen, en el frente de la Colada LQ5-1a, hasta unos 11 m (Figura 13b), y se extiende por 1.100 m aproximadamente desde la colada superior,

desde los 1.900 a los 1.750 m.s.n.m. El ancho de la colada varía: en su frente es mucho más ancha (~435 m, zona de dispersión) que en la zona de canal estable (~150 m). Su volumen estimado es de $2,44 \cdot 10^{-3} \text{ km}^3$. La colada descansa sobre un terreno de pendiente variable, desde 15° en su origen, a unos 7° en el frente.

La colada posee un canal central y *levées* bien formados a ambos costados de la colada (Figura 13a), además, en imágenes satelitales se observan numerosos *ridges* transversales a la dirección de avance de la lava, separados entre ellos por entre 30-40 m. Los bloques que se encuentran en los *levées*, varían de entre 10 cm y 2 m, con mayor parte de ellos entre 20 y 60 cm, y presentan una corteza rugosa (más típica de lava aa) muy fina, de hasta 3 cm aproximadamente y su interior es macizo (Figura 13c).



Figura 13: Imágenes de la Colada LQ5-1b. (a) Vista del *levée* y canal central. Las líneas discontinuas indican límites del *levée* (b) Vista lateral del *levée*, se observa la morfología de bloques de la colada. (c) Bloque con textura brechoza y centro macizo. (d) Rocas con textura lajada, en el contacto de ambas unidades. (e) Marcas de cizalle en un bloque de la colada.

En muestras de mano se observa que las rocas están compuestas por fenocristales en una masa fundamental, de color negro, evidenciando la textura

porfídica, típica de lavas. Al microscopio óptico, ha sido posible determinar que los fenocristales corresponden a plagioclasa (15%), clinopiroxenos (5%) y olivinos (<1%), inmersos en una masa fundamental (75%). En observaciones en cortes transparente, se pueden observar otras texturas, como son texturas sieve y zonación en fenocristales de plagioclasa, textura glomeroporfírica con plagioclasas y clinopiroxenos, y en algunas zonas de los cortes, textura traquítica. La masa fundamental está compuesta por plagioclasas y clinopiroxenos (textura intergranular), inmersos en vidrio, que solo es observable en microscopio electrónico (Figura 14b), dado que se encuentra en muy pequeña cantidad. La zona maciza de las rocas, no presenta gran cantidad de vesículas (5%), muy finas (<0,5 mm), mientras que las cortezas de los bloques presentan más cantidad (10%) y de mayor tamaño (hasta 3 cm) y alargadas (Figura 14a). La principal diferencia entre las muestras de la parte maciza y de la corteza de los bloques, es la cantidad de vesículas y la matriz oxidada. De acuerdo a Moreno *et al.* (2012) y Polanco (2010), estas rocas poseen química de andesita-basáltica (54-56% SiO₂).

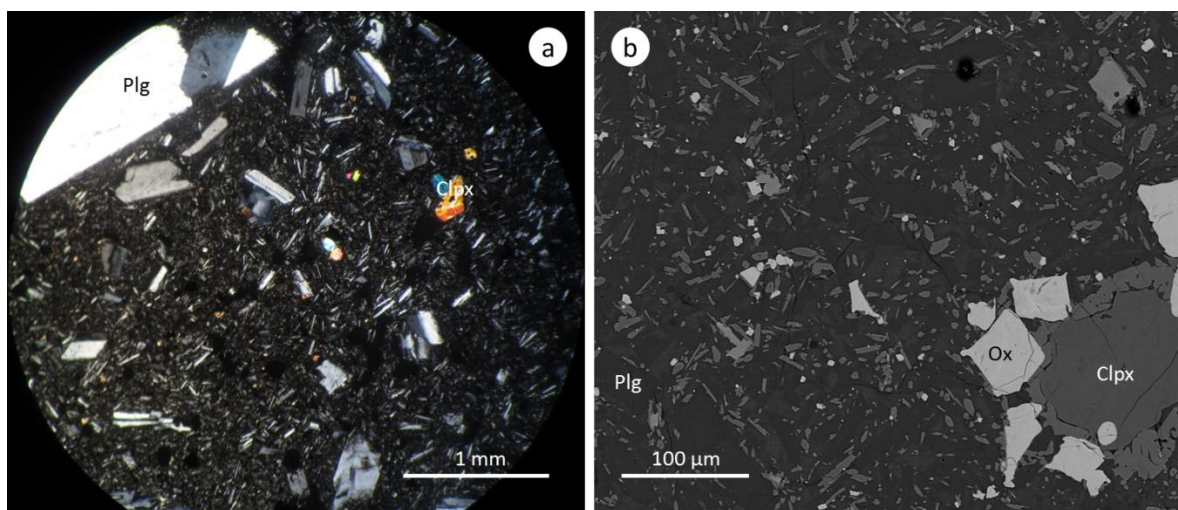


Figura 14: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra LON5-01). (a) Fotomicrografía en microscopio óptico, donde se observan los fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno, contenidos en una masa fundamental de textura intergranular. (b) Fotomicrografía en microscopio electrónico, donde se presenta en detalle la composición de la masa fundamental, compuesta de microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno.

4.2.2 COLADA LONQUIMAY 5-2

La Colada Lonquimay 5-2 (LQ5-2), proviene del cráter principal del volcán (2.730 m.s.n.m.), baja por la ladera norte del volcán, hasta los 2.015 m.s.n.m., y es parte de la Unidad Lonquimay 5 (Figura 15). Tiene un largo aproximado de 1.300 m. Se encuentra cubierta parcialmente por otra colada, de la misma unidad. La Colada LQ5-2, presenta un ancho casi constante, de unos 80 m, pero en el frente, en la zona de dispersión, dobla su ancho; y posee una potencia variable, desde 0,5 m en la zona media a 20 m en el frente. La pendiente de esta zona del Volcán Lonquimay es de aproximadamente 30°, en todo el largo que recorre esta colada, aunque en el frente, este valor disminuye. Su volumen aproximado es de unos $4,37 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$.

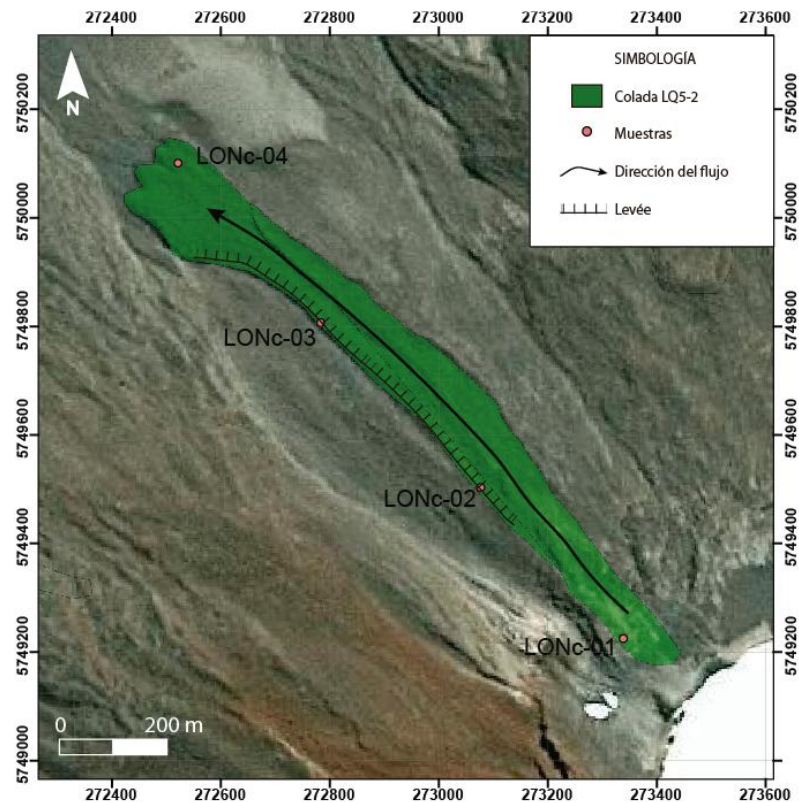


Figura 15: Ubicación de Colada LQ5-2. Se indica la posición de los levés de la colada, junto con la posición de las muestras obtenidas (LON5c-01 a LON5c-04). Las coordenadas refieren al sistema WGS84, UTM 19 Sur.

Se trata de una colada de tipo aa-bloques, que conserva bien su levée del lado occidental (Figura 16a), de interior macizo y superficie cubierta por bloques, de entre

50-10 cm, los cuales presentan una corteza brechoza de unos 1-2 cm de ancho, con interior macizo (Figura 16b).

En las muestras de mano, se aprecia que la roca presenta una textura porfírica, con vesículas redondeadas (20% en la parte maciza y hasta 40% en la corteza de los bloques). En los cortes transparentes (Figura 17a) se pueden identificar fenocristales de plagioclasa (20%), olivino (5%) y clinopiroxeno (~2%), todos inmersos en una masa fundamental de color negro, compuesto principalmente por plagioclasas y clinopiroxenos, casi sin vidrio, de acuerdo a las imágenes del microscopio electrónico (Figura 17b). Además, se aprecian las típicas texturas encontradas en lavas: traquítica (en algunas zonas), glomeroporfírica en plagioclasas y olivinos, zonación y sieve (en plagioclasas), e intergranular (en toda la masa fundamental).

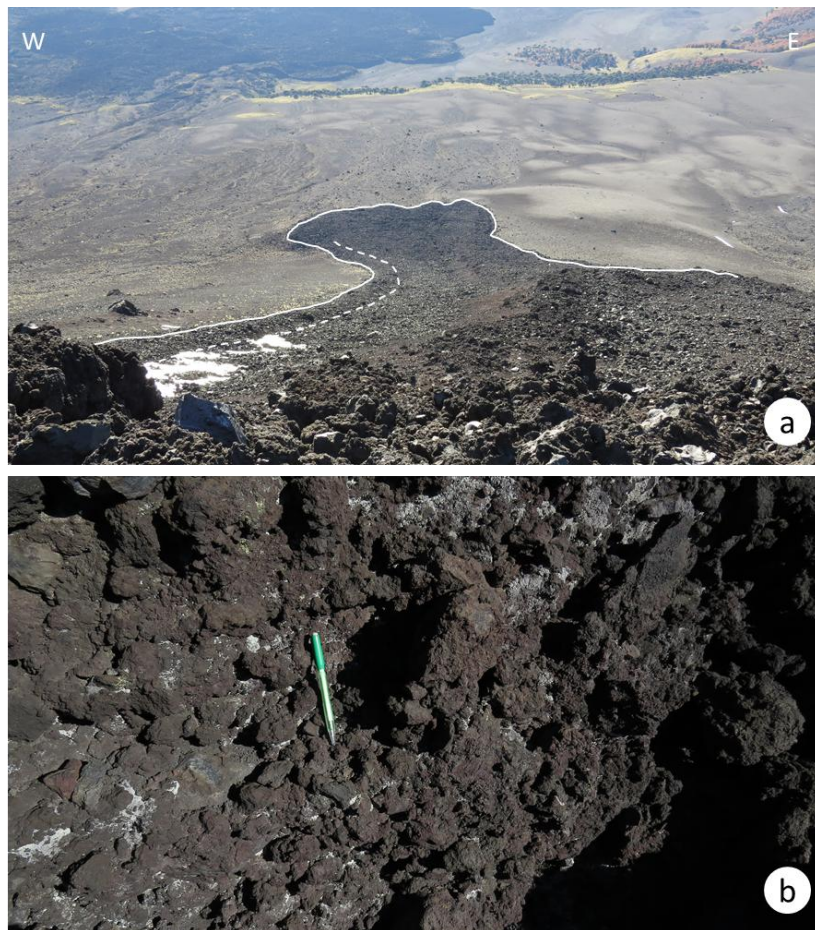


Figura 16: Imágenes de la Colada LQ5-2, (a) Vista hacia la colada. Las líneas continuas indican límites de la colada y las líneas discontinuas, límites del *levée*. (b) Textura brechoza superficial de un bloque de la colada

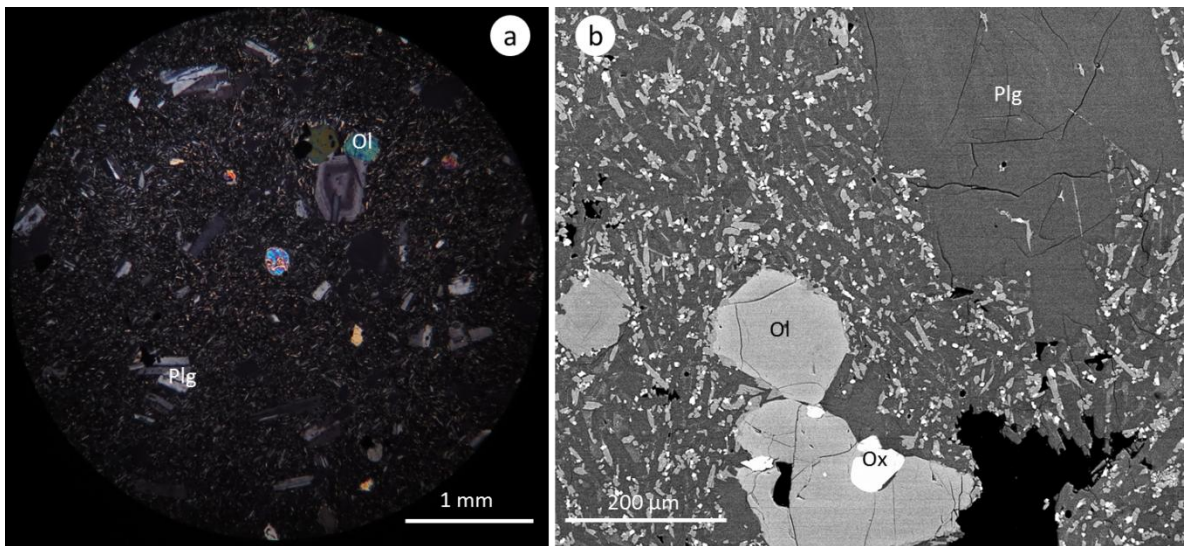


Figura 17: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra LON5c-04). (a) Fotomicrografía en microscopio óptico, donde se observan los fenocristales de plagioclasa y olivino, contenidos en una masa fundamental de textura intergranular. (b) Fotomicrografía en microscopio electrónico, donde se presenta en detalle la composición de la masa fundamental, compuesta de microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno.

4.2.3 COLADA LONQUIMAY 4 (LQ4)

La Colada Lonquimay 4 (LQ4) es parte de la Unidad Lonquimay 4, y baja por el flanco norte del Volcán Lonquimay, desde los 2.300 m.s.n.m aproximadamente, y recorre una distancia aproximada de 4 km. El frente de la colada (1.560 m.s.n.m.), se emplaza en un amplio valle cerrado con una pendiente muy baja, ubicado en el lado norte del Volcán Lonquimay, donde se encuentra un extenso campo de lavas (Figura 18 y Figura 19a).

La colada presenta importantes cambios de ancho a lo largo de todo su recorrido, varía desde 47 m en su parte proximal a la fuente, a 180 m en la zona media, y hasta 1.000 m en la zona de dispersión, cercana a su frente. De la misma forma, su altura es bastante variable, en la parte proximal alcanza unos 10 m, luego disminuye en la zona media, hasta un par de metros, y su parte frontal aumenta hasta 15 m. Esto podría estar ligado, en parte, a las variaciones observadas en la pendiente de la zona:

cercana al cráter varía entre 23-33°, en la zona media es de ~15° y en el frente baja a ~3-5°. Su volumen estimado es de $4,42 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$.

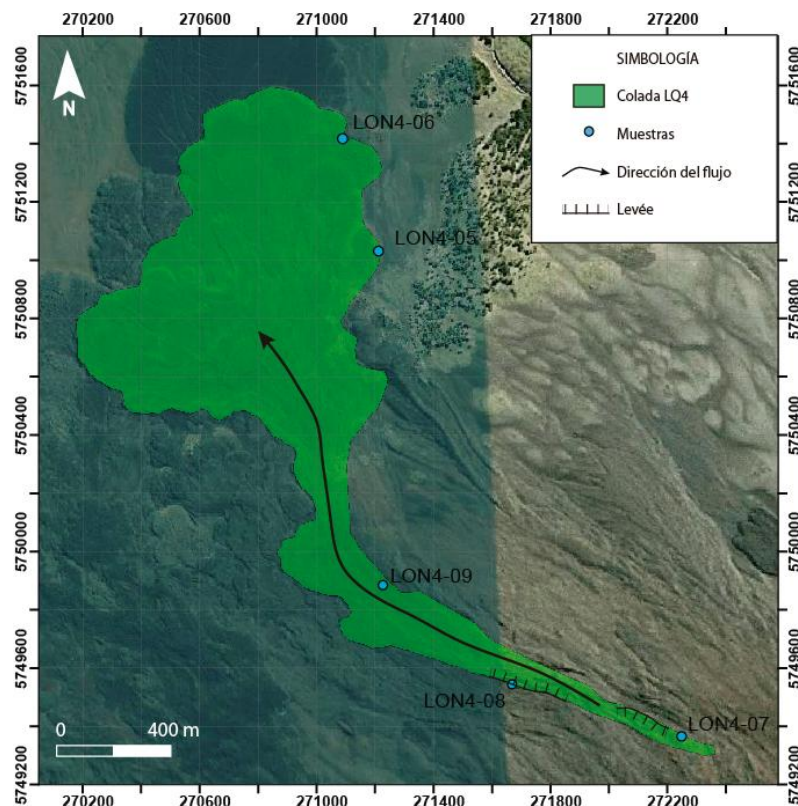


Figura 18: Ubicación de la Colada LQ4. En la imagen se indica la posición de los levées de la colada, junto con la posición de las muestras obtenidas (LON4-05 a LON4-09). Las coordenadas refieren al sistema WGS84, UTM 19 Sur.

Morfológicamente corresponde a una colada de tipo aa-bloques (Figura 19b), a la cual se le reconocen parcialmente los levées: con mayor facilidad en la zona más proximal a la fuente, en la zona central se pierden y reaparecen hacia el frente. Los bloques presentes, van desde 1,5 m a 10 cm de diámetro, con la mayoría en los 30 cm, y poseen cortezas brechozas, compuestas por clastos rugosos, pero redondeados, de aproximadamente 1 cm, el interior de estos bloques es macizo (Figura 19 c y e). Se encuentran marcas de cizalle y clastos rojizos (Figura 19d). Otro rasgo presente, son protuberancias en la zona de dispersión, de 1-2 m de altura, con cortezas brechozas, como se aprecia en la Figura 19f.



Figura 19: Imágenes de la Colada LQ4. (a) Vista del valle de lavas, con las líneas continuas marcando los límites de la colada. (b) Levée oriental. (c) Textura rugosa superficial de un bloque de la colada. (d) Marcas de cizalle en un bloque. (e) Corteza brechoza. (f) Protuberancias en la zona de dispersión.

De acuerdo a lo observado en las muestras, se reconoce una textura porfírica marcada, y en los cortes transparentes (Figura 20a) se pueden identificar como fenocristales: plagioclasa (10%), olivino (5%) y piroxeno (<1%), con un 30% de vesículas en la corteza de los bloques y un 10% en las partes macizas, semiredondeadas. Además, se pueden observar texturas como traquítica en algunas zonas del corte, glomeroporfírica, zonación en fenocristales de plagioclasa, y textura intergranular, solo apreciable en el microscopio electrónico (Figura 20b). Es importante notar que en estas muestras se observan zonas más oscuras, y de mayor vesicularidad, que podrían estar relacionadas a una autobrecha, producto de la entrada de roca enfriada de la corteza a la zona que todavía se encontraba plástica.

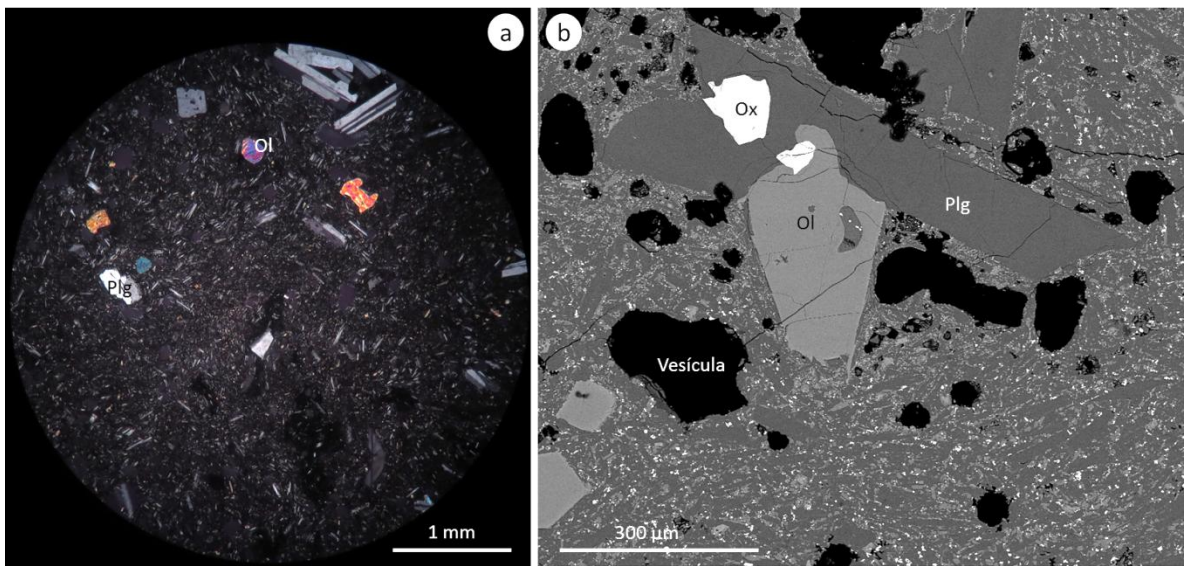


Figura 20: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra LON4-07a). (a) Fotomicrografía en microscopio óptico, donde se observan los fenocristales de plagioclasa y olivino, contenidos en una masa fundamental de textura intergranular. (b) Fotomicrografía en microscopio electrónico, donde se presenta en detalle la composición de la masa fundamental, compuesta de microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno.

4.2.4 COLADA LONQUIMAY 3 (LQ3)

La Colada Lonquimay 3 (LQ3) corresponde a flujos de la Unidad Lonquimay 3, que bajan por el flanco sur del Volcán Lonquimay (Figura 21). Esta colada alcanza distancias de hasta 9 km, llegando incluso hasta el camino pavimentado que une Curacautín y Malalcahuello (Ruta R-181). Las rocas de esta unidad se encuentran mayormente cubiertas por vegetación, no obstante, fue posible obtener muestras del frente de la colada, donde ésta se encuentra cortada por el camino, por lo mismo, las rocas están frescas, y además, se reconoce bastante bien su estructura interna.

Para esta colada ha sido complicado determinar sus dimensiones, producto de su erosión, de la vegetación que la cubre y por productos volcánicos posteriores que pueden haber cubierto parte de su extensión, incluso, la pendiente que existía en el sector cuando se generó la colada tampoco se aprecia, y ésta ha sido aproximada a 5° promedio. Así, las dimensiones de la colada han sido estimadas de acuerdo a los valles observados en el sector, de esta manera, el ancho promedio sería de unos 850 m, pero

que en su zona de dispersión aumenta a 1.550 m. La potencia encontrada en el frente es de unos 10 m. El volumen aproximado para la colada es de unos $1,45 \cdot 10^{-1} \text{ km}^3$.

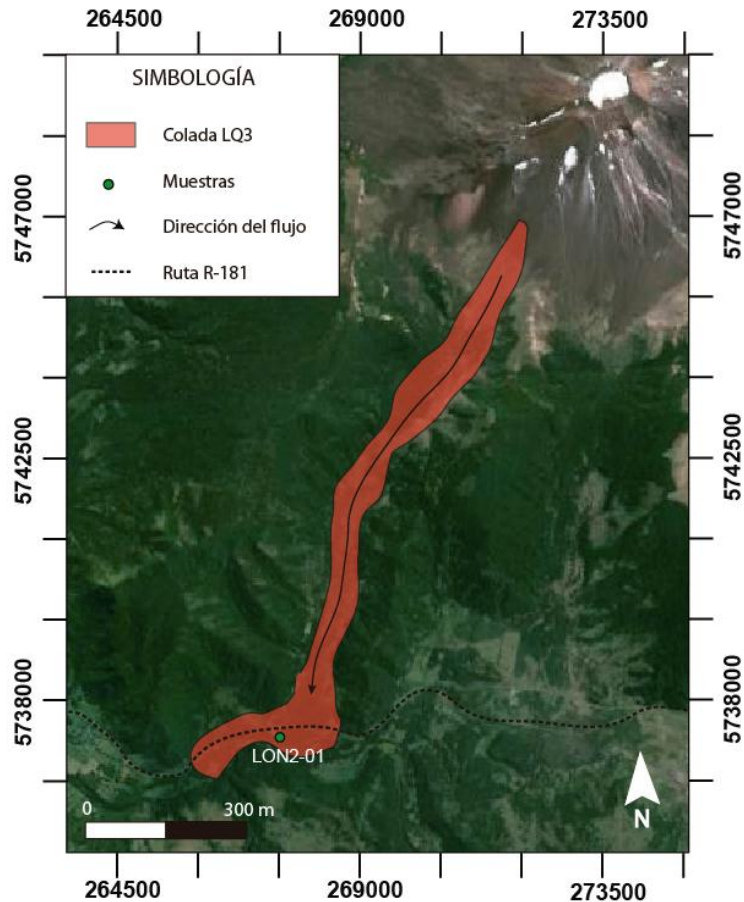


Figura 21: Ubicación de la Colada LQ3. En la imagen se aprecia la gran extensión de la colada, de hasta 9 km, cortando la ruta R-181 indicada con líneas punteadas. LON2-01 es la muestra obtenida desde el frente de la colada. Las coordenadas refieren al sistema WGS-84, UTM 19 sur.

En los afloramientos al lado del camino (Figura 22a) se observa que la morfología principal de esta colada es de tipo aa. Características como canal central y *levée*, o *ridges* transversales, no se reconocen debido a la erosión y gran cantidad de vegetación que la cubre. En el frente, se distingue que los bloques que conforman la colada presentan corteza brechoza e interior macizo, incluso, en algunos se encuentran marcas de cizalle (Figura 22 b y c).



Figura 22: Detalles Colada LQ3. (a) Vista del afloramiento al lado la ruta R-181, se observa la alta vegetación que cubre a la colada. (b) Detalle del centro macizo de la colada. (c) Textura brechoza y centro macizo de un bloque.

Las muestras obtenidas presentan la típica textura porfírica de lavas, con fenocristales de plagioclasa observables a simple vista, inmersos en una masa fundamental de color negro. Sin embargo, tanto en microscopio óptico como en electrónico, se reconocen mas familias cristalinias: estas rocas se componen de plagioclasas (20%), olivinos (5%) y clinopiroxenos (<1%), y se observan algunas texturas como glameroporfírica en plagioclasa y clinopiroxeno, textura sieve en fenocristales de plagioclasa, traquítica en algunas zonas de los cortes transparentes, e intergranular en la masa fundamental (solo reconocible en microscopio electrónico, Figura 30b). Las rocas presentan baja cantidad de vesículas (<5%), de tamaño fino (~0,5 mm) (Figura 23).

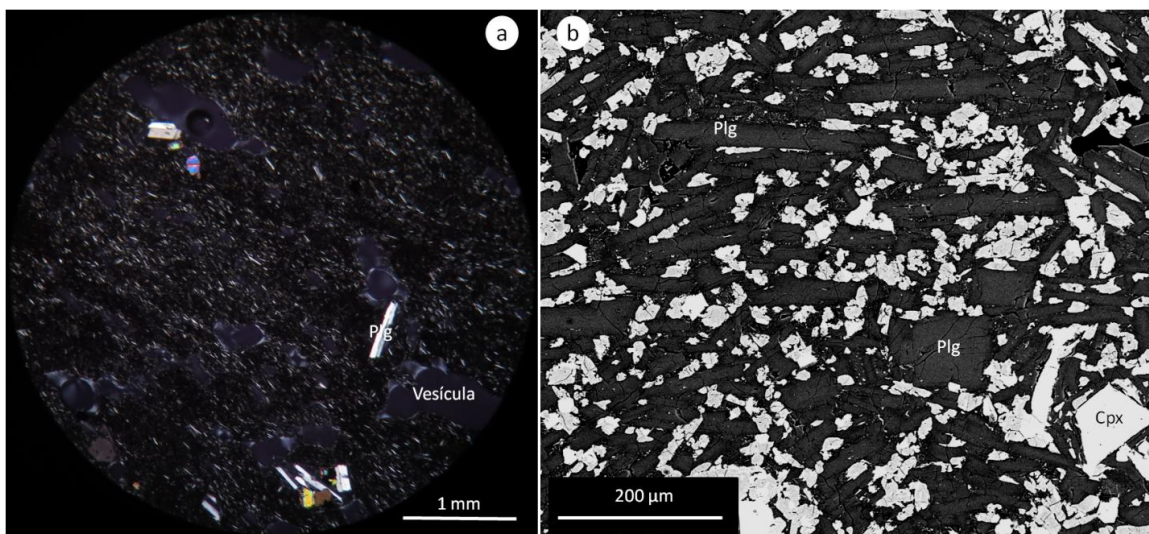


Figura 23: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra LON2-01). (a) Fotomicrografía en microscopio óptico, donde se observan los fenocristales de plagioclasa y olivino, contenidos en una masa fundamental de textura intergranular. (b) Fotomicrografía en microscopio electrónico, donde se presenta en detalle la composición de la masa fundamental, compuesta de microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno.

4.2.5 COLADA CORDÓN FISURAL ORIENTAL 1 (CFO1)

La Colada Cordón Fisural Oriental 1 (CFO1) es parte de la Unidad “Conos, domos, lavas y cráteres de explosión” (Hfoce en la Figura 2) y corresponde a un flujo de lava que alcanzó al menos 2 km de largo, desde un cono del Cordón Fisural Oriental (Figura 24). Se encuentra cubierta, casi en su totalidad por la colada “Lava de Bloques Diamante”, y por la colada del Volcán Navidad, de 1988-89. Sin embargo, se puede reconocer parte de ella.

La colada en estudio se extendió al menos por 1.700 m, bajó por una pendiente alta en un principio, de unos 18°, y luego por una pendiente menos importante (~9°). El ancho no es muy variable en casi todo su largo, se mantiene alrededor de los 130 m, y luego aumenta a 254 m en su frente, y la altura del *levée* varía entre 47 y 22 m. Es importante notar la influencia que puede haber tenido el cono de piroclastos llamado Volcán Rojizo, que se comportó como un obstáculo al avance de la lava, por lo que su *levée* oriental se formó sobre él (Figura 25 a y b), y generó que la diferencia de altura entre el *levée* y el canal central fuera importante.

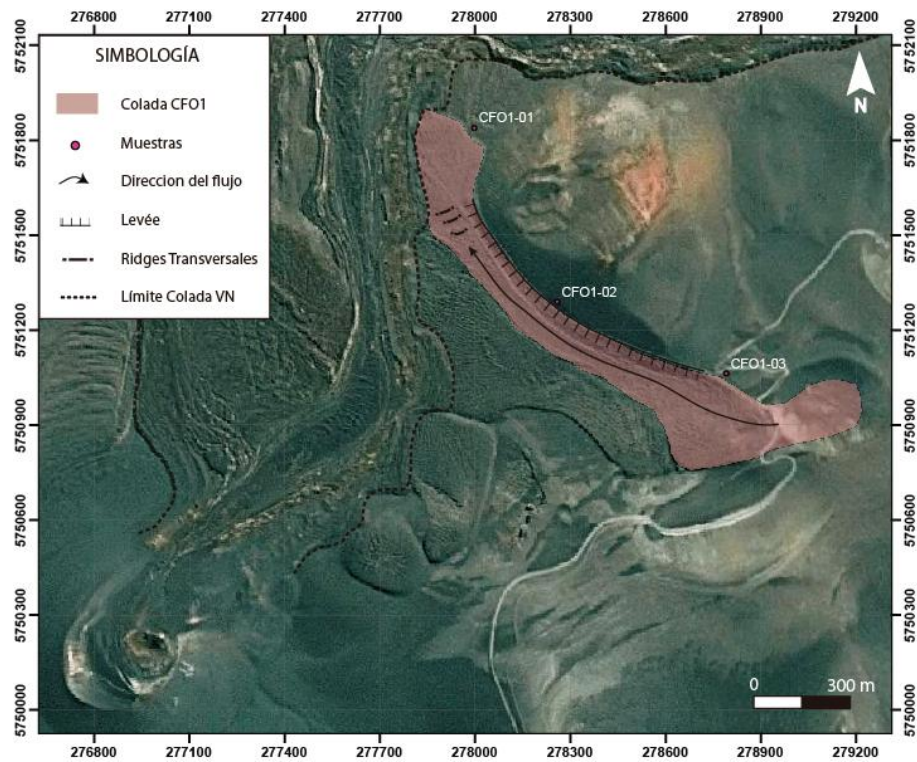


Figura 24: Ubicación de la Colada CFO1. Las líneas punteadas limitan a la colada del Volcán Navidad. En la imagen se indica la posición de los *levées* y *ridges* transversales de la colada. CFO1-01 a CFO1-03 corresponden a las muestras obtenidas desde esta colada. Las coordenadas refieren al sistema WGS84, UTM 19 Sur.

Esta colada corresponde una lava de tipo aa-bloques, a la que se le reconoce el *levée* oriental y el canal central. Se reconocen *ridges* transversales en todo lo largo del canal central, que se hallan separados entre ellos por aproximadamente 5-15 m. Sobre el *levée* se reconocen protuberancias, de 1-2 m, y bloques que alcanzan tamaños desde 10 cm a 4 m, que presentan una corteza rugosa, con algunos sectores con bloques lajados (Figura 25e), y con interior macizo. Muchos de estos bloques presentan marcas de cizalle (Figura 25d), y muchos también, presentan enclaves, que parecen ser de otras lavas o intrusivo hipabisal (Figura 25c).

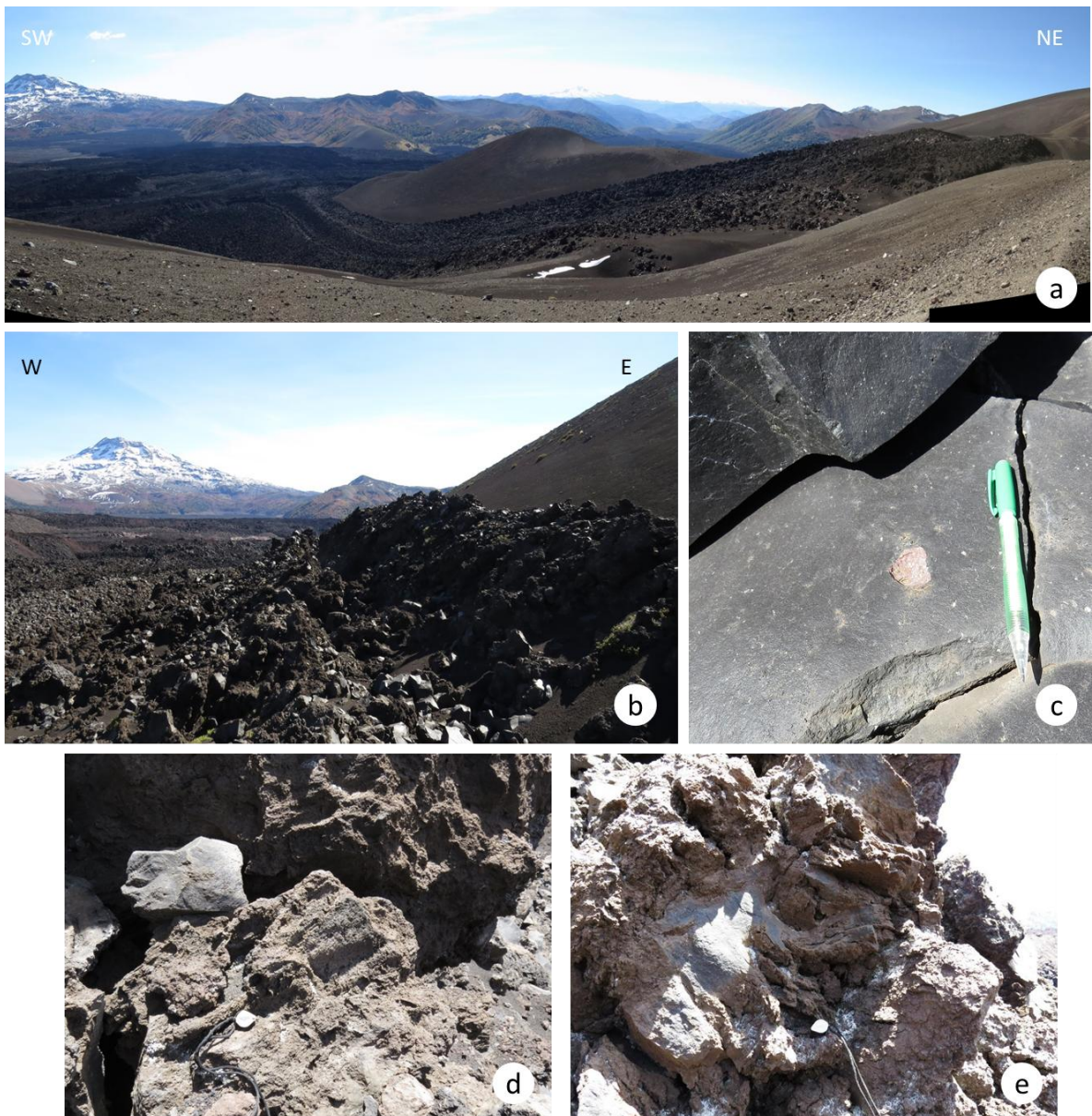


Figura 25: Imágenes de la Colada CFO1. (a) Vista de la colada y del Volcán Rojizo, inmediato. (b) Levée oriental, se observa cómo está posado sobre el Volcán Rojizo. (c) Detalle de un bloque con enclave. (d) Marcas de cizalle en un bloque. (e) Corteza lajada.

Las muestras presentan textura porfírica, como se observa en la Figura 26a, con fenocristales de plagioclasa (5%), olivino (1%), y clinopiroxeno (<1%), con vesículas (<2% en partes macizas y 5% en la corteza de los bloques) muy pequeñas, <0,5 mm, y redondeadas. La masa fundamental, que representa más del 90% de las rocas, está compuesta por microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno, en una textura intergranular, casi sin presencia de vidrio, observable solo en el microscopio electrónico

(Figura 26b). Dada la baja cantidad de fenocristales presentes en las muestras, no se reconocen texturas aglomeradas ni de orientación de cristales, solo se ve en algunos fenocristales de plagioclasa. Esta colada tiene una composición andesítica-dacítica (62-63% en peso de sílice) (Polanco, 2010).

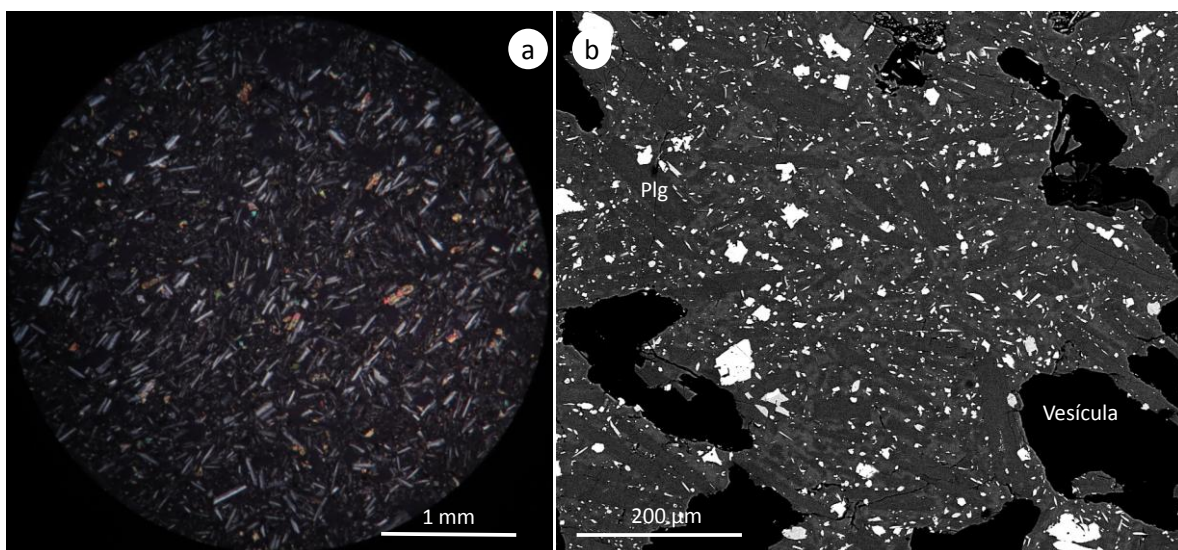


Figura 26: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra CFO1-03a). (a) Fotomicrografía en microscopio óptico, donde se ve la baja cantidad de fenocristales y la masa fundamental de textura intergranular. (b) Fotomicrografía en microscopio electrónico, donde se presenta en detalle la composición de la masa fundamental, compuesta de microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno

4.2.6 COLADA CORDÓN FISURAL ORIENTAL 2 (CFO2)

La “Lava de Bloques Río Lolco” del Cordón Fisural Oriental (Hforl en la Figura 2), corresponderá a la Colada Cordón Fisural Oriental 2 (CFO2) en este trabajo. Alcanzó aproximadamente 5 km de largo, a lo largo del Valle Lolco, desde los 1.670 a 1.574 m.s.n.m., por donde posteriormente también pasó la colada del Volcán Navidad, que cubre el borde izquierdo de la Colada CFO2. La superficie en la que descansa esta colada, tiene una pendiente casi constante, de unos 6-3°, solo en su parte proximal hay una alta pendiente, de unos 30°, por la cual baja inmediatamente después del cráter (Figura 28b). El ancho de la colada es casi constante, de entre 1.100 a 1.200 m, aunque cercana al cráter es muy angosta, de tan solo 120 m. Debido a estas diferencias en la pendiente, es que la altura de la colada cercana al cráter es muy poca,

de unos 5 m, mientras que en el valle, alcanza alturas de hasta 45 m. Así, el volumen estimado para esta colada es de $1,44 \cdot 10^{-1} \text{ km}^3$.

Para el estudio de esta colada se utilizarán imágenes aéreas, del año 1983, obtenidas del Servicio Aerofotogramétrico de la FACH, en las cuales se aprecia la extensión original de la colada, antes de ser cubierta posteriormente por la erupción del Volcán Navidad (Figura 24a).

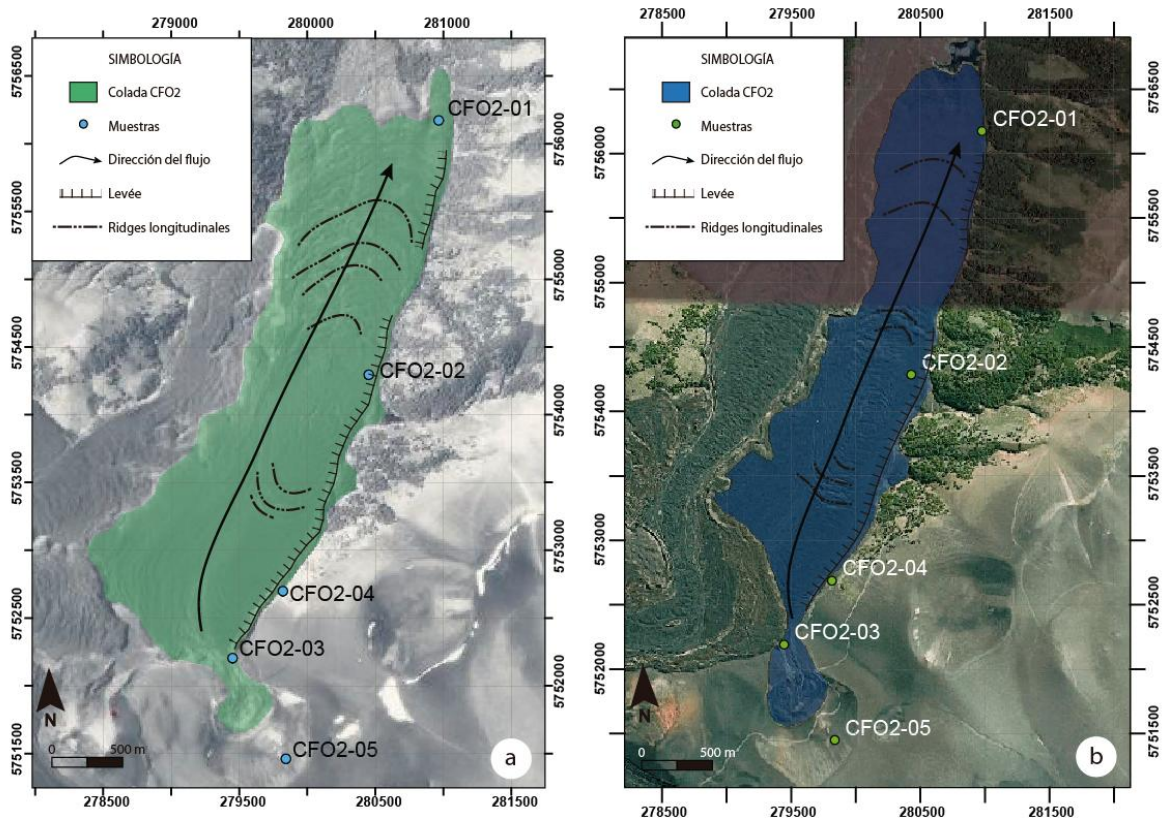


Figura 27: Ubicación de la Colada CFO2. (a) Imagen aérea de 1983, donde se aprecia la extensión original de la colada. (b) Imagen satelital actual, donde se puede observar la fracción de la colada que se encuentra actualmente expuesta. En ambas imágenes, se indican los *levées* y los *ridges* transversales del flujo. CFO2-01 a CFO2-05 corresponden a las muestras obtenidas desde esta colada. Las coordenadas refieren al sistema WGS-84, UTM 19 sur.

De acuerdo a las imágenes aéreas, la colada durante su movimiento habría chocado con una colada anterior, por lo que el *levée* izquierdo no se distingue bien. El *levée* derecho, en cambio, se encuentra muy bien conservado, como se aprecia en la Figura 28a, aunque en la zona central, desaparece por unos 200 m, probablemente

debido a la generación de *ridges* transversales, que podrían haber cambiado las condiciones para su formación. Estos *ridges* se encuentran separados entre ellos por 10-50 m y son convexos al cráter. En la zona más cercana a la fuente de emisión, también se observan *ridges* transversales, pero son cóncavos al cráter, y están separados entre ellos por 15-25 m. Asimismo, se observan algunas protuberancias que alcanzan hasta 3 metros de altura, en todo el largo de la colada.



Figura 28: Imágenes de la Colada CFO2. Las líneas continuas indican límites de la colada y las líneas puntuadas, límites del *levée*. (a) Vista a la Colada CFO2, con el *levée* sur bien formado. Se observa la colada del Volcán Navidad sobre ella. (b) Vista hacia el cráter, se puede notar la alta pendiente de esta zona.

Esta colada posee una morfología de tipo bloques-aa. Los bloques que conforman el *levée* presentan un rango de tamaños de entre 10 cm a 4 m, y lucen cortezas de diferentes tipos: rugosa, brechoza y lajada (Figura 29c), encontrándose en las protuberancias la corteza brechoza y lajada, y en los bloques la rugosa; en todos los casos anteriores, presentan interior macizo. Además, en varias partes de la colada, se observan marcas de cizalle (Figura 29d). En la zona proximal al cráter, debido a la alta

pendiente, se habría formado un *levée* de tipo acrecionario (Sparks *et al.*, 1976), que se caracteriza por ser macizo, como se observa en la Figura 29b.

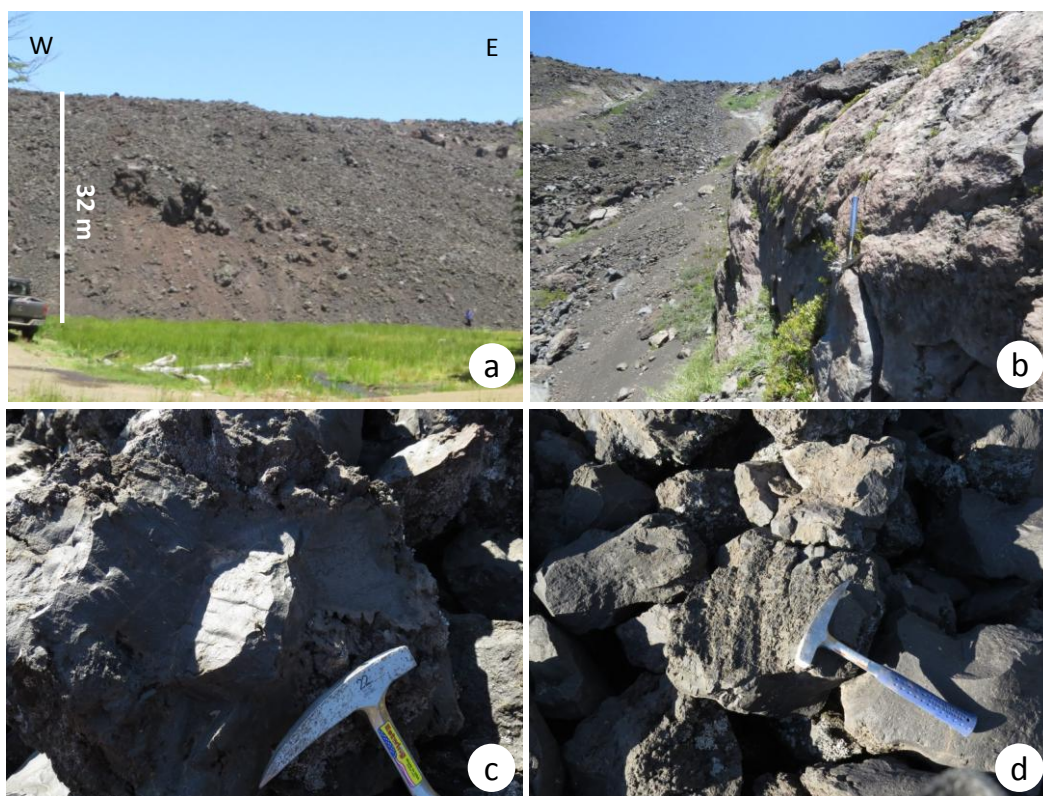


Figura 29: Detalles Colada CFO2. (a) Vista lateral del *levée* sur. (b) Vista hacia el cráter, se puede observar el *levée* occidental macizo. (c) Textura brechoza y centro macizo de un bloque. (d) Marcas de cizalle.

En las muestras de cortes transparente, como se aprecia en la Figura 30a, se puede ver que la roca está compuesta por fenocristales de plagioclasa (15%), olivino (5%) y clinopiroxenos (<1%), en una matriz negra, dando una textura porfírica. Las vesículas son escasas, solo un 10%. La masa fundamental está compuesta por microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno, inmersos en vidrio, solo apreciables en imágenes del microscopio electrónico (Figura 30b). Junto con esto, se observan texturas como traquítica en algunas zonas, sieve y zonaciones en fenocristales de plagioclasa, glomeroporfírica, e intergranular. De acuerdo a Polanco (2010), la colada está formada por rocas andesíticas (58% de SiO₂).

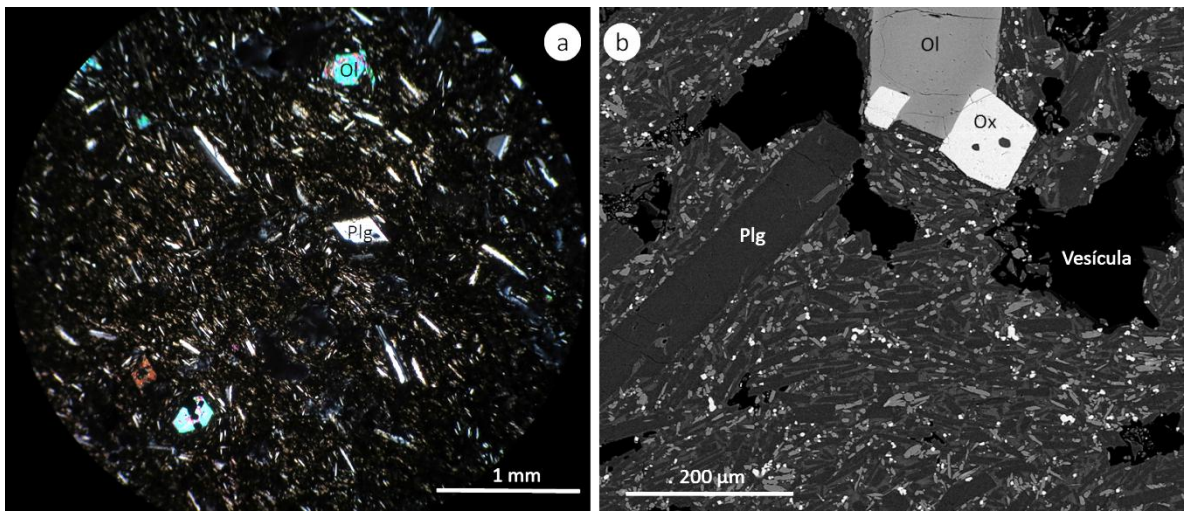


Figura 30: Ejemplos de la petrografía de la colada (muestra CFO2-01A). (a) Fotomicrografía en microscopio óptico, donde se observan los fenocristales de plagioclasa y olivino, contenidos en una masa fundamental de textura intergranular. (b) Fotomicrografía en microscopio electrónico, donde se presenta en detalle la composición de la masa fundamental, compuesta de microcristales de plagioclasa y clinopiroxeno.

CAPÍTULO V: OBTENCIÓN DE DATOS Y CÁLCULO DE PARÁMETROS

De acuerdo al modelo teórico descrito en el Capítulo III, para la obtención de los parámetros eruptivos de las erupciones que generaron las coladas en estudio, primero se necesita conocer las dimensiones de las coladas: ancho, largo, espesor, la pendiente del terreno, y la petrografía de ellas. Luego, para obtener los parámetros para la reología de tipo Herschel-Bulkley (consistencia de las coladas, *yield strength*, y parámetro n), es necesario conocer el contenido cristalino, empaquetamiento máximo, viscosidad del vidrio, temperatura y volátiles de las rocas que conforman los flujos. Finalmente, con estos datos, se podrá estimar la tasa eruptiva y velocidad de los eventos que generaron estos productos volcánicos.

5.1 DIMENSIONES DE LAS COLADAS

Las coladas estudiadas presentan dimensiones variadas, las cuales fueron determinadas tanto en terreno, como por medio de imágenes satelitales, tal como se presenta a continuación:

5.1.1 LARGO Y ANCHO DE COLADAS

El valor del largo y ancho de las coladas, se obtuvo a partir de imágenes satelitales. Dado que el ancho de las coladas varía a lo largo del flujo, se han medido varios datos a diferentes distancias de la fuente, con el fin de caracterizar detalladamente los cambios de este valor a lo largo de la colada. En la Figura 31, se muestran las relaciones entre el ancho de las coladas y su distancia a la fuente de emisión. En la figura también se puede notar que la mayoría de las coladas, el ancho del flujo aumenta en la zona de dispersión, con excepción de la Colada CFO2, que en un comienzo presenta un bajo ancho, pero luego se ensancha hasta los 1.100-1.200 m que le permite el valle del Río Lolco.

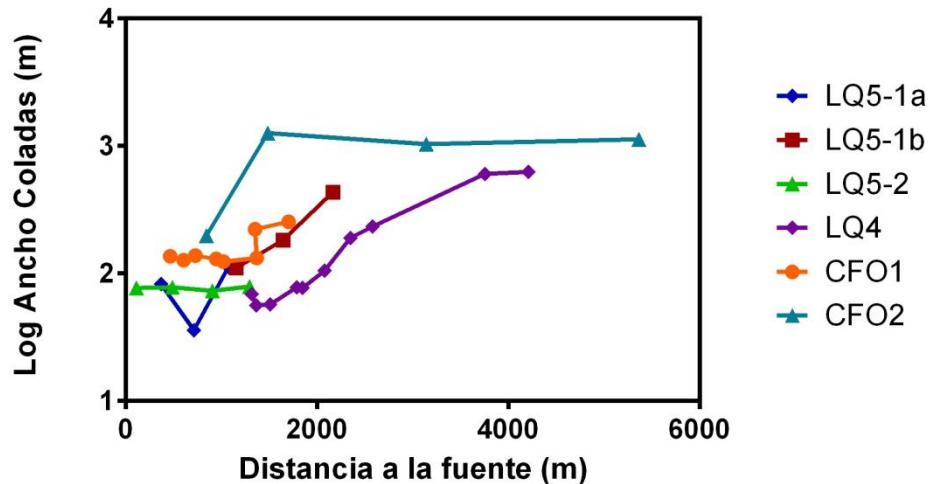


Figura 31: Anchos de colada vs Distancia a la fuente.

5.1.2 ESPESOR DE COLADAS

El espesor de las coladas se estimó mediante dos métodos: a partir de fotografías tomadas en terreno, con una escala humana, obtenidas de frente al costado de la colada, a una distancia tal que la deformación propia de la imagen fuera mínima. El segundo método consistió en que con la ayuda de un distanciómetro y de un inclinómetro, la altura de la colada se obtuvo por relaciones trigonométricas. Como se ejemplifica en la Figura 32, estas relaciones cambian de acuerdo a la posición desde la cual fueron tomados los datos, además, se realizaron correcciones para los casos donde la colada estuviera sobre una pendiente fuerte, $>20^\circ$ (Figura 32e).

Al igual que el caso del ancho de colada, los datos de espesor fueron tomados a múltiples distancias de la fuente, para ver las variaciones que tiene este valor a lo largo de las coladas. En la Figura 33 se puede observar como el espesor de las coladas cambia desde el centro de emisión hasta el frente de la colada, que al igual que en el caso anterior, aumenta en la zona de dispersión de los flujos.

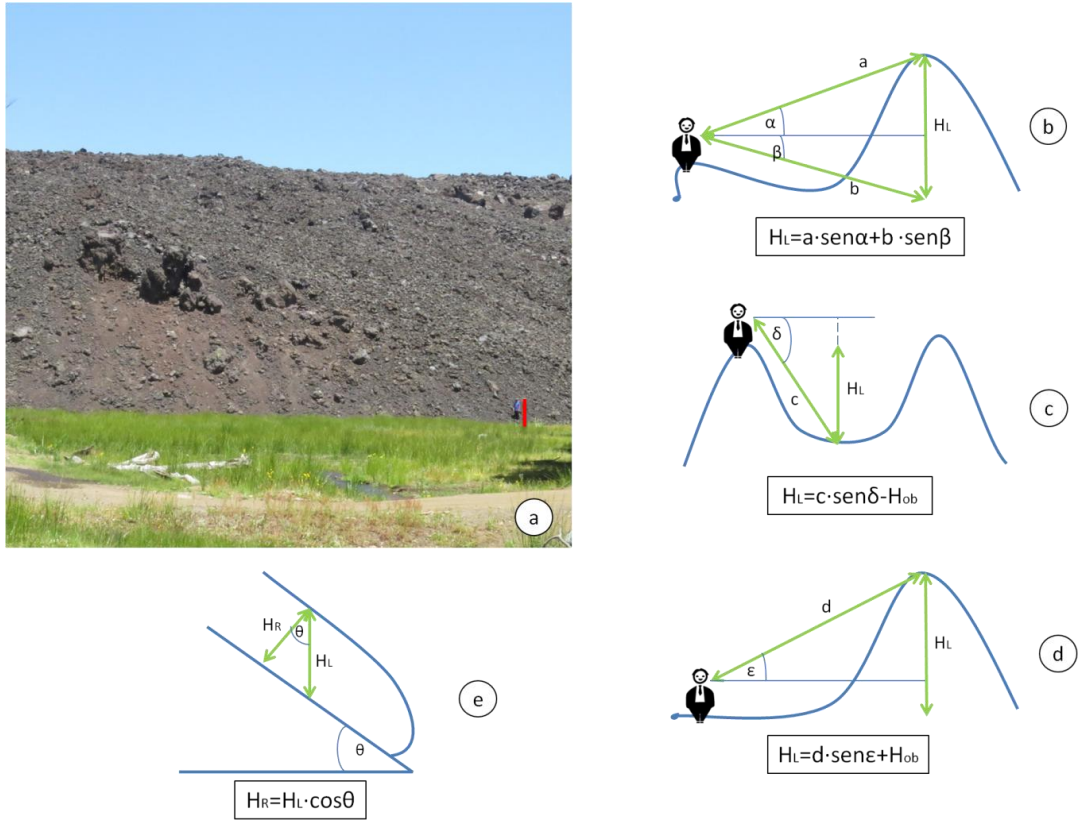


Figura 32: Cálculo de altura de *levée*. (a) Caso escala humana. (b) Caso observador sobre la base del *levée*. (c) Caso observador sobre uno de los *levées*, el valor obtenido será un mínimo. (d) Caso observador a la altura de la base del *levée*. (e) Corrección en caso de altas pendientes. Valores: a, b, c, d distancias; α , β , δ , ϵ , θ ángulos; H_{ob} : Altura observador; H_L : Altura del *levée*; H_R : Altura del *levée*, luego de la corrección de pendiente.

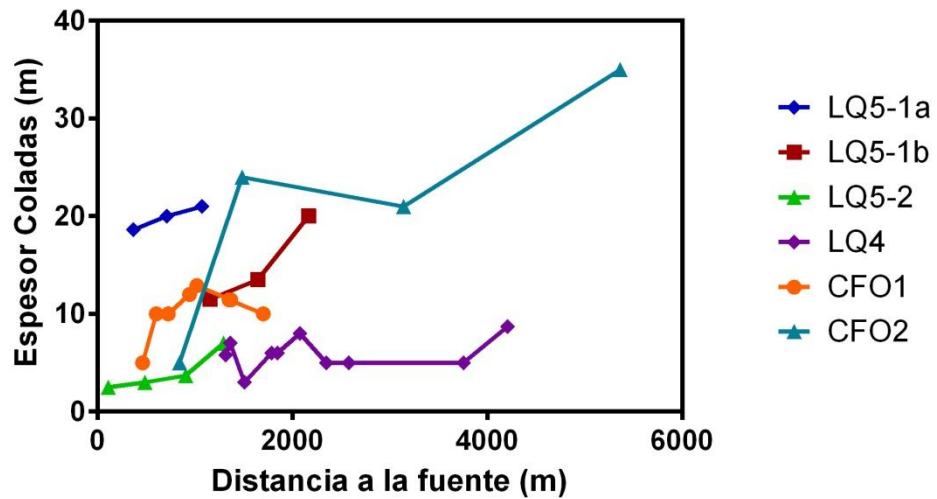


Figura 33: Espesores vs Distancia a la fuente.

5.1.3 VOLUMEN DE COLADAS

Para el cálculo del volumen de las coladas, se trabajará con la aproximación de que el volumen $V=LHW$, donde L, H y W corresponden al largo, alto y ancho de la colada, respectivamente. Si bien el volumen no es un valor que se utilizará para el cálculo de los parámetros eruptivos, será un dato importante en las comparaciones de las variaciones en el complejo volcánico.

De acuerdo a las observaciones de que tanto el ancho como el espesor de las coladas varían a lo largo de las coladas, es que para calcular el volumen de las lavas, se ha realizado una segmentación de éstas, dividiéndolas en cada lugar donde se tienen datos de altura y ancho. En consecuencia, el volumen total será la suma de los volúmenes parciales generados por la división. Al mismo tiempo, es importante notar que, debido a la morfología de las coladas, con *levées* y canal central, la altura no es constante en todo el ancho a una misma distancia de la fuente. Sin embargo, se ha decidido obviar esta característica, ya que para la mayoría de los casos, la diferencia de altura entre el *levée* y el canal central (de máximo 2 metros), sería despreciable en el cálculo del volumen.

Así, los volúmenes calculados para las coladas son:

Tabla 1: Volúmenes

Colada	Volumen (km³)
LQ5-1	$2,80 \cdot 10^{-02}$
LQ5-2	$4,37 \cdot 10^{-04}$
LQ4	$4,42 \cdot 10^{-02}$
LQ3	$1,45 \cdot 10^{-01}$
CFO1	$1,13 \cdot 10^{-02}$
CFO2	$1,44 \cdot 10^{-01}$

5.1.4 PENDIENTE

La pendiente del terreno para cada una de las coladas de lava, fue obtenida en terreno, con la ayuda de un inclinómetro. Este valor varía a lo largo de los flujos, por lo que también fue medida a distintas distancias de la fuente: en la Figura 34 se pueden observar las variaciones de este valor para todas las coladas.

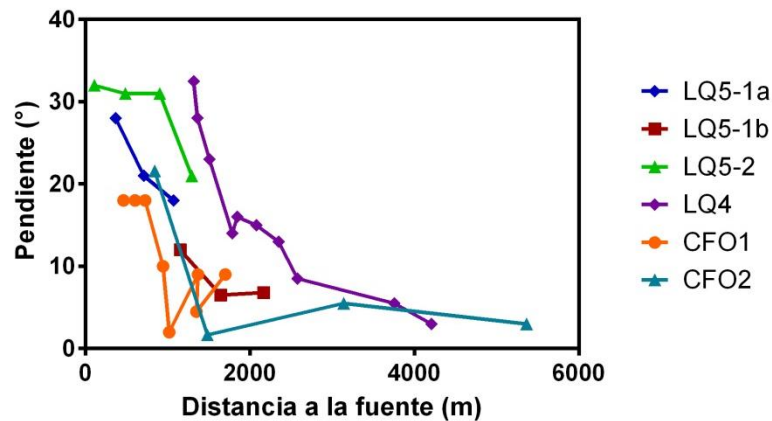


Figura 34: Pendiente vs Distancia a la fuente.

5.2 PARÁMETROS PARA REOLOGÍA DE HERSCHEL-BULKLEY

Los parámetros para la reología de tipo Herschel-Bulkley son la consistencia de las coladas, el parámetro n y el *yield strength*. Para poder calcular estos valores, es necesario conocer la viscosidad de la fase fluida, la temperatura y el contenido de gases de las coladas, además de conocer la concentración de cristales que presenta la colada, y su empaquetamiento máximo cristalino respectivo.

Para esto, se han calculado todos estos datos a distintas distancias de la fuente de cada colada, para poder caracterizar las variaciones de los parámetros, y así, realizar las comparaciones pertinentes para el complejo volcánico.

5.2.1 DATOS PARA CÁLCULO DE LOS PARAMETROS

- COMPOSICIÓN DEL VIDRIO

La composición del vidrio de las muestras, fue obtenida gracias al microscopio electrónico de barrido (SEM), con el cual se obtuvieron las composiciones químicas de áreas de masa fundamental de las muestras de roca obtenidas en terreno, como se ejemplifica en la Figura 35. Para efectos de este estudio, se considera que la masa fundamental está compuesta por microlitos y vidrio, como una aproximación a la composición original de la fase fluida, ya que los microlitos representarían una cristalización tardía de la lava.

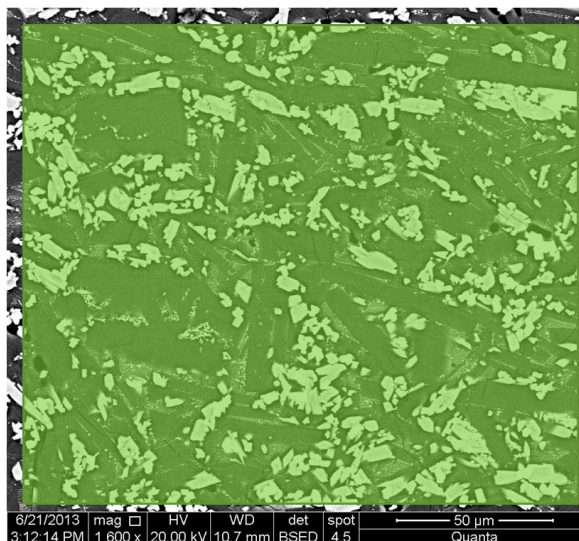


Figura 35: Imagen explicativa del trabajo en microscopio electrónico, en color verde el área de masa fundamental a la que fue medida su composición química. Ejemplo para la muestra LON4-05A.

Los resultados obtenidos muestran que, para la mayoría de las coladas, las concentraciones de los óxidos se mantienen bastante constantes, tal como se puede observar en la

Figura 36, con rangos entre los 52-66% SiO_2 , 0,6-1,3% TiO_2 , 17-15% Al_2O_3 , 5,5-10% FeO(T) , 0,15-1,26% MnO , 0,5-2,6% MgO , 3,8-8% CaO , 5-7,5% Na_2O , 0,9-1,4% K_2O y 0,2-0,8% P_2O_5 . Las composiciones detalladas obtenidas se pueden revisar en el Anexo B. Estos valores obtenidos son muy confiables, dado que los resultados

entregados por el SEM son casi cuantitativos para elementos mayores (Morata D., comunicación oral).

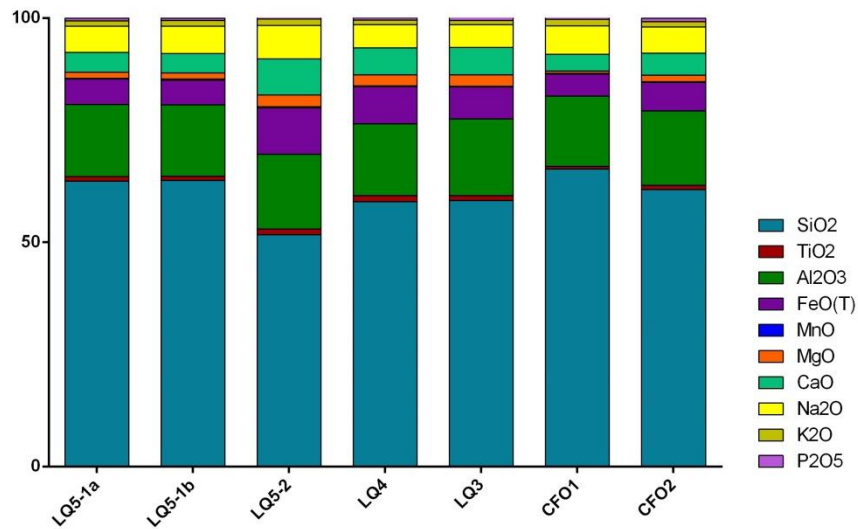


Figura 36: Cuadro Comparativo de las composiciones del vidrio volcánico de todas las coladas en estudio. Valores obtenidos con el microscopio electrónico.

- TEMPERATURA

De acuerdo a Putirka (2008), la temperatura de las coladas de lava se puede determinar con la concentración de óxido de magnesio encontrada en el vidrio de la muestra. Este cálculo, a pesar de ser muy simple, ha dado buenos resultados, con un valor de correlación muy favorable ($R=0,91$), y un error standard asociado de $\pm 71^\circ\text{C}$. La ecuación utilizada para el cálculo de la temperatura es la siguiente:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 26,3 \text{MgO}_{\text{liq}} + 994,4^{\circ}\text{C}$$

Esta ecuación es aplicable en cualquier tipo de roca volcánica saturada en olivino, con cualquier asociación mineral conjunta. Solo debe cumplir encontrarse entre el siguiente rango P-T: $P = 0,0001\text{-}14,4 \text{ GPa}$; $T = 729\text{-}2.000 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\text{SiO}_2 = 31,5\text{-}73,64 \text{ wt\%}$; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 0\text{-}14,3 \text{ wt\%}$; $\text{H}_2\text{O} = 0\text{-}18,6 \text{ wt\%}$ (Putirka, 2008).

Así, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 37, donde se pueden observar las variaciones de las temperaturas de cada colada con la distancia a la fuente, y se puede notar como estas no cambian mayormente a lo largo de ellas; y en la

Tabla 2 se observan las temperaturas promedio encontradas para cada colada, y los resultados detallados para cada muestra en el Anexo D.

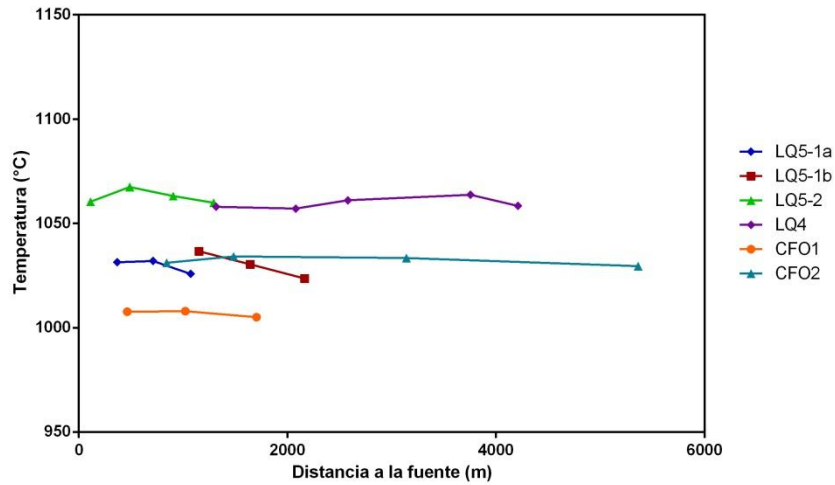


Figura 37: Temperaturas versus distancia a la fuente, para todas las coladas, calculadas de acuerdo a Putirka (2008).

Tabla 2: Temperatura promedio de las coladas, de acuerdo a Putirka (2008).

Colada	Temperatura $\pm 71^{\circ}\text{C}$
LQ5-1a	1029,76
LQ5-1b	1030,24
LQ5-2	1062,76
LQ4	1059,69
LQ3	1059,89
CFO1	1006,92
CFO2	1032,10

Sin embargo, los rangos de error obtenidos ($\pm 71^{\circ}\text{C}$) son muy altos para la aplicación del modelo. Por lo tanto, fue necesario acotar estas temperaturas.

El rango mayor para las temperaturas fue obtenido de acuerdo a Polanco (2010): en este trabajo se obtienen temperaturas para las coladas de lava del CVLT con

termobarometría de equilibrio de clinopiroxeno-líquido (según Aulinas *et al.* (2010)) y de olivino-líquido (según Putirka (2008)). Los resultados obtenidos en este trabajo dan cuenta de una serie de cámaras magmáticas a distintas profundidades, donde la más somera, ubicada a profundidades menores a 5 km, se encontraría a temperaturas menores a 1.080°C, y correspondería a la última etapa de evolución magmática del sistema, donde ocurriría el fraccionamiento de la mayoría de las fases cristalinas presentes (clinopiroxenos, plagioclasas y algunos olivinos). Para el cálculo de los parámetros eruptivos se necesita la temperatura del material extruido, por lo mismo, se considerará 1.080°C el rango mayor de temperatura para las coladas de este estudio.

Por otro lado, se puede acotar el rango menor de temperatura para las coladas gracias a los datos existentes de la erupción de 1988-89 del Volcán Navidad: las composiciones de esta colada se presentan en la Tabla 3, comparadas con las composiciones de las coladas de este estudio. Se puede notar como las composiciones son muy similares, por lo que se esperaría que las temperaturas dentro del complejo volcánico no varíen mucho.

Tabla 3: Composiciones de roca total para las coladas en estudio y colada del Volcán Navidad. Datos obtenidos de Polanco (2010)

	Colada	Colada	Colada	Colada	Colada	Navidad
	LQ5-1	LQ4	CFO1	CFO2	LQ3	
	(LOP45)	(BB121)	(BB130)	(LOP35)	(LOP42)	(LOP34)
SiO2	54,52	55,76	61,96	58,21	56,04	56,76
TiO2	1,46	1,46	0,72	1,42	1,43	1,52
Al2O3	16,63	16,15	16,13	16,07	16,51	16,63
FeOt	11,43	11,08	8,47	9,76	10,79	10,00
MnO	0,21	0,21	0,23	0,22	0,22	0,23
MgO	3,26	3,04	1,05	2,31	2,79	2,39
CaO	7,21	6,62	4,24	5,55	6,42	5,46
Na2O	4,20	4,50	5,65	5,10	4,55	5,64
K2O	0,81	0,88	1,26	1,00	0,93	0,99
P2O5	0,30	0,33	0,29	0,39	0,35	0,39
Total	100	100	100	100	100	100

Incluso, con el método de Putirka (2008) para la colada del Volcán Navidad se han obtenido valores entre 1.015 y 1.044°C (Contreras, 2013), muy cercanos a los encontrados por Moreno y Gardeweg (1989), de 1.020±10°C y 1.040±10°C, obtenidos utilizando un pirómetro óptico de filamento durante el movimiento de la colada.

Así, el rango mínimo de temperatura que se utilizará será 1.010°C, que corresponde a la temperatura mínima encontrada para la colada del Volcán Navidad, de acuerdo a Moreno y Gardeweg (1989).

- VOLÁTILES

La concentración de volátiles también es un dato necesario para la obtención de la consistencia de las coladas. Debido a que en este trabajo no se cuenta con análisis químicos para las muestras obtenidas en terreno con la concentración de volátiles, se utilizará un rango de valores de acuerdo a análisis presentados en trabajos anteriores en lavas con características petrológicas similares a las lavas estudiadas.

Vergara (2010) presenta análisis de rocas obtenidas de distintas zonas del CVL, donde su valor de PPI (Pérdida Por Ignición) está en el rango de 0,01 y 0,2%. Por otra parte, Savov *et al.* (2008) realizaron análisis de muestras de coladas de lava del Volcán Colima, en México. Estas muestras presentan composiciones muy similares a las del CVL (55-63% SiO₂), y su rango obtenido para PPI se encuentra entre los 0,02 y 0,17%.

De acuerdo a los resultados de estos trabajos, se decidió utilizar un rango aproximado para la concentración de volátiles entre 0,1 y 0,01%.

- CONTEO MODAL DE FASES CRISTALINAS

El cálculo de la cantidad de cristales en las muestras, se llevó a cabo con el programa computacional JMicroVision 1.2.7, en el cuál, de manera manual se contaron cristales desde imágenes de escaneos de los cortes transparentes realizados a las muestras de roca obtenidas en terreno. Cada conteo consta de 500 puntos, repartidos en las familias que se presentan a continuación:

- a. Fenocristales: corresponden a cristales, plagioclasas, piroxenos y olivinos, mayores a 1 mm.
- b. Microfenocristales: plagioclasas y clinopiroxenos, en su mayoría, de tamaños entre 1 mm y 0,15 mm.
- c. Masa fundamental: todo lo que no se reconoce como lo anterior, principalmente compuesta por vidrio y microlitos <0,15 mm.
- d. Vesículas

En la Figura 38 se ejemplifica el trabajo que se realizó en los conteos de cristales. Para que el conteo fuera representativo de todas las zonas de la muestra, se utilizó una distribución aleatoria de los puntos a determinar. Además, en el gráfico evolutivo del conteo se puede apreciar que a los 500 puntos ya se han estabilizado las proporciones de cada familia.

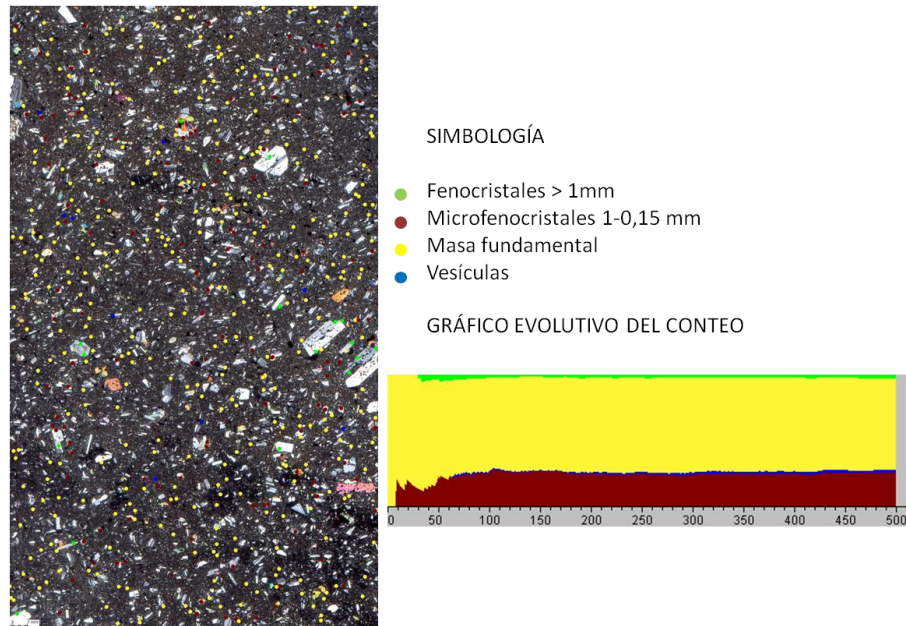


Figura 38: Imagen explicativa del trabajo de conteo modal. Ejemplo para la muestra LON5-04: Fenocristales: 3,2%, Microfenocristales: 25,4%, Masa fundamental: 69,6%, Vesículas: 1,8%.

Utilizando este método, se han encontrado los resultados que se detallan en el Anexo C, y que se resumen en los gráficos de la Figura 39 y Figura 40, en ellos se puede notar como la proporción fenocristales/microfenocristales/masa fundamental no varía mucho de una colada a otra, ni tampoco dentro de la misma colada, incluso, los

fenocristales se encuentran en el rango 0,7-3,5%, los microfenocristales entre 14-30%, y la masa fundamental, que se encuentra en mayor proporción, entre 67-84%.

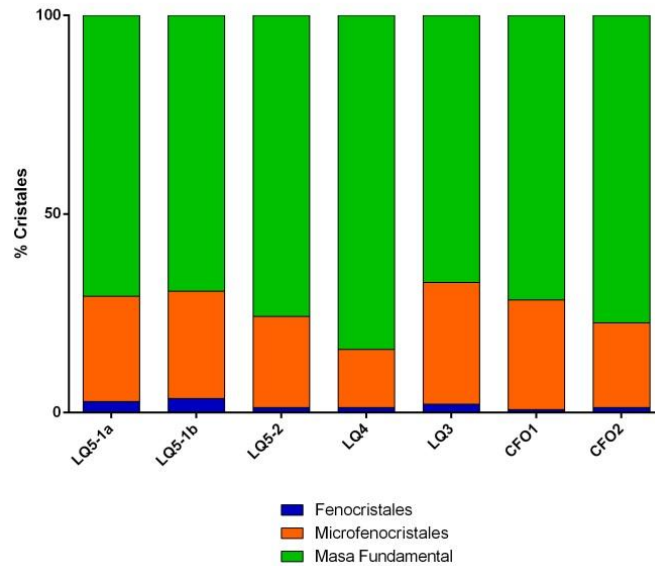


Figura 39: Comparación de los resultados del conteo modal para todas las coladas, donde se puede apreciar que durante la evolución del complejo no se han producido grandes variaciones en los porcentajes de cristales.

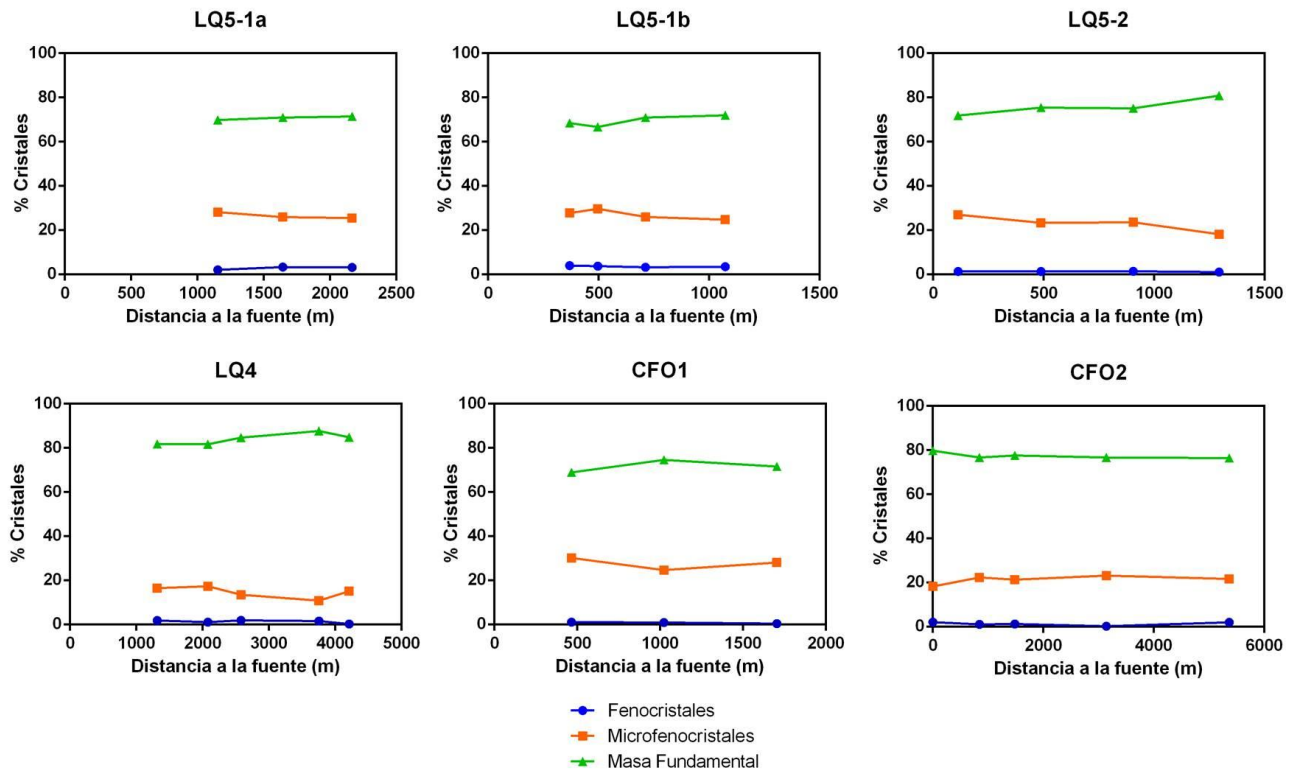


Figura 40: Resultados del conteo modal para cada colada, a distintas distancias de la fuente de emisión.

- EMPAQUETAMIENTO MÁXIMO Φ_M

El valor para el empaquetamiento máximo cristalino (ϕ_m) es un dato necesario para el cálculo de la consistencia de las coladas. El valor de ϕ_m se ha definido de acuerdo a Marsh (1981), Ishibashi (2009), Muller *et al.* (2009) y Mader *et al.* (2013). Ellos han demostrado que este valor se encuentra determinado principalmente por la forma y la distribución de tamaños de las facies cristalinas presentes. En estos trabajos, se han realizado estimaciones de su valor, que se resumen en la Tabla 4, dependiendo de la “razón de aspecto” $r_p=l_a/l_b$ (l_a =largo de los cristales en el eje de simetría rotacional, l_b =máximo diámetro perpendicular al eje anterior):

Tabla 4: Valores para Φ_m , de acuerdo a Mueller (2009)

Familia cristalina	r_p	Φ_m
Oblato	0,13	0,624
Esférico	1	0,633
Prolato A	1,75	0,539
Prolato B	4,69	0,433
Prolato C	9,17	0,339

Como se puede notar, estos valores han sido determinados para una familia cristalina del mismo tamaño y forma, y el ϕ_m máximo encontrado es para partículas esféricas, de valor $\sim 0,6$.

De acuerdo a estos trabajos, el valor de ϕ_m va disminuyendo a medida que las partículas se desvían de la isotropía; no obstante, mientras más polimodales sean las muestras, el valor de ϕ_m va aumentando, al igual que si hay gran distribución de tamaños; aunque el valor disminuye si hay gran variedad de formas, pero con tamaño similar. Debido a que ϕ_m posee un comportamiento tan variable, es que actualmente no existe ninguna fórmula que determine exactamente el valor de ϕ_m .

De acuerdo a esto, se ha decidido aproximar el valor del empaquetamiento máximo a $\phi_m = 0,44$, dado que las muestras de las coladas estudiadas presentan familias de

plagioclasas, olivinos y piroxenos, de tamaños variables entre fenocristales, y microfenocristales en la masa fundamental; los cuales además presentan distinta forma, estructuralidad e integridad, lo cual hace muy difícil que tengan un empaquetamiento máximo alto, por lo que se ha decidido trabajar con ese valor bajo.

- VISCOSIDAD DE LA FASE LÍQUIDA DE LAS LAVAS

La viscosidad del vidrio de las coladas, también es un parámetro necesario para el cálculo de la consistencia de las coladas. Este valor es posible calcularlo con el modelo de Giordano *et al.* (2008); para esto son necesarios los datos de la composición del vidrio volcánico, la temperatura y la concentración de volátiles. De acuerdo a esto, se han encontrado los siguientes resultados:

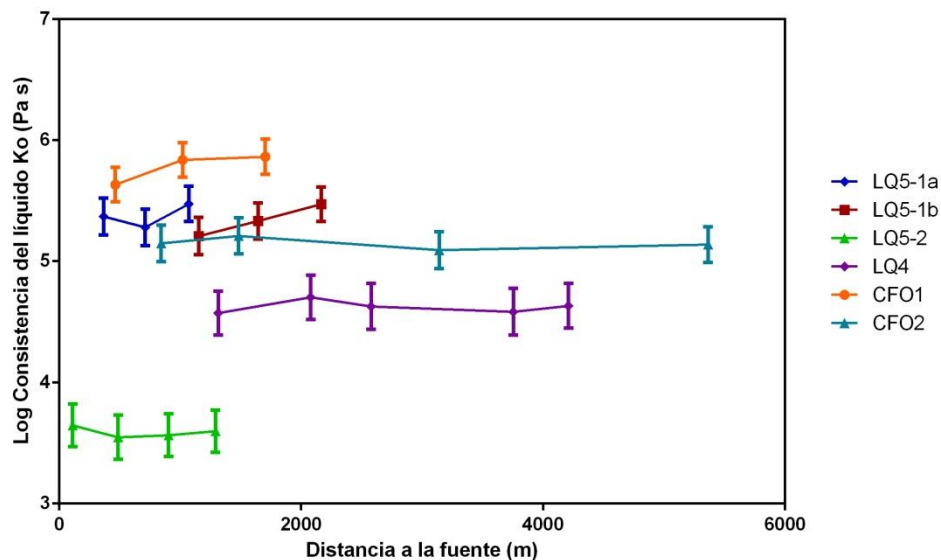


Figura 41: Viscosidad del líquido o vidrio volcánico de las coladas en estudio, vs distancia a la fuente. Obtenidas gracias al modelo de Giordano (2008).

Así, la viscosidad del vidrio volcánico de la mayoría de las coladas se encuentra en el rango $1,4 \cdot 10^5 - 1,1 \cdot 10^6$ Pa sⁿ, con excepción de la Colada LQ4 ($2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$ Pa sⁿ), y la Colada LQ5-2 ($1,9 \cdot 10^3 - 2,7 \cdot 10^3$ Pa sⁿ), que son las dos coladas que presentan como morfología principal la aa.

5.2.2 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS PARA LA REOLOGÍA DE HERSCHEL-BULKLEY

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los parámetros para reología de Herschel-Bulkley, los cuales corresponden a la consistencia de las coladas, el parámetro n y el *yield strength*. Estos valores luego serán utilizados para calcular los parámetros eruptivos de las coladas.

- CONSISTENCIA DE LAS COLADAS

La consistencia de la lava (K) se puede estimar, con los valores de la consistencia de la fase fluida (K_0), la concentración de cristales de las muestras (ϕ) y el empaquetamiento máximo cristalino (ϕ_m), de acuerdo a la ecuación presentada en Castruccio (2012):

$$K = K_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2.3}$$

De esta manera, los resultados obtenidos para la consistencia de las coladas de lava, se presentan en detalle en el Anexo E, y se resumen en el gráfico presentado en la Figura 42, donde se puede notar que, la consistencia se encuentra dentro de un rango para la mayoría de las coladas: $6,8 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^7 \text{ Pa s}^n$; y al igual que en el caso de la viscosidad del líquido, la Colada LQ4 y Colada LQ5-2 se salen del grupo ($4,32 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5 \text{ Pa s}^n$ y $9,4 \cdot 10^3 - 1,5 \cdot 10^4 \text{ Pa s}^n$ respectivamente), por lo comentado anteriormente.

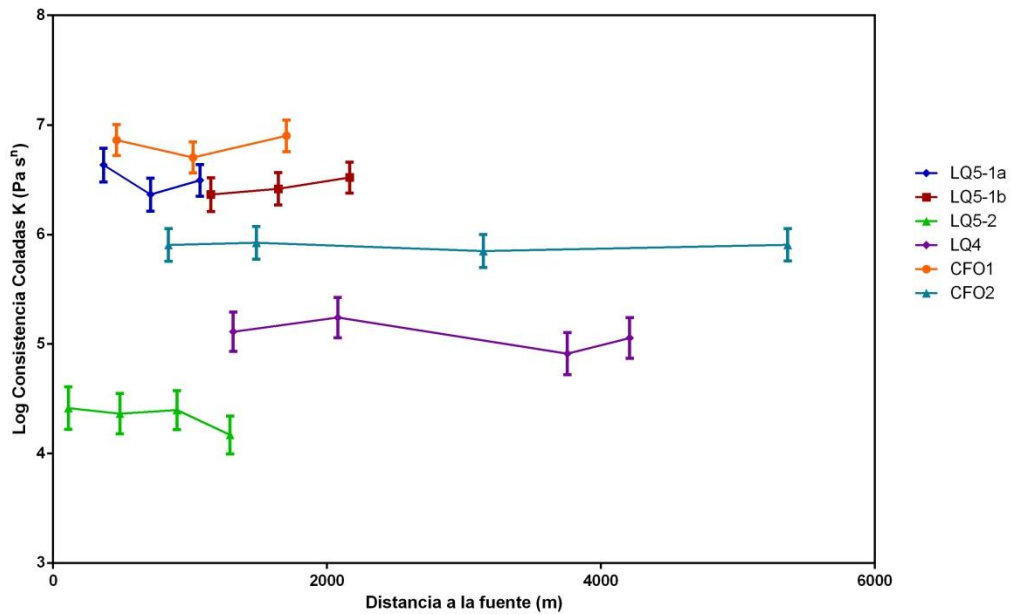


Figura 42: Consistencia de las coladas en estudio, vs distancia a la fuente. Obtenidas con la ecuación presentada en Castruccio (2012).

- PARÁMETRO N

El parámetro n es un valor adimensional, que es necesario para el cálculo de los parámetros eruptivos de las coladas, y se calcula de acuerdo a la fórmula presentada en Castruccio (2012):

$$n = \begin{cases} 1 & \phi \leq \phi_c \\ 1 + 1,3 \left(\frac{\phi_c - \phi}{\phi_m} \right) & \phi > \phi_c \end{cases}$$

con $\phi_c = 0,44 \cdot \phi_m$.

- YIELD STRENGTH

Para el cálculo del *yield strength* se cuenta con las fórmulas (6) y (7) presentadas en el Capítulo III:

$$\tau_y = 2w_1\rho g \sin^2 \beta$$

$$\tau_y = \rho g H \sin \beta$$

donde w_1 es el ancho del *levée*, ρ es la densidad, g es la gravedad y β es la pendiente del terreno, y la segunda fórmula para el caso estático, con H el espesor de la colada. Para este estudio, se ha considerado que la densidad de las muestras es de 2.500 gr/m^3 , típica para este tipo de roca.

Si bien se han calculado valores de *yield strength* a distintas distancias de las fuentes de emisión de cada colada, se ha trabajado con un valor fijo para este parámetro, ya que este valor representaría bien a la colada, dado que el rango de magnitud del *yield strength* no cambia mucho dentro de la colada, y además, correspondería al mínimo valor que la lava debería superar para poder seguir avanzando.

Así, los valores para los *yield strength* de las coladas son los presentados en la Tabla 5:

Tabla 5: *Yield Strength*

Colada	<i>Yield Strength</i> (Pa)
LQ5-1	$5,00 \cdot 10^{05}$
LQ5-2	$2,12 \cdot 10^{05}$
LQ4	$4,00 \cdot 10^{05}$
CFO1	$8,85 \cdot 10^{04}$
CFO2	$3,00 \cdot 10^{05}$

5.3 CÁLCULO DE PARÁMETROS ERUPTIVOS

En esta sección se calculan las variaciones de la velocidad y tasa eruptiva de las coladas. De acuerdo a las fórmulas expuestas en el Capítulo III, se reconocen distintos casos para el comportamiento de los flujos de lava. Estos casos han sido probados

para las distintas coladas en estudio, y para todas ellas ha sido posible el ajuste a alguno de estos tipos reológicos.

De los modelos presentados, se encontró que las coladas se acomodan a dos de ellos: Caso de una lava con una reología utilizando el modelo de Herschel-Bulkley y el Caso de una lava controlada por el *yield strength* en la corteza (Figura 4d).

Para el Caso de una lava con una reología utilizando el modelo de Herschel-Bulkley (CRHB), se utiliza la fórmula 10 para calcular la velocidad, y la fórmula 11 para el cálculo de la tasa eruptiva, ambas presentadas en el Capítulo III, estas son:

$$\bar{u} = \frac{H^2 \rho g \sin \beta}{3K} \left(\frac{3n}{H^3(n+1)} \left(\frac{\rho g \sin \beta}{K} \right)^{\frac{1-n}{n}} \right) \left(H(H-h_c)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{n}{2n+1} (H-h_c)^{\frac{2n+1}{n}} \right)$$

$$Q = \frac{H^3 W \rho g \sin \beta}{3K} \left(\frac{3n}{H^3(n+1)} \left(\frac{\rho g \sin \beta}{K} \right)^{\frac{1-n}{n}} \right) \left(H(H-h_c)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{n}{2n+1} (H-h_c)^{\frac{2n+1}{n}} \right)$$

donde H y W son el espesor y ancho de la colada respectivamente, ρ es la densidad de la roca, β es la pendiente del sector, g es la aceleración de gravedad, $h_c = \frac{\tau_y}{\rho g \sin \beta}$ con τ_y el *yield strength*, K la consistencia de las coladas, y n el parámetro presentado en el punto 5.2.2.

Para este modelo, tanto la velocidad y la tasa eruptiva presentarán errores asociados, debido al error propio del cálculo de la temperatura.

Para el Caso *Yield Strength* en la Corteza (CYSC), se utiliza la fórmula 19 del Capítulo III,

$$L = \left(\frac{V^2 \rho g \sin \beta}{W^2 \tau_c \sqrt{kt}} \right)^{1/2}$$

con V el volumen de la colada, ρ la densidad de la roca, β la pendiente del sector, g la aceleración de gravedad, W el ancho de la colada, τ_c el *yield strength*, k la difusibilidad

térmica y t el tiempo. Con esta ecuación se obtiene el tiempo que se demora la lava en recorrer cierta distancia L, luego la tasa eruptiva Q y la velocidad u se calculan de acuerdo a lo siguiente:

$$Q = V/T$$
$$u = Q/(W \cdot H)$$

donde V es el volumen eruptado, T es el tiempo que demora en erupar dicho volumen, y W y H son el ancho y potencia de la colada, respectivamente.

Para este modelo, los resultados obtenidos representarán un valor mínimo de velocidad y tasa eruptiva, ya que se ha calculado a partir de un *yield strength* de valor mínimo para el movimiento de la colada.

Un caso especial será la Colada LQ3: dado que solo se cuenta con muestras de un lugar de la colada, cercana al frente del flujo, no se podrá calcular ni su velocidad ni la tasa eruptiva del evento que la generó, debido a lo limitado de las muestras obtenidas. Sin embargo sus dimensiones, volumen, largo alcanzado, y petrografía serán de gran importancia para realizar comparaciones entre las unidades del complejo volcánico.

De acuerdo a esto, en la Figura 43 se presenta un gráfico distancia vs tiempo, en el cual se puede observar el comportamiento del avance de las coladas, y también, se puede notar como las coladas, al comienzo de su movimiento, avanzan más rápido, y luego van disminuyendo sus velocidades.

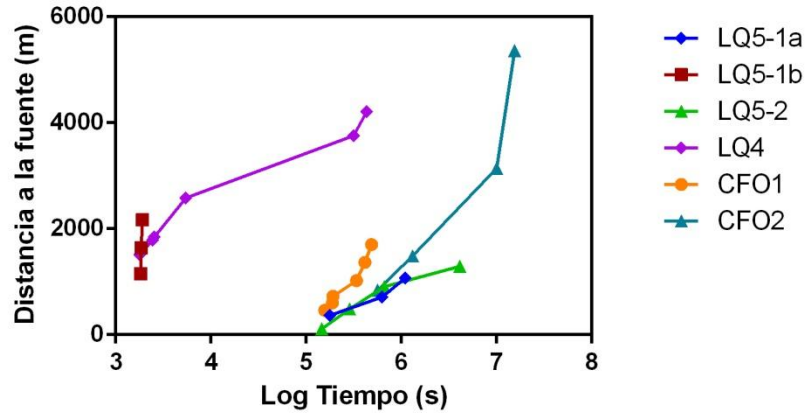


Figura 43: Distancia vs Tiempo para todas las coladas en estudio.

Así, de acuerdo a lo expuesto, a continuación se presentan los resultados encontrados para cada colada, la decisión sobre qué régimen dinámico impera sobre la dinámica de cada una de ellas, se discute en la sección 6.2.

5.3.1 COLADA LQ5-1

Para el caso de la Colada LQ5-1, se tiene que cada unidad se adecúa mejor un modelo distinto:

- Colada LQ5-1a: Para esta colada se ha encontrado un mejor ajuste con el modelo del CRHB. Los resultados son:

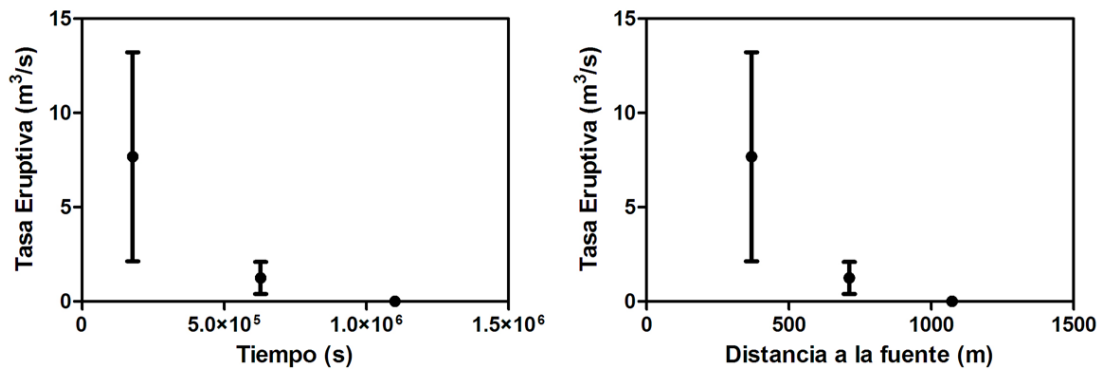


Figura 44: Tasa Eruptiva para la Colada LQ5-1a. Se puede observar como varía de acuerdo a la distancia a la fuente y al tiempo.

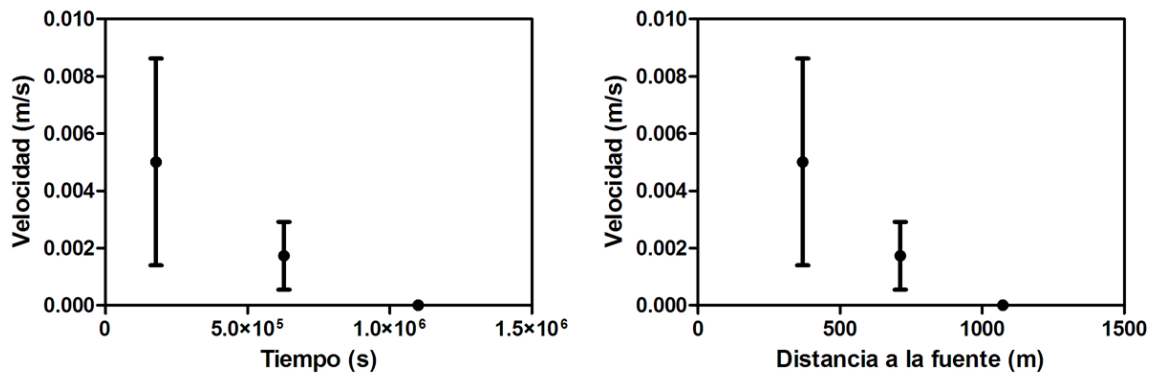


Figura 45: Velocidad para la Colada LQ5-1a. Se puede observar como varía de acuerdo a la distancia a la fuente y al tiempo.

Como se puede observar en los gráficos de las figuras 44 y 45, tanto la tasa eruptiva como la velocidad van disminuyendo a medida que avanza la colada, de modo que la velocidad habría sido de aproximadamente $2,07 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ a unos 370 m de la fuente, con una tasa eruptiva de unos $3,17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, valores que luego habría ido disminuyendo hasta el término del evento eruptivo. La colada de lava se habría emplazado en el curso de unos 13 días aproximadamente.

- Colada LQ5-1b: para esta colada, por el contrario, se ha encontrado un mejor ajuste con el modelo del CYSC. Así, los resultados son los que se presentan en las figuras 46 y 47. Los valores encontrados para la tasa eruptiva son de $0,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a $3,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y luego disminuyen a $3,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y la velocidad presenta un comportamiento similar, desde $6,35 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ a $1,61 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ y finalmente disminuye a $4,02 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. La colada se habría demorado unos 97 días en alcanzar su largo final, desde que es liberada desde el frente de la Colada LQ5-1a.

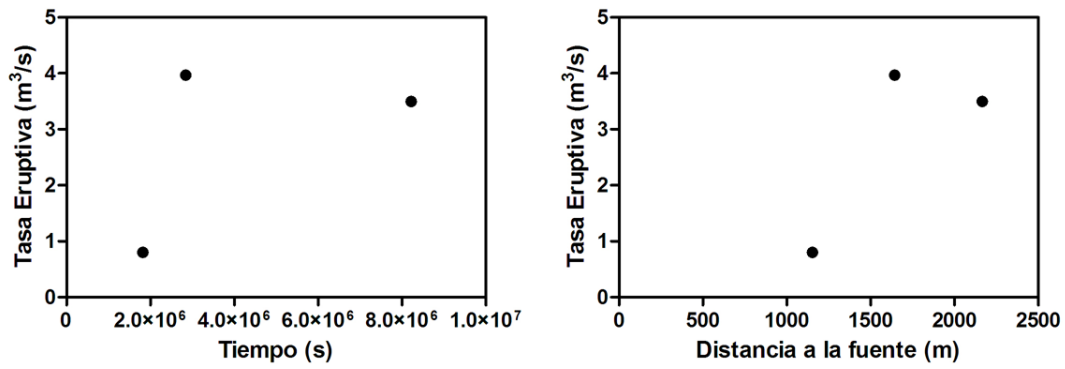


Figura 46: Tasa eruptiva para la Colada LQ5-1b. Se puede observar como varía de acuerdo a la distancia a la fuente y al tiempo.

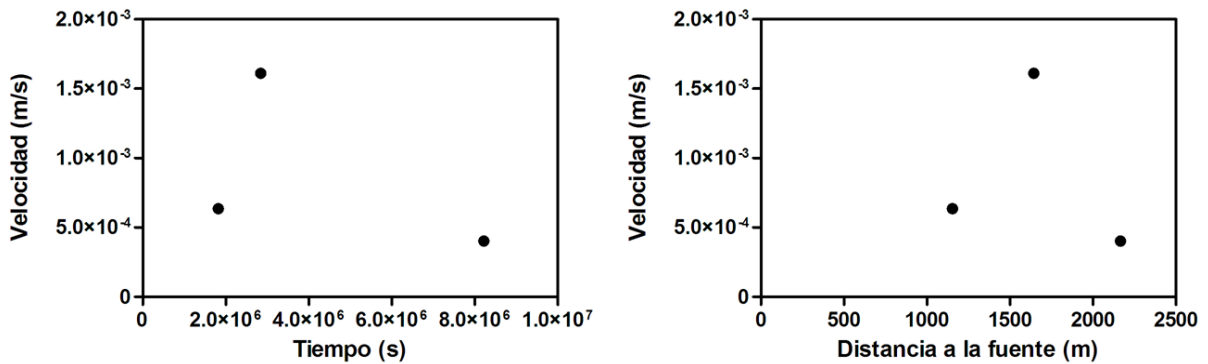


Figura 47: Velocidad para la Colada LQ5-1b. Se puede observar como varía de acuerdo a la distancia a la fuente y al tiempo.

5.3.2 COLADA LQ5-2

La Colada LQ5-2, correspondiente también a la Unidad Lonquimay 5, y concuerda mejor al modelo del CYSC. De acuerdo a la Figura 48 y a la Figura 49, tanto la tasa eruptiva como la velocidad presentan un aumento y luego una disminución en sus valores a medida que avanza la colada: la colada habría alcanzado una velocidad de $7,68 \cdot 10^{-4}$ a unos 110 m de la fuente, luego habría ido aumentando hasta $2,67 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$, y luego habría disminuido hasta detenerse; y su tasa eruptiva presenta un comportamiento similar, comienza con $0,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, aumentando a $3,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y luego

habría disminuido hasta $\sim 0,06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ cuando se termina el evento. La colada de lava se habría emplazado en el curso de unos 47 días aproximadamente.

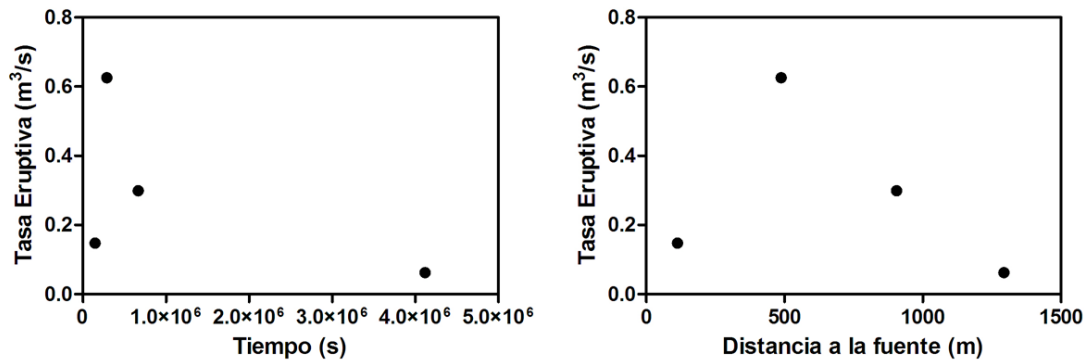


Figura 48: Tasa eruptiva para la Colada LQ5-2. Se puede observar como varía de acuerdo a la distancia a la fuente y al tiempo.

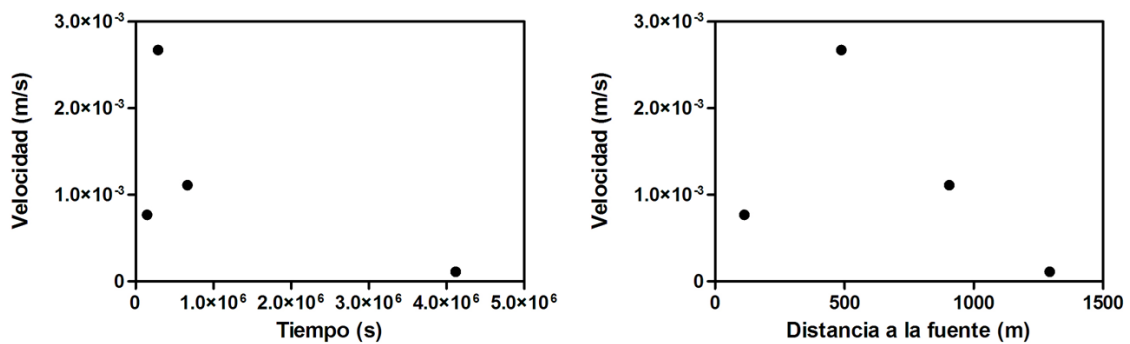


Figura 49: Velocidad para la Colada LQ5-2. Se puede observar como varía la velocidad de acuerdo a la distancia a la fuente y al tiempo.

5.3.3 COLADA LQ4

El modelo del CRHB es el que mejor se ajusta a las características de la Colada LQ4. Los resultados son los que se presentan en los gráficos de la Figura 50 y Figura 51, donde tanto la tasa eruptiva como la velocidad presentan un aumento y luego una disminución en sus valores a medida que avanza la colada: la velocidad va entre los $0,168$ y $0,511 \text{ m s}^{-1}$ en un comienzo, y luego habría ido disminuyendo hasta se detuvo la colada; mientras que su tasa eruptiva habría comenzado con unos $28,77 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, luego, habría aumentado a $236,22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y finalmente, habría ido disminuyendo

paulatinamente hasta que se detuvo el evento eruptivo. La colada de lava se habría emplazado en el curso de unos 5 días aproximadamente.

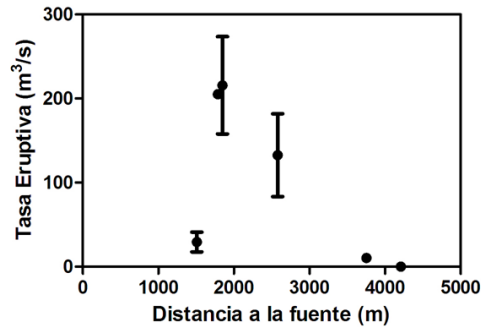


Figura 50: Tasa eruptiva para la Colada LQ4. Se puede observar como varía de acuerdo a la distancia a la fuente.

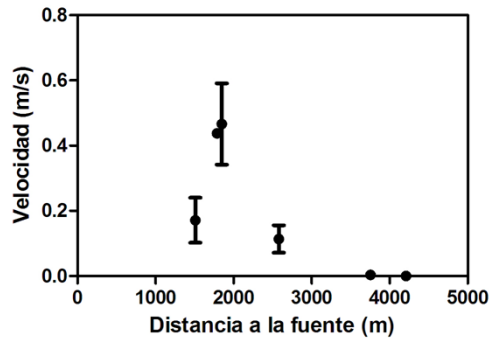


Figura 51: Velocidad para la Colada LQ4. Se puede observar como varía la velocidad de acuerdo a la distancia a la fuente.

5.3.4 COLADA CFO1

La Colada CFO1 corresponde muy bien con el modelo del CRHB. Como se puede observar en la Figura 52 y Figura 53, la tasa eruptiva inicialmente habría sido de unos $9,58 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, luego habría aumentado a $258 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y finalmente habría disminuido a $26,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, hasta que se detiene la lava. La velocidad tiene un comportamiento parecido: inicialmente habría sido de unos $2,96 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1}$, luego habría aumentado a $5,03 \cdot 10^2 \text{ m s}^{-1}$, y luego habría disminuido hasta la detención de la colada. Esta colada se habría demorado en alcanzar su largo unos 25 días.

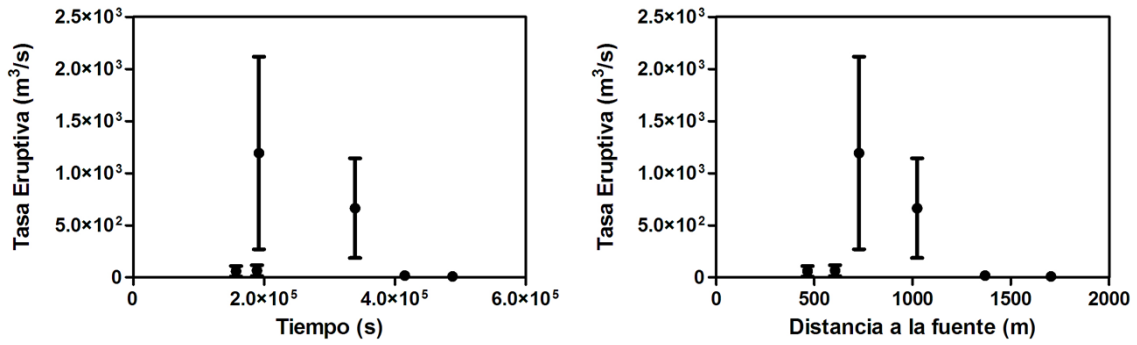


Figura 52: Tasa eruptiva para la Colada CFO1. Se puede observar como varía de acuerdo a la distancia a la fuente y al tiempo

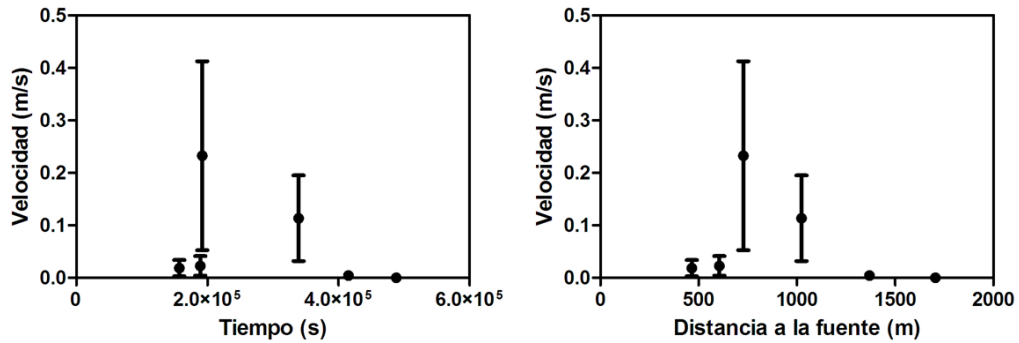


Figura 53: Velocidad para la Colada CFO1. Se puede observar como varía de acuerdo a la distancia a la fuente y al tiempo

5.3.5 COLADA CFO2

La Colada CFO2 concuerda con el modelo del CYSC.

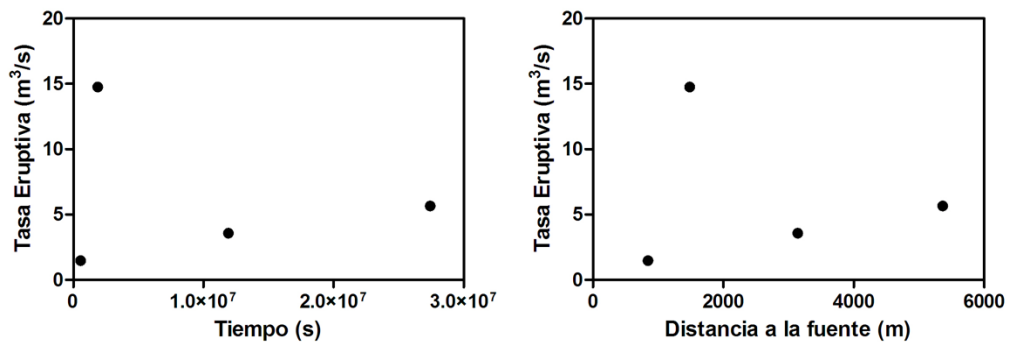


Figura 54: Tasa eruptiva para la Colada CFO2. Se puede observar como varía de acuerdo a la distancia a la fuente y al tiempo

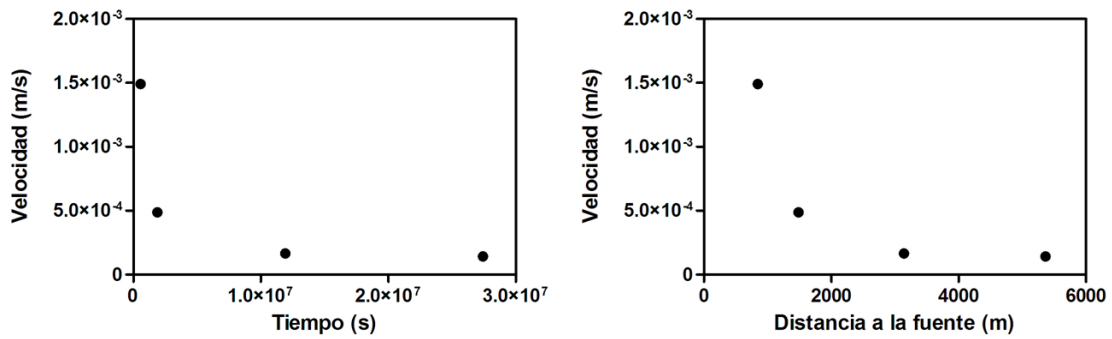


Figura 55: Velocidad para la Colada CFO2. Se puede observar como varía de acuerdo a la distancia a la fuente y al tiempo

Como se observa en la Figura 54 y Figura 55, la tasa eruptiva en un comienzo habría sido cercana a los $1,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, luego habría aumentado a $14,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y luego habría ido disminuyendo al final hasta $5,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; mientras que la velocidad habría ido disminuyendo desde los $1,49 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ en un comienzo, a $1,43 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ en el final. Esta colada se habría demorados unos 320 días en recorrer sus 5 km de largo.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

6.1 COMPARACIÓN DE MÉTODOS

Para comprobar la validez del modelo utilizado, se realizó una comparación con el método propuesto por Hulme y Fielder (1977), donde se indica que el enfriamiento de las coladas de lava está principalmente relacionado con la pérdida de calor debido a la radiación hacia el ambiente circundante, la cual sería mucho más eficiente que la pérdida de calor por la conducción termal dentro del flujo, por lo tanto, la temperatura de la corteza del flujo se mantendría cercana a ambiental y su interior se mantendría a una temperatura parecida a la inicial. Además, de acuerdo a observaciones de terreno, las coladas de lava se comportarían como flujos laminares (Hulme y Fielder, 1977), por lo tanto, el enfriamiento de éstas podría tratarse como el problema de Graetz-Nusselt, en el cual, el enfriamiento de ellas es comparado con un flujo caliente que se hace pasar por una cañería a una temperatura menor. De esta forma, la temperatura del material que se encuentra en contacto directo con ella se va enfriando perpendicularmente a la superficie y el enfriamiento va penetrando cada vez más con el avance del flujo. La temperatura del centro de la colada de lava se mantiene esencialmente a la misma temperatura a la cual fue liberado. La temperatura a través del flujo es descrito con un valor adimensional llamado número de Graetz (Gz), el cual es inversamente proporcional a la distancia a la fuente; de acuerdo a esto, el valor de Gz se calcula:

$$Gz = \left(\frac{Q}{k \cdot d}\right) \left(\frac{H}{W}\right)$$

donde Q es la tasa eruptiva, k es la difusibilidad térmica, d es la distancia a la fuente, H es el espesor de la colada y W el ancho de la colada. Se ha determinado empíricamente que las coladas de lava, que no están limitadas por el volumen, se detienen cuando el número de Graetz alcanza valores aproximados de 300 (Walker, 1973; Hulme y Fielder, 1977).

De esta manera, utilizando el método de Graetz, se pueden comparar las tasas eruptivas calculadas con esta metodología, y las encontradas en este estudio, para

coladas donde su avance esté controlado por el enfriamiento del flujo, como se describe en Guest *et al.* (1987).

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 56 y en la Tabla 6, se puede notar que los resultados más próximos con ambos métodos corresponden a las coladas de lava de la Unidad Lonquimay 5 (LQ5-1 y LQ5-2), para las cuales, el enfriamiento determinó sus dimensiones finales (ver sección 6.3). De esta manera, los dos modelos entregarían buenas estimaciones para la tasa eruptiva promedio de este tipo de coladas.

Por otro lado, para las demás coladas de lava en estudio se han encontrado resultados dentro del mismo rango de orden para la tasa eruptiva promedio. Con respecto a esto, las estimaciones obtenidas con la metodología utilizada en este estudio, serían de mayor precisión debido a que la obtención de los datos necesarios se realiza de una forma sistemática, y valorando una mayor cantidad de variables que afectan al comportamiento de los flujos de lava, tales como las variaciones en la cristalinidad, efectos de una corteza enfriada o el efecto de la pendiente del terreno, siendo estos procesos de gran importancia en la dinámica de estos flujos.

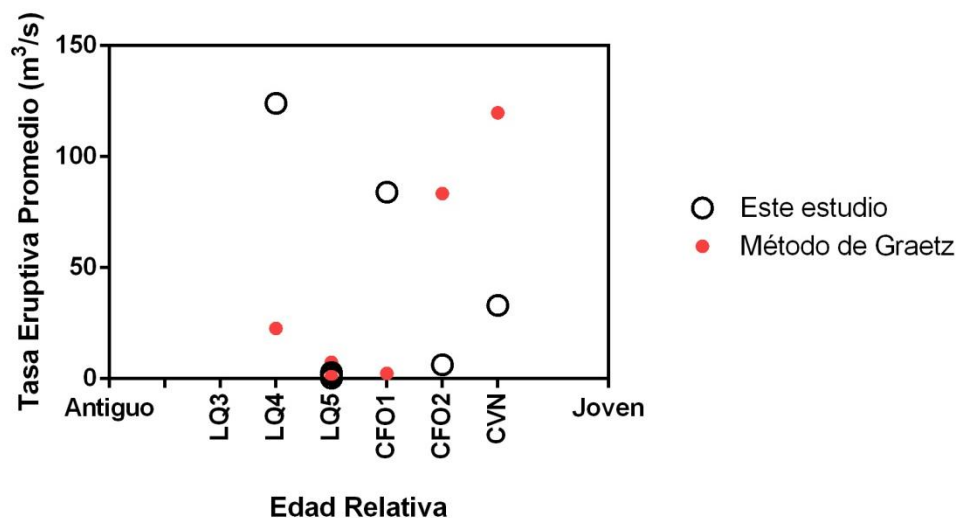


Figura 56: Gráfico comparativo del modelo utilizado en este estudio, y el Modelo de Graetz.

Tabla 6: Tasas eruptivas calculadas con el Método de Graetz comparadas con las obtenidas en este trabajo.

Colada	Tasa eruptiva promedio ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	
	Graetz	Este trabajo
LQ5-1a	0,97	1,86
LQ5-1b	4,10	2,75
LQ5-2	7,47	0,28
LQ4	22,73	124
CFO1	2,48	84,07
CFO2	83,39	6,37

6.2 REGÍMENES DINÁMICOS DE LAS COLADAS

La decisión sobre qué régimen dinámico impera sobre los otros en el comportamiento de una colada de lava, puede llegar a ser complicado si un flujo concuerda con más de uno de los casos presentados en el Capítulo III (Figura 4). Sin embargo, en el caso de las coladas que se estudiaron en este trabajo, la asociación fue directa, ya que para cada colada se obtuvo valores para la tasa eruptiva coherentes con solo uno de los regímenes. Esta coherencia se refiere a que los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos esperados que se presentan en el trabajo de Pinkerton y Wilson (1994), donde se enseñan los valores representativos para distintas propiedades y dimensiones de coladas de lavas, junto a las variaciones para tres composiciones químicas extremas (Tabla 7).

Tabla 7: Propiedades físicas y dimensiones de las lavas con sus rangos de valor esperados para distintas composiciones (Modificado de Pinkerton y Wilson (1994)).

	Lava Basáltica	Lava Andesítica	Lava Riolítica
Tasa eruptiva ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0,1-10 ³	0,3-80	1-10
Espesor (m)	1-10	8-800	200-550
Ancho/espesor del canal	1,3-1,5	1-3	~2
Gradiente (rad)	0,007-0,03	0,031-0,6	0,067-0,17
Yield strength (Pa)	50-2,5·10 ⁵	0,5·10 ⁵ -3,6·10 ⁵	1,2·10 ⁵ -3,6·10 ⁵
Viscosidad aparente (Pa s)	200-2,3·10 ⁵	10 ⁵ -10 ⁹	10 ⁸ -10 ¹²

De todas formas, existen otras maneras de corroborar los regímenes dinámicos asociados. De acuerdo a Castruccio *et al.* (2013), el análisis dimensional realizado ha mostrado que erupciones de corta duración y/o de alta tasa eruptiva, son dominadas por la viscosidad interna, como es el Caso Newtoniano (Figura 4a), un ejemplo de este tipo son las coladas generadas por erupciones Hawaianas. Luego, erupciones de larga duración o de baja tasa eruptiva, estarían dominadas por el Caso *Yield Strength* en la Corteza (Figura 4b); y las lavas de bloques, de menor tasa eruptiva, y con mayor contenido cristalino inicial, estarían controladas por el Caso *Yield Strength* en el Núcleo (Figura 4c).

Sin embargo, de acuerdo a las descripciones realizadas en terreno, todas las coladas clasifican en la transición entre aa y bloques. Por lo mismo, la relación entre morfología y modelo reológico no sería directa en estos casos. De todos modos, se han encontrado tres coladas que se adecúan al Caso *Yield Strength* en la Corteza (CYSC): Colada LQ5-1b, Colada LQ5-2 y Colada CFO2; y tres coladas con el Caso de una lava con una reología utilizando el modelo de Herschel-Bulkley (CRHB): Colada LQ5-1a, Colada LQ4 y Colada CFO1.

A pesar de esto, se observa una relación entre los regímenes estudiados y la tasa eruptiva: las coladas a las cuales se les encontró las mayores tasas eruptivas (Coladas LQ4, CFO1) se relacionan con el CRHB, mientras que las que presentan menores tasas (Coladas LQ5-1b, LQ5-2, CFO2), corresponden mejor al CYSC. Esta relación podría deberse a que a menores tasas eruptivas es más probable que se genere corteza que afecte la dinámica de la colada durante su avance. Sin embargo, la Colada LQ5-1a será un caso especial, ya que se le obtuvo una tasa eruptiva baja, con una relación con el CRHB, esto podría deberse a la influencia que podría haber generado la alta pendiente por la cual descendió el flujo, que podría haber evitado la formación de corteza durante su movimiento.

Para corroborar la elección del régimen, se utilizó la fórmula presentada en Castruccio *et al.* (2013), donde se explica que para que una colada esté controlada por el *yield strength* de la corteza, entonces el *stress* retardante de ésta debe ser mucho mayor que el *stress* retardante generado por la reología interna de la colada:

$$\sigma_c \frac{\delta}{H} \gg \mu \dot{\gamma}$$

con σ_c el *yield strength* de la corteza, $\delta = \sqrt{kt}$ el espesor de la corteza en crecimiento (k la difusividad térmica, y t el tiempo de duración del evento), H el espesor de la colada, μ la viscosidad del flujo, y $\dot{\gamma}$ la tasa de deformación. Si se considera $\dot{\gamma} = \frac{\bar{u}}{H-\delta}$, con \bar{u} la velocidad promedio, entonces esta relación se puede escribir como:

$$\sigma_c \gg \mu \frac{\bar{u}}{\delta} \left(\frac{H}{H-\delta} \right)$$

Aplicando esta relación, se puede determinar el esfuerzo que dominante. De acuerdo a esto, se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 8, donde se puede notar que para las coladas que correspondieron con el CYSC, los valores obtenidos para la fuerza ejercida por la reología interna de la colada, son de entre $2,04 \cdot 10^3$ y $2,44 \cdot 10^4$ Pa, que son de un par de órdenes menores que los *yield strength* encontrados para las cortezas (alrededor de 10^5 Pa, ver Tabla 5). En cambio, para las coladas que correspondieron al método del CRHB, se encontraron valores para la fuerza ejercida por la reología interna de la colada de entre $6,83 \cdot 10^4$ y $7,33 \cdot 10^5$ Pa, los que corresponden al mismo orden de magnitud que los $1 \cdot 10^5$ y $7,13 \cdot 10^5$ Pa de los *yield strength* encontrados para las cortezas (ver Tabla 5). Por lo tanto, los regímenes asociados para cada colada se confirmarían con esta comparación.

Tabla 8: Resultados para el valor de la fuerza ejercida por la reología interna de la colada.

Régimen Dinámico	Colada	$\mu \frac{\bar{u}}{\delta} \left(\frac{H}{H-\delta} \right)$
CYSC	LQ5-2	$2,04 \cdot 10^3$
	LQ5-1a	$2,44 \cdot 10^4$
	CFO2	$3,12 \cdot 10^3$
CRHB	LQ4	$6,83 \cdot 10^4$
	LQ5-1b	$1,05 \cdot 10^5$
	CFO1	$7,33 \cdot 10^5$

Por otro lado, las texturas y estructuras encontradas en las coladas, pueden entregar una idea sobre cuál de los regímenes estaría imperando en el comportamiento de los flujos de lava. Primero, se podría descartar el régimen newtoniano en todas las coladas en estudio, dado que todas ellas presentan marcas de cizalle y/o bloques lajados, los cuales sugieren que el material se encontraba en un estado plástico o no-newtoniano al momento de deformarse, con una corteza que tenía un comportamiento frágil y un interior dúctil. Por otro lado, los *ridges* transversales indicarían que durante el movimiento de las coladas, se formó una corteza que conservó termalmente aislado al centro interno del flujo, que se mantendría fluyendo, por lo que arrastró y arrugó a la corteza, para generar estos *ridges* transversales. Asimismo, la presencia de protuberancias en algunos sectores de las coladas, igualmente indicaría la presencia de una corteza fría en comparación con el interior de la colada, lo cual por efectos de presiones al interior del flujo, parte del material saldría expulsado a través de la corteza, enfriándose en el exterior en forma de espinas. Estas morfologías sugerirían la presencia de una corteza que tendría influencia sobre el avance de estos flujos. Este tipo de estructuras son reconocidas en la Colada LQ5-1b (*ridges* transversales, Figura 9 y 10), en la Colada CFO2 (*ridges* transversales y protuberancias, Figura 25) y en la Colada de Volcán Navidad (*ridges* transversales y protuberancias, en Contreras (2013)) y ellas corresponden al CYSC, lo cual indicaría que durante el emplazamiento de estos flujos, la influencia de la corteza habría sido más importante para la determinación de su dinámica, que la influencia de la reología interna; por otro lado, las coladas LQ5-1a y LQ3 no presentan este tipo de morfologías y corresponden al CRHB. Sin embargo, tanto la Colada LQ4 (que presenta protuberancias, Figura 19f), como la Colada CFO1 (que presenta *ridges* transversales, Figura 21, y algunas protuberancias) corresponden al CRHB, lo que podría ser explicado por la formación de una corteza que no se caracterice por un *yield strength* tan importante como para superar el *stress* generado por la reología interna de estas coladas, por lo que se trataría de coladas que formaron corteza durante su avance, pero que la energía interna de la colada era superior. Así, la relación entre la reología y las estructuras y texturas de las coladas, entrega indicios sobre cuáles son los parámetros que están definiendo la dinámica durante el movimiento de las coladas de lava.

6.3 ANÁLISIS DE VARIACIONES EN LOS CENTROS ERUPTIVOS

Las variaciones de los parámetros eruptivos observados en los centros volcánicos en estudio (Figuras 59 a la 62), dan cuenta de cómo éstos, junto con las características físicas de los flujos y la pendiente del lugar, afectarán a las dimensiones finales de las coladas. De acuerdo a Walker (1973), la tasa eruptiva corresponde al factor principal que controla el largo de las coladas (Figura 57). Además, de acuerdo a Guest *et al.* (1987), el largo también estará influenciado por el enfriamiento y el volumen eruptado, de esta manera, describe dos tipos de comportamiento: se llamarán coladas limitadas por el enfriamiento a aquellas donde la pérdida de calor de la masa en movimiento, causa la pérdida de la capacidad de avance, incluso si continúa el suministro de fluido desde la fuente. El otro caso, corresponde a las coladas limitadas por el volumen, las cuales se detienen producto del cese del suministro del material de la fuente.

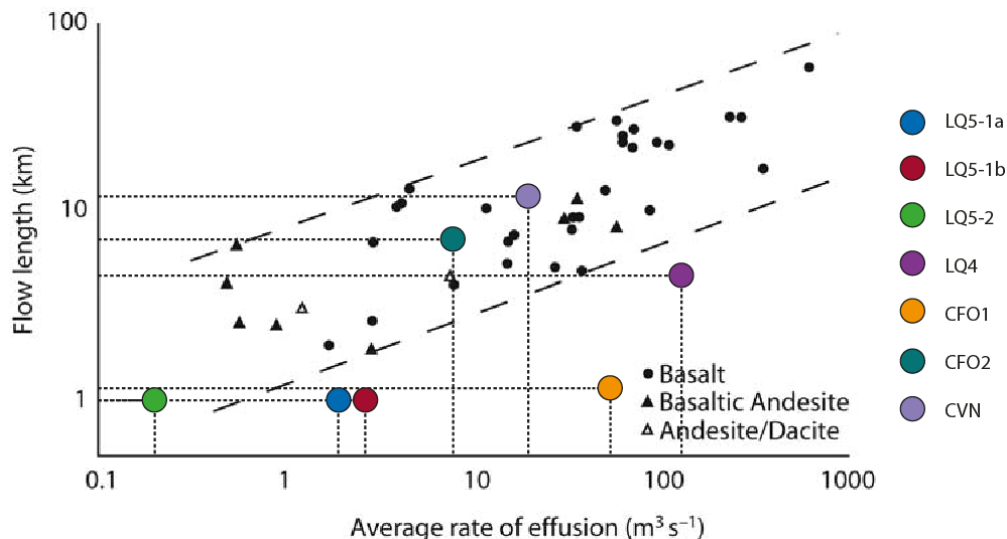


Figura 57: Gráfico explicativo del comportamiento del largo de colada con los cambios en la tasa eruptiva. Obtenido de Harris y Rowland (2009), modificado de Walker (1973). Se han ploteado los datos encontrados en este trabajo para las coladas en estudio.

Otro factor que puede influenciar las dimensiones de las coladas de lava es la topografía: de acuerdo a Walker (1973), el efecto de la pendiente de la superficie por la cual se mueve el flujo de lava, si bien no es despreciable, es pequeño en comparación con los demás factores. A pesar de esto, las altas pendientes causarán que las coladas fluyan como una fina capa a nivel de piso y las coladas llegarán más lejos, aunque

también el efecto del enfriamiento será mayor (Walker, 1973). Por otro lado, según Guest *et al.* (1987), la tasa de avance de las lavas estaría fuertemente influenciado por cambios importantes en la pendiente. Una reducción de diez veces en la pendiente, causará una disminución similar en la tasa de avance del frente de la colada, lo que produciría que se acumule material en el frente, haciéndose más potente.

Con el objetivo de cuantificar el efecto de la pendiente en el comportamiento de las coladas de lava, se utilizó la ecuación de Jeffrey que ha sido determinada para un fluido newtoniano que baja por un plano inclinado:

$$V = \frac{H^2 \rho g \operatorname{sen} \alpha}{3\mu}$$

con V la velocidad del flujo, H el espesor de la colada, ρ la densidad del flujo, g la aceleración de gravedad, α la pendiente del lugar y μ la viscosidad del flujo.

Si se considera $V = Q/HW$, con Q la tasa eruptiva y W el ancho del flujo, y reagrupando las variables de la ecuación para ver el efecto de la pendiente en la potencia de las coladas, se obtiene:

$$H^3 = \frac{3\mu Q}{W\rho g \operatorname{sen} \alpha}$$

De este modo, si se considera una tasa eruptiva constante, se puede notar que una disminución en la pendiente del terreno por el que va bajando una colada de lava, generaría un aumento en la potencia de la misma. Por otro lado, se observa una relación directa entre la pendiente y la velocidad, por lo que, si se considera un espesor contante, a mayor pendiente la colada avanzará más rápido. Sin embargo, a pesar de que las observaciones en terreno y los datos para los espesores obtenidos en este trabajo ratifican el efecto de la pendiente indicado por la fórmula, no ha sido posible cuantificar numéricamente los cambios en el espesor, producto de variaciones en la pendiente. Esto posiblemente debido a que la ecuación de Jeffrey está formulada para comportamientos newtonianos, aunque de todas maneras ejemplifica el comportamiento de los flujos de lava.

A continuación se analizan los resultados obtenidos que se resumen en la Tabla 9, y se presentan las variaciones respecto a la edad relativa y a otros factores, en las figuras 59, 60, 61 y 62. En cada una de las siguientes secciones se discutirán los cambios de las dimensiones de las coladas y de los parámetros eruptivos encontrados en los flujos provenientes de cada centro eruptivo (Volcán Lonquimay y Cordón Fisural Oriental), así como también, las variaciones de estos valores observadas a lo largo de la evolución de cada uno de ellos, y de esta manera, poder especular como se ha ido desarrollando el Complejo Volcánico Lonquimay en el tiempo.

Tabla 9: Tabla resumen de las propiedades y parámetros eruptivos para todas las coladas en estudio. En color verde los valores calculados con el método CYSC, y en naranja los calculados con el método CRHB.

Colada	Edad relativa	Morfología principal	K (Pa s ⁿ)	YS (Pa)	Modelo Reológico	Tasa eruptiva máxima (m ³ s ⁻¹)	Velocidad máxima (m s ⁻¹)
LQ5-1b	5	bloques	2,81·10 ⁶	5,00·10 ⁵	CYSC	3,97	1,61·10 ⁻³
LQ5-1a	5	aa	3,21·10 ⁶	5,00·10 ⁵	CRHB	3,17	2,07·10 ⁻³
LQ5-2	5	aa	1,22·10 ⁴	2,12·10 ⁵	CYSC	0,626	2,67·10 ⁻³
LQ4	4	aa	7,48·10 ⁴	4,00·10 ⁵	CRHB	236	5,11·10 ⁻¹
LQ3	3	aa	6,91·10 ⁵	7,13·10 ⁵	CRHB	434	-
CFO1	6	aa	9,88·10 ⁶	1,00·10 ⁵	CRHB	258	5,03·10 ⁻²
CFO2	7	bloques	7,82·10 ⁵	3,00·10 ⁵	CYSC	14,8	1,49·10 ⁻³
VN	8	bloques	4,87·10 ⁵ *	3,00·10 ⁵ *	CYSC	156,94 **	3,96·10 ⁻² **

VN: Colada Volcán Navidad, K: Consistencia de las coladas, YS: *Yield Strength*, *: Valores obtenidos de Contreras (2013), **: Valores obtenidos de Naranjo *et al.* (1992). La edad relativa está representada con valores que van desde el 3 (coladas antiguas) al 8 (colada más joven).

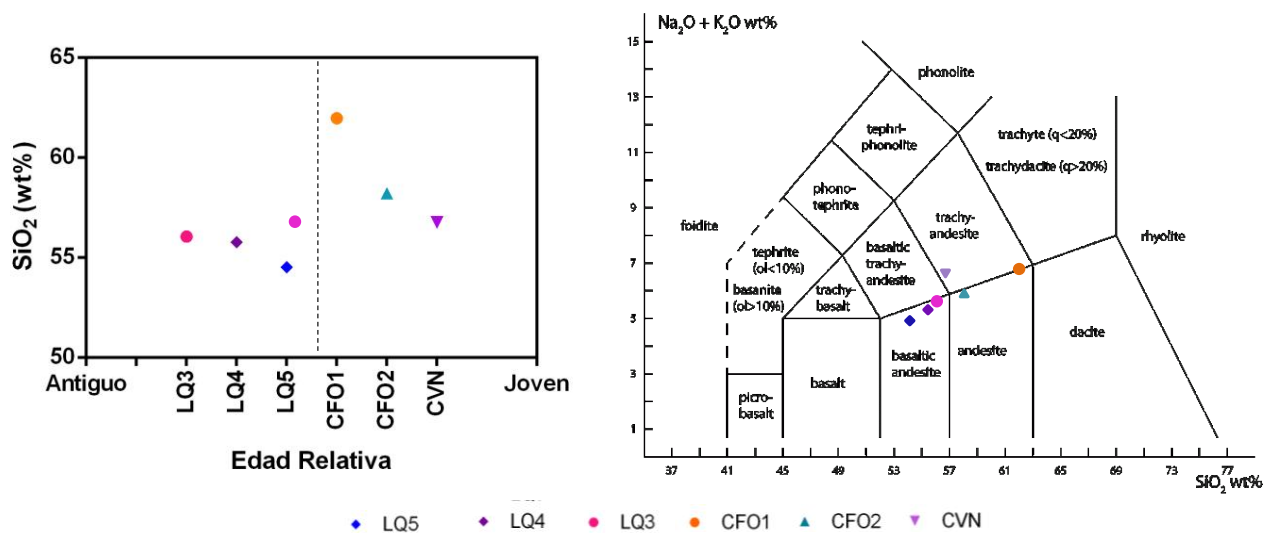


Figura 58: Gráfico del contenido de SiO₂ vs Edad relativa, y TAS (álcalis total vs sílice), para las coladas en estudio. En los gráficos se observa la escasa variación de las composiciones químicas en el CVL.

6.3.1 VOLCÁN LONQUIMAY

Como se mencionó en el Capítulo II, el Volcán Lonquimay se ha dividido en cinco unidades (Moreno *et al.*, 2012), de las cuales se han seleccionado cuatro coladas para analizar en este estudio: dos coladas de la Unidad Lonquimay 5 que corresponde a la unidad más joven, una colada de la Unidad Lonquimay 4, y una colada de la Unidad Lonquimay 3, que corresponde a la colada más antigua de este grupo de coladas.

En primer lugar, es importante notar cómo, de acuerdo a los gráficos de la Figura 58 y a la Tabla 2, las composiciones de las coladas de este centro eruptivo se mantienen casi estables en el tiempo: las concentraciones de sílice están en el intervalo entre 54,5% a 56% en peso, y todas las rocas corresponden a basaltos-andesitas. Del mismo modo las concentraciones de cristales también se mantienen casi invariables (Figura 39). Esto indicaría que la petrografía en el Volcán Lonquimay se ha mantenido constante en el tiempo. Por lo tanto, es muy probable que los cambios en la tasa eruptiva y la velocidad encontrados, dependan principalmente de otros factores.

A continuación, de acuerdo al estudio de los parámetros eruptivos para cada colada del Volcán Lonquimay, se obtienen las siguientes características:

La Colada LQ5-1, que se encuentra dividida en dos unidades, corresponde al grupo de las coladas de lava más jóvenes del Volcán Lonquimay. La Colada LQ5-1a, presenta una corta longitud (1.073 m), y se le ha calculado una baja la velocidad ($2,07 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$). Estos valores podrían deberse a su alta consistencia ($3,21 \cdot 10^6 \text{ Pa s}^n$) y *yield strength* ($5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), y a su baja tasa efusiva ($3,17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), junto con la baja duración del evento que la habría generado (13 días), y el bajo volumen emitido ($3,62 \cdot 10^{-3} \text{ km}^3$), que también habría generado su alto espesor (20 m). Esto último a pesar de encontrarse sobre una alta pendiente (25°). Aunque también, el bajo alcance podría haber sido influido por el enfriamiento: esto podría haber generado que la colada se detuviera a muy poco de avance, por lo que el material habría seguido emanando desde la fuente y se habría acumulado a lo largo de la colada, especialmente en el frente. Esto es consistente con la formación de la Colada LQ5-1b, como una colada efímera de primer orden. La Colada LQ5-1b, escurrió por una pendiente muy baja (7°), y presenta una tasa eruptiva similar a la colada parental ($3,97 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), además, se le ha calculado una consistencia de $2,81 \cdot 10^6 \text{ Pa s}^n$ (alta). Estos valores podrían ser las razones por las que presenta una muy baja velocidad ($1,61 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ máxima, $8,82 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ promedio), además, el flujo se habría demorado unos 100 días en recorrer tan solo 1.093 m de distancia. Otra observación corresponde a que el espesor de esta colada aumenta en su frente, debido a un cambio en la pendiente (Figura 33), y también lo que podría indicar que esta colada se detuvo producto del enfriamiento, y que la fuente siguió emanando material, que se fue acumulando en este sector

La Colada LQ5-2, también corresponde a la Unidad Lonquimay 5, del grupo de lavas más jóvenes del estratovolcán. Una de las particularidades de esta colada de lava, es que fue emitida desde el cráter principal del volcán, por lo que su cota de salida es de unos 2.730 m.s.n.m., y baja por una pendiente muy alta: 30° constantemente, excepto en su frente, donde disminuye a 20° . Por efectos de la pendiente, además de una tasa eruptiva, *yield strength* y consistencia bajas, de $6,26 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $2,12 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, y $1,22 \cdot 10^4 \text{ Pa s}^n$ respectivamente, es que se habrían generado bajos espesores (4 m) y corta longitud (1.294 m). Otro factor importante, es el bajo volumen de material que formó la colada: $4,37 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$, lo cual puede también haber afectado el largo de ésta, que como se explica en Guest *et al.* (1987), podría corresponder a una colada de lava limitada por el volumen.

La Colada LQ4, corresponde a la unidad de edad intermedia de las unidades estudiadas. Se le ha calculado una tasa eruptiva mayor a las coladas anteriores, de unos $2,36 \cdot 10^2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, pero menor a la de la Colada LQ3; además, presenta una baja consistencia ($7,48 \cdot 10^4 \text{ Pa s}^n$), y un *yield strength* medio ($4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), estos valores podrían haber contribuido al largo alcance de la colada (4.210 m), lo que también puede estar principalmente relacionado a su tasa eruptiva, y con el alto volumen eruptado ($4,42 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$). Además presenta una de las mayores velocidades del grupo de lavas, de unos $6,49 \cdot 10^{-1} \text{ m s}^{-1}$ promedio, y $5,11 \cdot 10^{-1} \text{ m s}^{-1}$ de velocidad máxima, y habría escurrido por una pendiente aproximada de 15° .

La Colada LQ3, corresponde a la colada de lava más antigua en estudio del Volcán Lonquimay. Como se mencionó en el Capítulo IV, para esta colada solo se dispone de una muestra cercana al frente del flujo, por lo que los resultados obtenidos para este caso representan el valor para la fase final del avance de la colada. A pesar de todo, ha sido posible obtener para esta colada la mayor tasa eruptiva de este centro eruptivo ($4,34 \cdot 10^2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), junto con el mayor volumen de este grupo ($1,45 \cdot 10^{-1} \text{ km}^3$), lo cual habría permitido su largo alcance (9.286 m). Por otro lado, no se observa una relación entre la pendiente y el largo, tampoco con el espesor de las coladas, que para este flujo ha sido calculado de unos 10 m, siendo la pendiente aproximada por la que habría bajado la colada de aproximadamente 5° .

A continuación, se presentan las observaciones realizadas sobre las variaciones de las dimensiones de las coladas, y de los parámetros eruptivos en el tiempo, para todas las unidades estudiadas del Volcán Lonquimay:

La tasa eruptiva, como se puede observar en la Figura 59 f, va disminuyendo a medida que las coladas se van haciendo más jóvenes: para la colada más antigua (Colada LQ3) se ha encontrado una tasa máxima de $4,34 \cdot 10^2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y para las coladas más jóvenes, que son la Colada LQ5-1 (a y b) y Colada LQ5-2, de $3,17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $3,97 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $6,26 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente. De esta misma manera varía el *yield strength* (desde $7,13 \cdot 10^5$ hasta $2,12 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) y el volumen (desde $1,45 \cdot 10^{-1}$ hasta $4,37 \cdot 10^{-4} \text{ km}^3$) (Figura 59 e y d), es decir, las coladas más antiguas son más volumétricas y tienen un mayor *yield strength* que las coladas más jóvenes. Asociado a estos valores, se tiene que el largo de las coladas va disminuyendo hacia las coladas más jóvenes (Figura

59b). Esta observación también es presentada en el trabajo de Carrasco-Nuñez (1997), donde se reconoce una variación en las condiciones de emplazamiento de las coladas de lava del Volcán Citlaltépetl (México). En este trabajo se identifica una mayor tasa eruptiva y mayores alcances de las coladas de las unidades más antiguas estudiadas, valores que van disminuyendo hacia las coladas más jóvenes. Junto con esto, reconoce una disminución en el volumen de las coladas, un aumento en el contenido de sílice, y una mayor preferencia de formación de coladas de lava compuestas. Incluso, han podido dividir las coladas en distintas fases eruptivas, y cada una de ellas además presenta variaciones en estos parámetros durante esos periodos.

Luego, se puede notar que las variaciones en la longitud de las coladas de lava tienen estrecha relación con algunos de los parámetros estudiados, como por ejemplo, las coladas tendrán mayor longitud si el evento eruptivo que las generó, emitió un mayor volumen a una mayor tasa eruptiva, por lo que parámetros como el volumen emitido, tasa eruptiva y duración del evento serán determinantes en las dimensiones de las coladas de lava. Igualmente importante es el efecto de la consistencia en el largo de las coladas: se observa que para las coladas más antiguas (Coladas LQ4 y LQ3) la consistencia es baja (entre $6,91 \cdot 10^5$ y $7,48 \cdot 10^4$ Pa sⁿ), por lo que no habría sido un impedimento para su avance; aunque, a la colada que proviene del cráter del volcán (Colada LQ5-2) también se le calculó una consistencia baja de $1,22 \cdot 10^4$ Pa sⁿ, y a pesar de esto, es la colada con el menor alcance de todo el grupo de lavas, por lo que en este caso habría primado el efecto del bajo volumen eruptado; caso contrario es la de la Colada LQ5-1 (ambas unidades), a la que se le calculó una consistencia mucho mayor que las demás coladas de este centro eruptivo ($3,21 \cdot 10^6$ y $2,81 \cdot 10^6$ Pa sⁿ), lo cual podría haber afectado al largo de estas coladas, que es de las menores del grupo. Otro factor que alcanzaría a influir el largo de las coladas es la pendiente, pero al igual que los resultados encontrados por Walker (1973), la pendiente no afectaría mayormente al largo de las coladas en estudio, pues, por ejemplo, para las coladas que bajaron por mayores pendientes (coladas LQ5-2 y LQ5-1a), sus largos son de los más bajos del grupo de lavas. A pesar de esto, la pendiente influiría en mayor proporción en el espesor de las coladas, tal como se presenta en Guest *et al.* (1987): como se observa en la Figura 31, Figura 34 y Figura 60b, a mayor pendiente menor espesor de colada; y se aprecia que para las coladas que presentan un aumento de espesor en sus frentes,

en la zona de dispersión (Coladas LQ5-1, LQ5-2, LQ4), esto se debería a una disminución de la pendiente en esas zonas. Incluso, se observa que tampoco existe una relación entre la pendiente y la velocidad que habrían alcanzado las coladas, como se aprecia en la Figura 60e, las coladas que avanzaron por pendientes mayores, no necesariamente habrían alcanzado las mayores velocidades. Otro caso es el *yield strength* que no presenta un comportamiento particular (Figura 61b), no presenta variaciones directas con el aumento o disminución de la longitud de las coladas de lava, por lo que su efecto en sus dimensiones no sería muy importante; por otro lado, el valor del *yield strength*, podría estar influenciado por la composición de las rocas: el contenido de sílice de las rocas va disminuyendo hacia las coladas más jóvenes, por lo que se relacionaría con una disminución en el *yield strength*. Es importante notar que, el cálculo del *yield strength* corresponde a uno de los errores sistemáticos que se presentan en la sección 6.6, por lo que los valores obtenidos pueden presentar ciertas variaciones que no se han podido evaluar. Aunque, se puede ver una relación entre el *yield strength* y la velocidad de las coladas, en general, las coladas con bajo *yield strength* habrían alcanzado velocidades mayores (Figura 62), con excepción de la Colada LQ4, que presenta la mayor velocidad alcanzada de este grupo de lavas, pero con un *yield strength* medio.

Al mismo tiempo, las variaciones observadas tanto en la tasa eruptiva, como en el volumen y el largo, se podrían explicar, en parte, de acuerdo a los trabajos de Stasiuk y Jaupart (1993), Stasiuk *et al.* (1997) y Pinel y Jaupart (2000). En los dos primeros se discute el efecto que puede generar el peso del material que se va sobreponiendo sobre el conducto eruptivo durante un evento efusivo. De acuerdo a estos trabajos, la acumulación del material de las coladas sobre el centro de emisión incrementa la presión sobre el mismo, y disminuye la tasa eruptiva, lo que al mismo tiempo, determinaría el volumen eruptado y el espesor de la colada. Esta observación se puede extender hacia la acumulación de material que va ocurriendo a medida que se va formando un edificio volcánico, lo cual ha sido presentado en el trabajo de Pinel y Jaupart (2000): mientras más material se va acumulando en superficie, mayor será la presión sobre la cámara magmática, y le será más difícil salir al material, por lo que la tasa eruptiva debería ir disminuyendo, incluso, la presión generada por un edificio volcánico, produce un umbral de densidad crítico, por encima del cual los magmas no

pueden ascender a la superficie, lo cual depende al mismo tiempo, de la profundidad de la cámara magmática. Este umbral de densidad es una función decreciente de la altura del edificio. Para alturas de edificio en el rango de 0 a 3.000 m, el umbral de densidad se extiende al rango de densidades de magmas naturalmente comunes (entre 2.700 y 2.300 Kg m⁻³). Con el tiempo, la diferenciación en una cámara magmática genera fluidos cada vez más evolucionados, con densidades decrecientes, lo que favorece la erupción. Sin embargo, el edificio crece simultáneamente en la superficie, lo que contrarrestaría este efecto (Pinel y Jaupart, 2000); así, a medida que el edificio volcánico se va construyendo, irá aumentando la presión sobre el reservorio, y por consiguiente, irán disminuyendo la tasa eruptiva, el volumen eruptado, y en consecuencia, el largo de colada. De esta manera, se esperaría encontrar mayores tasas eruptivas, volúmenes y largos para las coladas en las unidades más antiguas de un volcán (o unidades primitivas), y estos valores irían disminuyendo a medida que se forma el edificio volcánico, llegando a los menores valores en las unidades más jóvenes de un volcán.

Aplicando esta observación para las coladas de lava del Volcán Lonquimay, se puede notar que las coladas más antiguas, como la Colada LQ3, que se generaron cuando el edificio volcánico estaba en sus inicios de construcción, es decir, cuando era de tamaño reducido, se encuentran mayores tasas eruptivas, y con ello, mayores volúmenes de material extruido, y mayores largos de coladas; y a medida que el edificio va creciendo, o que se avanza en las unidades del volcán, la presión tendería a aumentar sobre la cámara magmática, disminuyendo los valores de la tasa eruptiva, volúmenes y largos de las coladas extruidas, hasta las unidades más jóvenes, que presentan los menores valores de todos aquellos parámetros (Colada LQ5-1 y Colada LQ5-2).

Por otro lado, la zona del CVL se encuentra en gran medida controlada por la ZFLO, por lo que esta presión que impide que se liberen los magmas por el conducto principal, puede estar produciendo que la salida de ellos se produzca por fracturas laterales, como es el sector del CFO, por donde han ocurrido las últimas erupciones del complejo.

6.3.2 CORDÓN FISURAL ORIENTAL

Para el Cordón Fisural Oriental se ha trabajado con dos coladas de lava: Colada CFO1 y Colada CFO2. Según Moreno *et al.* (2012) la Colada CFO2, que corresponde a la Unidad Lava de Bloques Río Lolco, es de edad Holoceno histórica, y la Colada CFO1, de la Unidad Conos, domos, lavas y cráteres de explosión, asignada al Holoceno, por lo se puede realizar una separación por edades, de tal modo que, la Colada CFO2 será más joven que la Colada CFO1. Junto a este par de coladas, se incluirán algunos datos de la erupción del Volcán Navidad (1988-89), obtenidos de Naranjo *et al.* (1992) y Contreras (2013), para lograr comparaciones más confiables.

Las coladas estudiadas del CFO presentan una petrografía muy uniforme. Las concentraciones de sílice de estos centros eruptivos, se encuentran en el rango 56,7% a 61,9% en peso, y todas las rocas corresponden al campo de las traquiandesitas-andesitas (Figura 58 y Tabla 2). Del mismo modo, las concentraciones de cristales también se mantienen bastantes constantes (Figura 39). Así, al igual que en el caso del Volcán Lonquimay, como la petrografía del CFO no ha sufrido grandes variaciones en el tiempo, ésta no sería la causa de las diferencias en los parámetros de los eventos eruptivos, sino, que serían otros factores los que explicarían las variaciones.

De esta forma, se reconocen diferencias en los parámetros encontrados para las coladas estudiadas:

A la Colada CFO1, se le ha calculado uno de los mayores espesores de todo el grupo de lavas: 27 m, esto es concordante con la alta tasa eruptiva encontrada ($258 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ máxima, y $84 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ promedio). Es importante recordar que esta colada se encuentra parcialmente cubierta por la colada del Volcán Navidad, así que solo ha sido estudiado un sector de ella, por lo que el depósito total de esta erupción podría haber sido mayor, esto sería la razón de que tanto el largo, como el volumen encontrados, son los menores de este centro eruptivo (1.704 m y $1,13 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$, respectivamente). Además, se le ha calculado una consistencia alta a esta colada ($9,88 \cdot 10^6 \text{ Pa s}^n$), lo cual es concordante con su alto valor en sílice (61% en peso); por otro lado, se ha calculado uno de los menores *yield strength* a esta colada (10^5 Pa), lo que junto a la alta pendiente por la que baja ($\sim 20^\circ$), podría haber favorecido la gran velocidad que alcanzó

el flujo ($5,03 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$), y por lo tanto, habría influido en el corto tiempo de avance de la colada (25 días).

La Colada CFO2, que se ha interpretado como la colada de edad intermedia en la comparación de este centro eruptivo, presenta los valores medios para casi todos los parámetros, comparados con la Colada CFO1 y la Colada del Volcán Navidad, esto es, un espesor de 22 m, un largo de 5.364 m, una consistencia de $7,82 \cdot 10^5 \text{ Pa s}^n$, y un *yield strength* de $3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Sin embargo, presenta una tasa eruptiva máxima mucho menor a la de las otras dos coladas ($14,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), pero su tasa promedio, de $6,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, se asemeja bastante a las otras, lo que sumado a la larga duración del evento que la habría generado, de unos 320 días, habría hecho posible que se haya generado una colada tan volumétrica ($1,44 \cdot 10^{-1} \text{ km}^3$). Es interesante notar que esta colada mantiene un espesor bastante uniforme en casi todo su largo, esto debido al encausamiento que habría sufrido al bajar por el valle del Río Lolco, y también, por coladas anteriores que habrían generado un efecto de muralla en su lado occidental, junto que la pendiente del terreno por la cual descendió es baja y constante (4°).

Dentro de este centro eruptivo, también se logra apreciar una secuencia evolutiva en los parámetros eruptivos encontrados: se puede notar que tanto la longitud, como el volumen y el *yield strength* de las coladas aumentan con el tiempo: 1.704-10.200 m; $1,13 \cdot 10^{-2}$ - $2,30 \cdot 10^{-1} \text{ km}^3$; $1 \cdot 10^5$ - $3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, respectivamente (Figuras 59 b, d y e). Por otro lado, el espesor (27-18 m), la consistencia ($9,88 \cdot 10^6$ - $4,87 \cdot 10^5 \text{ Pa s}^n$), y la tasa eruptiva ($258,3$ - $156,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) irían disminuyendo a medida que las lavas son más jóvenes (Figuras 59 a, c y f). Así, las coladas de lava más jóvenes serían más volumétricas y largas que las coladas más antiguas. De esta manera, se vuelve a encontrar una relación estrecha entre la tasa eruptiva, volumen y largo de las coladas, esto es, a mayor tasa eruptiva se presentan mayores volúmenes y largos, junto con que para las coladas más volumétricas (Colada CFO2 y Colada del Volcán Navidad) se han encontrado duraciones de eventos muy superiores a las demás coladas en estudio, de unos 300 días; al mismo tiempo, la consistencia también va disminuyendo acorde van aumentando los largos de las coladas de lava, lo que nos indicaría que ambas presentan la relación inversa esperada. Por otro lado, el *yield strength* no presenta un comportamiento particular que indique su ofrecería sobre las dimensiones finales de las

coladas (o podría ser producto de errores en el cálculo de su valor, como se mencionó anteriormente), aunque, podría existir una relación con la velocidad alcanzada, a menor *yield strength*, mayores velocidades (Figura 62). Finalmente, en el caso de este centro eruptivo, se tiene que el efecto de la pendiente no es muy notorio, ya que las tres coladas que se encuentran en comparación, fueron encausadas tanto por el valle del Río Lolco, como por coladas de lava anteriormente depositadas, por lo que los espesores encontrados se ven determinados principalmente por este efecto, más que por la pendiente por la que se movió el flujo. Incluso, la Colada CFO1 presenta un alto espesor, a pesar de la alta pendiente por la que bajó el flujo.

6.3.3 EVOLUCIÓN DEL COMPLEJO VOLCÁNICO LONQUIMAY

En esta sección, se realiza la comparación entre las variaciones de ambos centros eruptivos (Volcán Lonquimay y CFO), ya que, de acuerdo a los datos obtenidos se observa una secuencia evolutiva entre ambos.

Como se ha expuesto en las secciones anteriores, la petrografía de este Complejo Volcánico Lonquimay se ha mantenido casi uniforme en el tiempo (Figura 58 y Tabla 2), con variaciones en las concentraciones de sílice de entre 54,5-61,9 wt% y contenidos cristalinos muy uniformes (Figura 39). Por lo que, como se ha comentado anteriormente, las variaciones en los parámetros eruptivos del complejo volcánico, estarían dado por factores diferentes a la petrografía.

Resumiendo los apartados anteriores, para el Volcán Lonquimay se ha obtenido que tanto la tasa eruptiva, volumen y largo de las coladas ha ido disminuyendo en el tiempo, y esto de debería principalmente al efecto de la masa del material que se ha acumulado sobre la cámara magmática durante la formación del edificio volcánico actual. Por otro lado, se tiene que para el CFO, estas mismas variables (tasa eruptiva, volumen y largo) han ido aumentando en el tiempo.

Es importante notar que, si bien la última unidad correspondiente al volcán principal corresponde al Holoceno tardío, las últimas erupciones del complejo volcánico han ocurrido desde el CFO, pues la mayoría de ellas se reconocen como Holoceno histórico (Moreno *et al.*, 2012). Se puede ver que la actividad eruptiva del complejo

volcánico se ha ido extendiendo hacia el sector fisural encontrado al este del volcán principal.

Por lo tanto, se observa una estrecha relación entre los argumentos expuestos en Stasiuk y Jaupart (1993), Stasiuk *et al.* (1997), y Pinel y Jaupart (2000), y lo que ocurre en el CVL: el peso generado sobre la cámara magmática del Volcán Lonquimay habría ido aumentando en el tiempo, consecuentemente, las tasas eruptivas, volúmenes y largos de las coladas generadas habrían ido disminuyendo, hasta que la presión litostática ejercida sobre la cámara hace muy difícil el ascenso del magma a través del conducto principal, por lo que estarían siendo aprovechadas antiguas fracturas laterales para el ascenso del magma, esto es, por el sector del CFO, que se encuentra controlado por la ZFLO; incluso, las presiones en el sector del CFO son mínimas, ya que la zona cuenta con múltiples salidas para las lavas, y el volumen de los conos que ya están formados no generan presiones tan importantes como un estratovolcán entero; producto de esto se encuentra que las tasas, volúmenes y largos de colada han ido aumentando en el tiempo, en este sector del CVL.

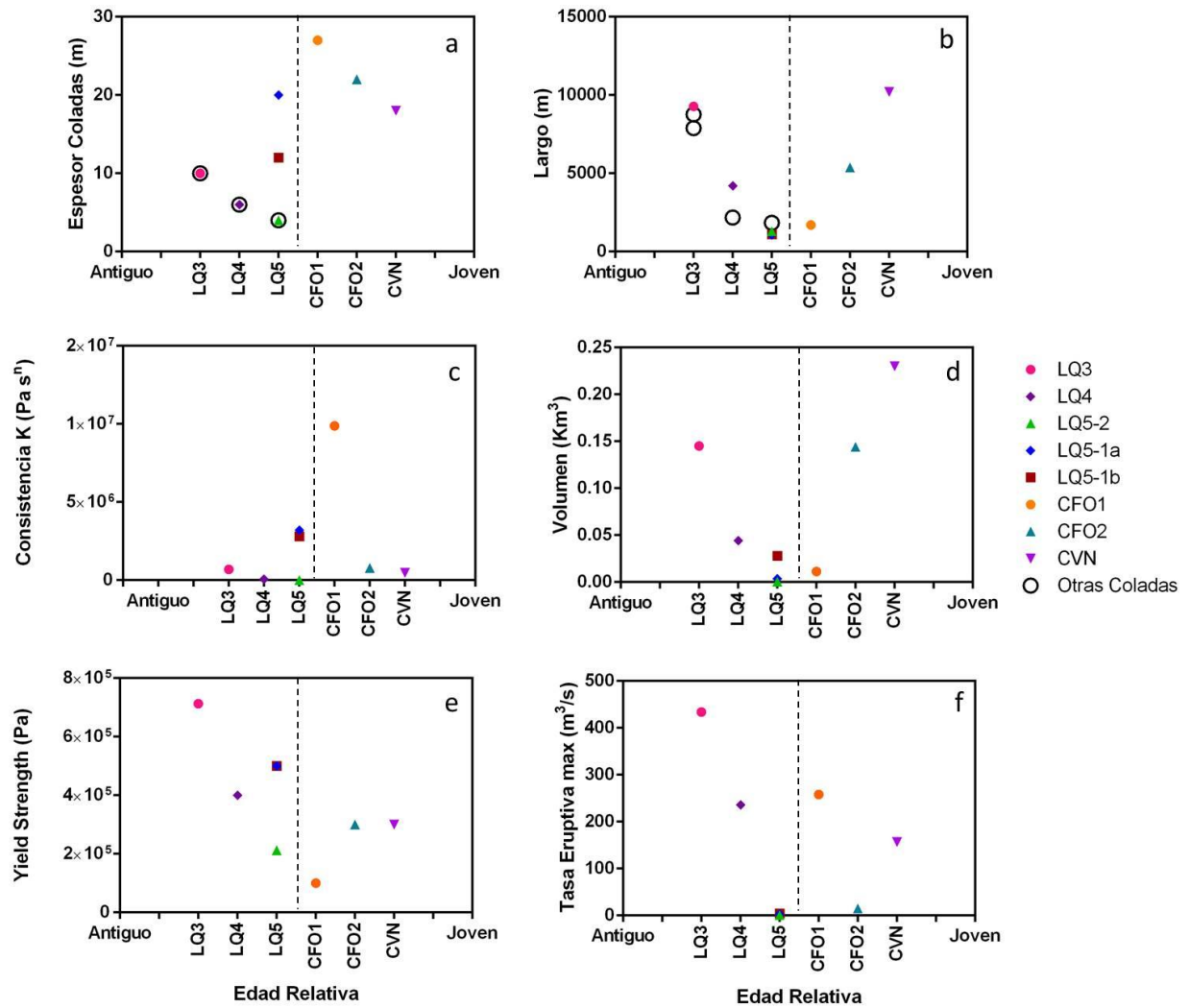


Figura 59: Gráficos de las variaciones, con respecto a la edad relativa, de: (a) Espesor. (b) Largo. (c) Consistencia. (d) Volumen. (e) *Yield strength*. (f) Tasa eruptiva. La línea punteada indica la separación entre los centros eruptivos: Volcán Lonquimay y Cordón Fisural Oriental

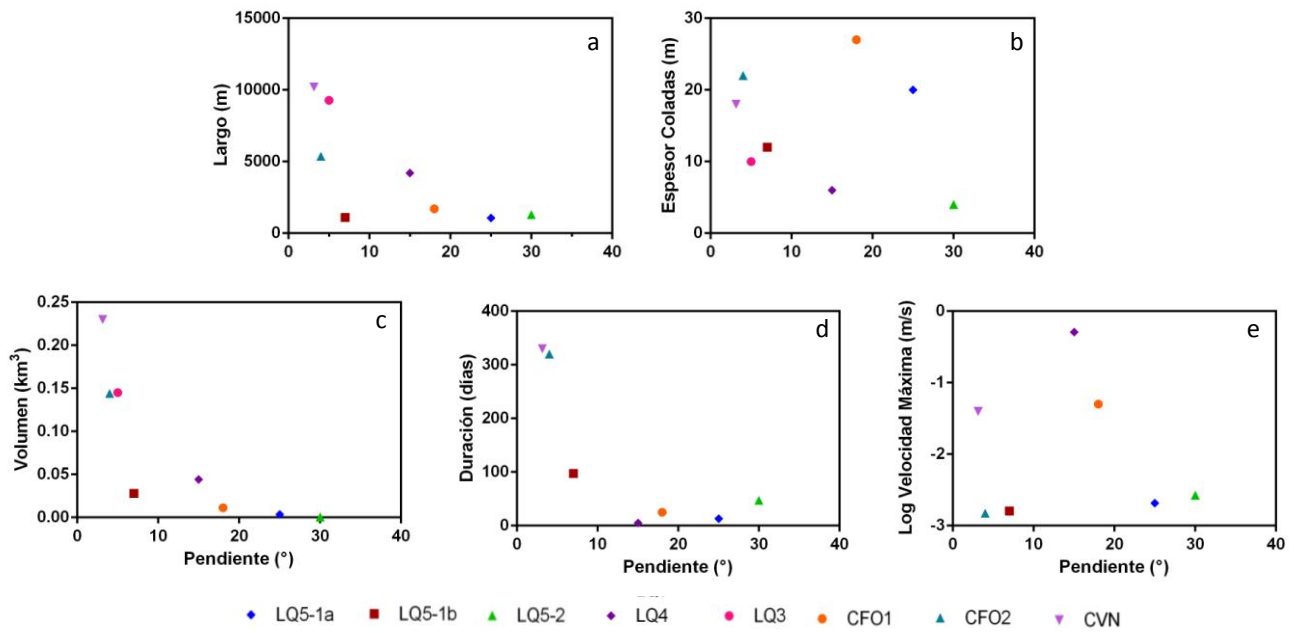


Figura 60: Gráficos de las variaciones, con respecto a la pendiente, de: (a) Largo. (b) Duración. (c) Volumen. (d) Espesor.

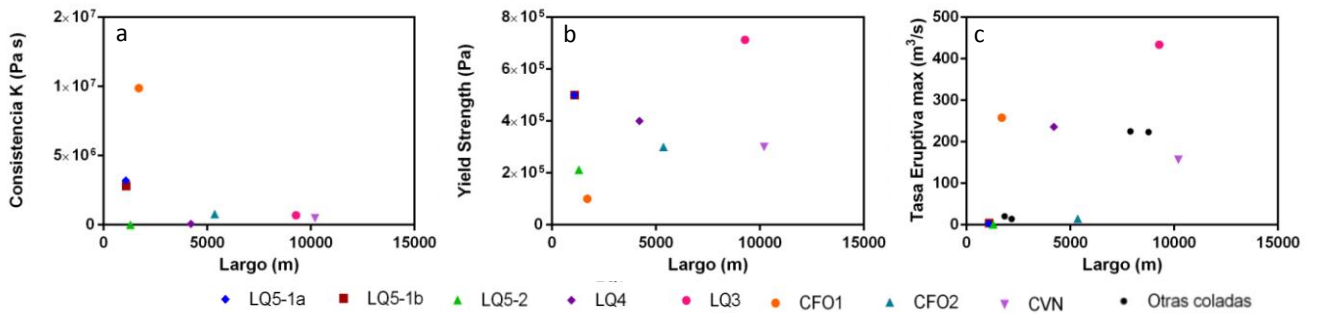


Figura 61: Gráficos de las variaciones, con respecto a la longitud, de: (a) Consistencia. (b) Yield Strength. (c) Tasa eruptiva.

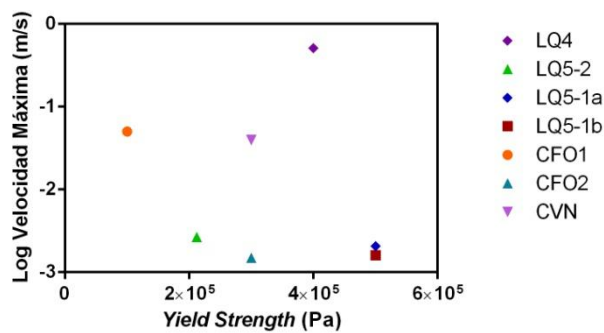


Figura 62: Gráfico Velocidad Máxima vs Yield Strength.

6.4 REPRESENTATIVIDAD DE LAS COLADAS ESTUDIADAS

En esta sección, se discutirá cuan representativas son las coladas de lava escogidas para este estudio. Para esto, se realizó una comparación entre las dimensiones, las longitudes y anchos de las coladas de lava, tanto de las analizadas en este trabajo, como de otras que fueron medidas a partir de imágenes satelitales. También se efectuó una comparación de las tasas eruptivas encontradas en este trabajo, y las tasas eruptivas encontradas para las otras coladas del volcán, que si bien no fueron estudiadas en terreno, han sido aproximadas con el Método de Graetz. Este ejercicio se ha realizado solo para coladas del Volcán Lonquimay, ya que las coladas del CFO se encuentran cubiertas por flujos posteriores, lo que impide medir sus dimensiones en las imágenes satelitales.

Los resultados de esta comparación se presentan en las Figuras 56, 59 a y b y 61 c. Si se analizan las variaciones para las unidades más antiguas se puede notar que las tasas eruptivas han sido subestimadas por el Método de Graetz, ya que, como se mencionó anteriormente, este modelo solo obtiene valores promedio para estos parámetros eruptivos. De cualquier modo, es notorio que los valores para las tasas eruptivas van disminuyendo a medida que las coladas se van haciendo más jóvenes (Figura 56). Asimismo, se observa un comportamiento idéntico sobre los largos de colada: se van haciendo menores hacia las coladas más jóvenes. Por otro lado, dentro de una misma unidad, los anchos y espesores de las coladas se mantienen bastante constantes, como se presenta en las Figuras 59 a y b, por lo que los volúmenes serían similares para las coladas de una misma unidad; de esta manera, el volumen de las unidades también se comportaría del mismo modo discutido en la sección anterior, es decir, iría disminuyendo a medida que las coladas son más jóvenes.

En suma, se confirmaría que las coladas seleccionadas para este estudio, representarían bien el comportamiento de las distintas unidades del Volcán Lonquimay.

6.5 COROLARIO

Luego del estudio realizado a las coladas del CVL, se puede notar que la aplicación de este análisis dimensional a la formación de coladas de lava, se puede incorporar al estudio de peligros volcánicos de esta zona volcánica. Si bien las coladas de lava no representan mayor peligro para las personas, si lo son para los bienes inmuebles, por lo que este estudio también podría ser integrado las planificaciones para las urbes del sector.

Las zonas pobladas más cercanas al CVL corresponden al pueblo de Malalcahuello, a unos 12 km del cráter principal, y a unos 16 km del Volcán Navidad; y a la ciudad de Lonquimay, a unos 12 km de la zona del CFO; asimismo, se encuentran dos fundos importantes en este sector: el Fundo Lolco y el Fundo Laguna Blanca, a unos 18 y 12 km de distancia del Volcán Navidad y del Volcán Lonquimay, respectivamente.

A partir de los resultados encontrados para el CVL, se puede notar que desde el Volcán Lonquimay, la formación de nuevas coladas de lava es muy poco probable, incluso, si se generaran, éstas deberían formar flujos de muy baja longitud, cercanas a 1 km de largo, con volúmenes eruptados cercanos a los $0,02 \text{ km}^3$, donde los eventos que las pudieran generar alcanzarían tasas eruptivas cercanas a $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Por otro lado, las últimas coladas de lava de CVL han sido emitidas por el CFO, y éstas han sido de gran longitud y de gran volumen, por lo que se esperaría que si nuevas coladas de lava se generaran desde este sector, ellas alcanzarían longitudes de entre 5 y 10 km, con volúmenes de alrededor de $0,1 \text{ km}^3$ y tasas eruptivas de hasta $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Así, el sector del CVL que podría generar peligros para los pueblos sería el CFO. Sin embargo, los sectores poblados se encuentran a distancias mayores, por lo que sería poco probable que coladas de lava afectaran bienes inmuebles en el área. Es mucho más factible que si nuevas erupciones generan piroclastos, éstos sean los que produzcan los mayores daños, tal como la erupción que generó el Volcán Navidad, que si bien no produjo ninguna pérdida humana, sus depósitos de cenizas causaron la muerte de ganado y aves de corral (Moreno & Gardeweg, 1989).

6.6 COMENTARIOS FINALES

Al aplicar el análisis dimensional propuesto a las coladas no históricas del CVL, se reconoce un buen ajuste de los parámetros eruptivos calculados con los valores esperados para coladas de lava de estas características (Tabla 7). Esto se ha podido corroborar al comparar los resultados encontrados con los de otras lavas de similares características estudiadas con este u otro modelo (por ejemplo, Carrasco-Nuñez, 1997; Castruccio, 2010; Castruccio *et al.*, 2013), y con coladas históricas donde sus características de avance fueron bien documentadas (como por ejemplo Moreno y Gardeweg, 1989; Calvari *et al.*, 2002; Favalli *et al.*, 2010).

Por otro lado, relacionado a los cálculos de varios parámetros utilizados en el modelo, se encuentran errores sistemáticos asociados, como son los relacionados al cálculo de la temperatura, el cual podría ser mejorado con un geotermómetro más preciso, si la asociación mineralógica lo permite; errores asociados al cálculo del *yield strength*, ya que su valor utilizado en el modelo depende principalmente de la decisión de cuál es el más preciso para definir el movimiento del flujo de lava, por lo que podrían realizarse trabajos que caractericen de mejor manera el comportamiento de este factor en los movimientos de lava, para poder determinar de mejor manera su valor. También se encuentran errores asociados a la elección del valor del empaquetamiento máximo cristalino, para el cual, si bien se han realizado variados trabajos para comprender su comportamiento, ha sido muy difícil de cuantificar, por lo que actualmente no es posible mejorar la elección sobre su valor.

Del mismo modo, la decisión sobre cual reología caracteriza mejor a las coladas de lava, en algunos casos puede resultar ser complicada, ya que puede suceder que los datos obtenidos para alguna colada ajusten con más de uno de los modelos propuestos. En este caso, para confirmar la metodología a utilizar, sería necesario aplicar alguna, o más de una, de las técnicas que se presentaron en la sección 6.2 de este trabajo.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

A partir de la morfología, dimensiones y petrografía de coladas de lava antiguas, es posible extraer las condiciones de flujo que hubo durante la erupción que generaron estos productos volcánicos. Con un estudio detallado a distintas distancias de la fuente de cada colada, es posible, no solo obtener los valores promedio, sino las variaciones en el tiempo de estos parámetros. En este estudio se trabajó con 6 coladas de lava pertenecientes al Complejo Volcánico Lonquimay, en ellas se aplicó una metodología de análisis dimensional para flujos de tipo Herschel-Bulkley, con el cual se pudo obtener los parámetros eruptivos de las eventos que las generaron.

Para el Volcán Lonquimay, se ha trabajado con coladas de lava provenientes a 3 de las 5 unidades del volcán (unidades descritas en Moreno *et al.*, 2012). Para la unidad más antigua estudiada, Unidad Lonquimay 3, se han estudiado los productos de una colada (LQ3), que descendió por el flanco sur del volcán, por unos 9.300 m, para ella se han obtenido valores de la tasa eruptiva máxima de $433,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, volumen eruptado de unos $0,15 \text{ km}^3$, con una consistencia de $6,9 \cdot 10^5 \text{ Pa s}^n$ y un *yield strength* de $7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Luego, la colada de la Unidad Lonquimay 4 estudiada, presenta valores intermedios para la mayoría de los parámetros, con una tasa eruptiva promedio de $124 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, un volumen eruptado de $0,04 \text{ km}^3$, con una consistencia de $7,5 \text{ Pa s}^n$ y un *yield strength* de $4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, lo cual habría generado que la colada alcanzara los 4.200 m de longitud en unos 5 días. Las coladas de lava más jóvenes estudiadas del estratovolcán principal provienen de la Unidad Lonquimay 5, para ellas se han calculado los menores valores para los parámetros eruptivos: para la colada LQ5-1 que corresponde a una colada compuesta, se han calculado tasas eruptivas promedio entre $2,7$ y $1,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y máxima de alrededor de $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el volumen eruptado es de entre $0,02$ y $0,003 \text{ km}^3$ de material, con una consistencia promedio de entre $3,21 \cdot 10^6$ y $2,81 \cdot 10^6 \text{ Pa s}^n$, y un *yield strength* de $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, para ellas se ha calculado un tiempo de avance de unos 13 y 97 días para cada unidad (LQ5-1a y LQ5-1b, respectivamente) para alcanzar la longitud final de cada una de ellas, de 1 km aproximadamente. Además, el avance de ellas habría estado controlado por el enfriamiento que habrían sufrido durante su movimiento, por lo esta razón habrían avanzado una corta distancia, pero el material habría seguido emanando de la fuente, por lo que presentan un alto espesor (20 y 12 m

respectivamente). Por otro lado, en el Cordón Fisural Oriental se estudiaron dos coladas de lava, la CFO1 y CFO2, donde las tasas eruptivas promedio obtenidas se encuentran en el rango $84\text{-}6\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ respectivamente, el volumen emitido de $0,01$ y $0,14\text{ km}^3$ para cada una, y la consistencia y el *yield strength*, entre $9,8\cdot 10^6$ y $7,82\cdot 10^5\text{ Pa s}^n$, y $1\cdot 10^5$ y $3\cdot 10^5\text{ Pa}$, respectivamente. Estas coladas de lava se habrían emplazado en 25 y 320 días cada una, y alcanzaron longitudes de 1.700 y 5.400 m respectivamente.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede apreciar que las dimensiones de las coladas de lava se encuentran principalmente determinadas por la tasa eruptiva, lo que confirmaría las conclusiones de Walker (1973), y por el volumen emitido por el centro eruptivo (Guest *et al.*, 1987). De esta manera, si un evento eruptivo presenta una alta tasa eruptiva, generando grandes volúmenes de material, se producirá una colada de lava de gran longitud.

Estos dos factores principales se encuentran vinculados también con las duraciones de los eventos eruptivos y con el enfriamiento de la colada de lava. Por ejemplo, si se tiene una alta tasa eruptiva pero durante un tiempo corto, se tendrá menor volumen que un evento de baja tasa eruptiva pero con una duración lo suficientemente mayor. Por otro lado, si el enfriamiento es importante, entonces la colada no avanzará tanto, aunque el material siga surgiendo de la fuente, y en este caso se generaría una colada potente, de corta longitud, pero que debido a la acumulación de material, se podría generar una colada de lava compuesta.

Junto con estos factores, otras características de las coladas de lava impondrán efectos sobre las dimensiones finales de las coladas, aunque en menor medida, ellos son: la consistencia y la pendiente. La consistencia actuaría sobre la longitud final de las coladas, se comporta como un impedimento al avance del flujo, por lo que a mayores consistencias de las lavas, se encuentran menores longitudes. La pendiente, si bien no sería de gran importancia en la longitud de las coladas, si tendría influencia en los espesores: a mayor pendiente, se tendrían menores espesores, y si ésta pendiente baja, el espesor de la colada aumentaría. Por otro lado, los valores de *yield strength* obtenidos no indican relación directa con las dimensiones de las coladas de lava, pero si tendría sobre la velocidad que alcanzan: a menor *yield strength* se encuentran mayores velocidades para las coladas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede apreciar que las variaciones de los parámetros eruptivos y de las dimensiones de las coladas de lava, presentan una evolución en el tiempo para el Complejo Volcánico Lonquimay. Las coladas de lava provenientes del cono principal del Volcán Lonquimay presentan un acortamiento progresivo en el largo de las coladas, y una disminución en los volúmenes emitidos. Mientras que las coladas provenientes del Cordón Fisural Oriental presentan volúmenes, largos y tasas eruptivas considerablemente mayores, siendo las coladas de este último, las más jóvenes.

Se especula que el factor que habría causado las variaciones de los parámetros es la presión que va ejerciendo la masa de material volcánico que se va acumulando sobre la cámara magmática, debido a la formación del estratovolcán (Stasiuk y Jaupart, 1993; Stasiuk *et al.*, 1997; Pinel y Jaupart, 2000). Así, se puede observar en que las coladas más antiguas alcanzan tasas eruptivas, volúmenes y largos mayores que las unidades más jóvenes. De esta forma, a la Colada LQ3 (Unidad Lonquimay 3) le habría sido mucho más fácil ser emitida por el conducto eruptivo, por lo que presenta la mayor tasa eruptiva, largo y volumen del conjunto de coladas. Mientras que, por ejemplo, la Colada LQ5-2 (Unidad Lonquimay 5), que sale por el cráter actual, presenta la menor tasa eruptiva, volumen y espesor de todo el conjunto de lavas. Debido a estas presiones sobre la cámara magmática, es que actualmente le sería muy difícil emitir material volcánico por el conducto principal del volcán, por lo que la actividad reciente del complejo volcánico ocurriría en el Cordón Fisural Oriental (CFO), donde las presiones producto de material acumulado en superficie es baja. Además, esto es favorecido por el marco tectónico del sector, ya que el CFO estaría controlado por la Zona de Falla Liquine-Ofqui. Por lo tanto, las tasas eruptivas, volúmenes y largos de coladas, emitidas desde el CFO, presentan valores mucho mayores que las últimas etapas del Volcán Lonquimay.

REFERENCIAS

- Applegarth, L., Pinkerton, H., James, M., Calvari, S. (2010). Morphological complexities and hazards during the emplacement of channel-fed aa lava flow fields: A study of the 2001 lower flow field on Etna. *Bulletin of Volcanology*, 72 (6): 641-656.
- Balmforth, N. J., Craster, R. V. (2000a). Dynamics of cooling domes of viscoplastic fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 422: 225-248.
- Balmforth, N., Burbidge, A., Craster, R. V., Salzig, J., Shen, A. (2000b). Visco-plastic models of isothermal lava domes. *Journal of Fluid Mechanics*, 403: 37-65.
- Balmforth, N. J., Craster, R. V., Sassi, R. (2002). Shallow viscoplastic flow on an inclined plane. *Journal of Fluid Mechanics*, 470: 1-29.
- Blake, S., Bruno, B. (2000). Modelling the emplacement of compound lava flows. *Earth and Planetary Science Letters*, 184: 181-197.
- Borgia, A., Linneman, S., Spencer, D., Morales, L., Brenes, J. (1983). Dynamics of lava flow fronts, Arenal Volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 19 (3-4): 303-329.
- Calvari, S., Pinkerton, H. (1998). Formation of lava tubes and extensive flow field during the 1991-1993 eruption of Mount Etna. *Journal of Geophysical Research*, 103 (B11): 27291–27301.
- Calvari, S., Neri, M., Pinkerton, H. (2002). Effusion rate estimations during the 1999 summit eruption on Mount Etna, and growth of two distinct lava flow fields. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119 (1-4): 107-123.
- Carrasco-Nuñez, G. (1997). Lava flow growth inferred from morphometric parameters: a case study of Citlaltépetl volcano, Mexico. *Geological Magazine*, 134 (2): 151-162.
- Castruccio, A. (2012). Rheology and dynamics of lava flows. Ph.D. Thesis, University of Bristol, 150 p.
- Castruccio, A., Rust, A. C., Sparks, R. S. (2013). Evolution crust- and core-dominated lava flows using scaling analysis. *Bulletin of Volcanology*, 75: DOI 10.1007/s00445-012-0681-2.
- Cembrano, J., Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics*, 471: 96-113.
- Contreras, M. A. (2013). Dinámica de flujos de lava históricos de los volcanes Lonquimay y Villarrica, Andes del Sur, Chile. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile. En preparación.
- Dragoni, M., Tallarico, A. (1996). A model for the opening of ephemeral vents in stationary lava flow. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 74 (1-2): 39-47.

- Favalli, M., Harris, A., Fornaciai, A., Pareschi, M., Mazzarini, F. (2010). The distal segment of Etna's 2001 basaltic flow. *Bulletin of Volcanology*, 71 (1): 119-127.
- Flink, J., Griffiths, R. (1992). A laboratory analog study of the surface morphology of lava flows extruded from point and line sources. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 54 (1): 19-32.
- Giordano, D., Russell, J. K., Dingwell, D. B. (2008). Viscosity of Magmatic Liquids: A Model. *Earth & Planetary Science Letters*, 271 (1-4): 123-134.
- Griffiths, R. (2000). The dynamics of lava flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32: 477-518.
- Griffiths, R., Flink, J. (1993). Effects of surface cooling on the spreading of lava flows and domes. *Journal of Fluid Mechanics*, 252: 667-702.
- Guest, J. E., Kilburn, C. R., Pinkerton, H., Duncan, A. M. (1987). The evolution of lava flow-fields: observations of the 1981 and 1983 eruptions of Mount Etna, Sicily. *Bulletin of Volcanology*, 49 (3): 527-540.
- Guilbaud, M., Thordarson, T., Blake, S. (2005). Morphology, surface structures, and emplacement of lavas produced by Laky, A.D. 1783-1784. *Geological Society of America Special Papers*, 396: 81-102.
- Harris, A. J., Rowland, S. K. (2009). Effusion rate controls on lava flow length and the role of heat loss: a review. *Studies in Volcanology: The Legacy of George Walker. Special Publications of IAVCEI*, 2: 33-51.
- Herschel, W. H., & Bulkley, R. (1926). Konsistenzmessungen von Gummi-Benzol-Lösungen. *Kolloid-Zeitschrift*, 39:, 291–300.
- Hulme, G. (1974). The interpretation of lava flow morphology. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 39 (2): 361-383.
- Hulme, G., Fielder, G. (1977). Effusion rates and rheology of lunar lavas. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 285 (1327): 227-234.
- Huppert, H., Shepherd, J., Sigurdsson, H., Sparks, R. (1982). On lava dome growth, with application to the 1979 lava extrusion of the Soufrière of St. Vincent. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 14 (3-4): 199-222.
- Ishibashi, H. (2009). Non-Newtonian behavior of plagioclase-bearing basaltic magma: Subliquidus viscosity measurement of the 1707 basalt of Fuji volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 181 (1-2): 78-88.
- Johnson, A. (1970). *Physical processes in Geology*. Freeman, Cooper & Company. 577 p.
- Kerr, R. C., Lyman, A. W. (2007). Importance of surface crust strength during the flow of the 1988–1990 andesite lava of Lonquimay Volcano, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 112 (B3), DOI: 10.1029/2006JB004522.

- Lipman, P., Banks, N. (1987). Aa flow dynamics, Mauna Loa. USGS Professional Paper 1350: 1527-1567.
- López-Escobar, L., Cembrano, J., Moreno, H. (1995). Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37°-46°S). *Revista Geológica de Chile*, 22 (2): 219-234.
- Lyman, A. W., Kerr, R. C., Griffiths, R. W. (2005). Effects of internal rheology and surface cooling on the emplacement of lava flows. *Journal of Geophysical Research*, 110 (B8), DOI: 10.1029/2005JB003643.
- Macdonald, G. (1953). Pahoehoe, aa, and block lava. *American Journal of Science*, 251: 169-191.
- Mader, H. M., Llewellyn, E. W., Muller, S. P. (2013). The reology of two-phase magmas: A review and analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257: 135-158.
- Malin, M. (1980). Lengths of Hawaiian lava flows. *Geology*, 8: 306-308.
- Marsh, B. D. (1981). On the crystallinity, probability of occurrence, and rheology of lava and magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78 (1): 85-98.
- Moreno, H., Gardeweg, M. (1989). La erupción reciente en el Complejo Volcánico Lonquimay (Diciembre, 1988-), Andes del Sur. *Revista Geológica de Chile*, 16 (1): 93-117.
- Moreno, H., Naranjo, J., & Polanco, E. (2012). Geología del Complejo Volcánico Lonquimay-Tolguaca. Regiones de la Araucanía y del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica, 1 mapa escala 1:50.000. En edición.
- Mueller, S., Llewellyn, E. W., Mader, H. M. (2009). The reology of suspensions of solid particles. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466 (2116): 1201-1228.
- Naranjo, J., Sparks, R., Stasiuk, M., Moreno, H., Ablay, G. (1992). Morphological, structural and textural variations in the 1988-1989 andesite lava of Lonquimay Volcano, Chile. *Geological Magazine*, 129 (6): 657-678.
- Niemeyer, H., Muñoz, J. (1983). Hoja Laguna de la Laja, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, n°57, 1 mapa escala 1:250.000, 52 p.
- Petit-Breuilh, M. E. (1996). Cronología eruptiva histórica de los volcanes Planchón-Peteroa y Copahue, Andes del Sur. Proyecto de Riesgo Volcánico (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Pinel, V., Jaupart, C. (2000). The effect of edifice load on magma ascent beneath a volcano. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358 (1770): 1515-1532.

- Pinkerton, H., Sparks, R. S. (1976). The 1975 sub-terminal lavas, Mount Etna: a case history of the formation of a compound lava field. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1 (2): 167-182.
- Pinkerton, H., Stevenson, R. J. (1992). Methods of determining the rheological properties of magmas at sub-liquidus temperatures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53 (1-4): 47-66.
- Pinkerton, H., Wilson, L. (1994). Factors controlling the lengths of channel-fed lava flows. *Bulletin of Volcanology*, 56 (2): 108-120.
- Polanco, E. (1998). Volcanismo explosivo postglacial de la cuenca del alto Biobío, Andes del Sur (37°45' – 38°30'). Memoria de Título (Inédito), Departamento de Geología, Universidad de Chile. 120 p.
- Polanco, E. (2000). Volcanismo explosivo Holoceno en la Cuenca del Alto Biobío, Andes del Sur (37°45'-38°30'S). *Actas IX Congreso Geológico Chileno*, Puerto Varas: 59-61.
- Polanco, E. (2010). Volcanoestratigrafía, geoquímica y peligro volcánico del Volcán Lonquimay (38°30'S), Andes del Sur (Chile). Tesis de Doctorado. Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona.
- Putirka, K. (2008). Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69 (1): 61-120.
- Robson, G. (1967). Thickness of Etnean lavas. *Nature*, 216: 251–252.
- Savov, I., Luhr, J., Navarro-Ochoa, C. (2008). Petrology and geochemistry of lava and ash erupted from Volcán Colima, Mexico, during 1998–2005. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 174 (4): 241–256.
- Shaw, H. (1965). Comments on viscosity, crystal settling, and convection in granitic magmas. *American Journal of Science*, 263: 120-152.
- Shaw, H. (1969). Rheology of basalt in the melting range. *Journal of Petrology*, 10 (3): 510–535.
- Sparks, R., Pinkerton, H. (1978). Effect of degassing on rheology of basaltic lava. *Nature*, 276: 385-386.
- Sparks, R., Pinkerton, H., Hulme, G. (1976). Classification and formation lava levées on Mount Etna, Sicily. *Geology*, 4: 269-271.
- Stasiuk, M., Jaupart, C. (1997). Lava flow shapes and dimensions as reflections of magma system conditions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 78 (1-2): 31-50.
- Stasiuk, M., Jaupart, C., Sparks, R. S. (1993). On the variations of flow rate in non-explosive lava eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 114 (4): 505-516.
- Suárez, M., Emparán, C. (1997). Hoja Curacautín, Regiones de la Araucanía y del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, n° 71, 1 mapa escala 1:250.000. 105 p.

- Takagi, D., Huppert, H. (2010). Initial advance of long lava flows in open channels. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 195 (2-4): 121–126.
- Thiele, R., Lahsen, A., Moreno, H., Varela, J., Vergara, M., Munizaga, F. (1987). Estudio geológico regional a escala 1:100.000 de la hoya superior y curso medio del río Biobío. Informe para la empresa nacional de electricidad, convenio icp-8601 (inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica, 304 p.
- Vergara, C. (2010). Petrogénesis de los centros eruptivos del Complejo Volcánico Lonquimay (CVL), IX Región De La Araucanía. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 132 p.
- Walker, G. (1972). Compound and simple lava flows and flood basalts. *Bulletin of Volcanology*, 35 (3): 579-590.
- Walker, G. (1973). Lengths of lava flows. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 274 (1238): 107–118.
- Zhou, J. Z., Fang, T., Luo, G., Uhlherr, P. H. (1995). Yield stress and maximum packing fraction of concentrated suspensions. *Rheologica Acta*, 34 (6): 544-561.

ANEXOS

ANEXO A: DATOS MORFOLÓGICOS

COLADA	MUESTRA	x	y	DISTANCIA A LA FUENTE (m)	PENDIENTE (°)	ANCHO LEVEE (m)	ALTURA LEVEE (m)	ANCHO COLADA (m)	OBS MORFOLOGICAS				
									Bloques		Corteza		
									Rango Tamaño	Tamaño típico	Grosor corteza	Tipo	Marcas cizalle
LQ5-1b	LON5-01	5751962	272931	1093	7	33	20	433,5	20 - 60 cm	25 cm	1 cm	Brechoza	-
	LON5-05	5751962	272931	1093	7	33	20	433,5	20 - 60 cm	25 cm	1 cm	Brechoza	-
	LON5-04	5751459	273070	571,4	5,6	29	13,5	210	10 - 50 cm	20 cm	1 cm	Brechoza	✓
	LON5-03	5750984	273211	80,6	15	22	11,5	137,4	40 cm - 1 m	40 cm	3 cm	Brechoza	✓
LQ5-1a	LON5-02a	5750932	273263	1073	18	-	30	312,5	20 cm - 2 m	50 cm	2 cm	Brechoza / Laminar	✓
	LON5-02b	5750932	273263	1073	18	-	30	312,5	20 cm - 2 m	50 cm	2 cm	Brechoza	✓
	LON5-06	5750233	273328	369	24	38	15	120	10 - 50 cm	20 cm	2 cm	Rugosa / Brechoza	✓
	LON5-07	5750298	273296	496,6	20	48	10	125	10 - 70 cm	30 cm	2 cm	Rugosa / Brechoza	✓
	LON5-08	5750518	273235	712,2	22	57	2	147,7	10 cm - 1 m	40 cm	3 cm	Rugosa	✓
LQ5-2	LON5c-01	5749237	273348	112,5	32	24	2,5	90	10 cm - 5 m	50 cm	6 cm	Brechoza	✓
	LON5c-02	5749505	273076	488	30	22	2	86,6	10 - 50 cm	30 cm	1 cm	Rugosa / Brechoza	-
	LON5c-03	5749803	272782	905,5	32	14	-	84,5	10 cm - 5 m	50 cm	1 cm	Rugosa	-
	LON5c-04	5750097	272520	1293,5	10	-	-	161	10 cm - 2 m	40 cm	1 cm	Rugosa / Brechoza	-
LQ4	LON4-05	5751033	271256	3755	5,5	-	14	1004	5 cm - 1,5 m	60 cm	-	Rugosa / Brechoza	✓
	LON4-06	5751433	271113	4210	3	-	8,7	567	2 cm - 3 m	5 cm	-	Brechoza	✓
	LON4-07	5749364	272258	1316	32,5	36	21	46,5	5 cm - 1,5 m	30 cm	-	Brechoza	-
	a	5749380	272234	1364	28	30	-	56	-	-	-	-	-
	b	5749319	272116	1511	23,5	22	-	57	-	-	-	-	-
	c	5749526	271838	1788	14	12	-	76,8	-	-	-	-	-
	d	5749518	271793	1848	16	10	-	77	-	-	-	-	-
	LON4-08	5749521	271659	2080	15	12	5	110,5	10 - 50 cm	30 cm	0,5 cm	Brechoza	-
	e	5749676	271349	2349	13	10	1,5	189	-	-	-	-	-
LON4-09	5749872	271220	2580	0,5	-	2,3	167	10 cm - 1,5 m	1 m	-	Brechoza / Lajada	✓	
f	5750045	271361	3168	0,5	-	2	432	-	-	-	-	-	
LQ3	LON2-01	5738954	267855	9286	5	-	-	1557	-	-	-	Brechoza	✓
CFO1	(frente)	5751925	277952	1641	8,4	-	-	340	10 cm - 5 m	2 m	5 cm	-	-
	CFO1-01	5751836	278000	1704	12,5	-	10	340	10 cm - 4 m	2 m	5 cm	Lajada / Brechoza	✓
	a	5751651	278024	1351	8	28	10	321	-	-	-	-	-
	b	5751559	278053	1368,5	10	35	-	316	-	-	-	-	-
	CFO1-02	5751287	278261	1022,5	5	52	-	369	10 cm - 4 m	2 m	5 cm	Lajada / Brechoza	✓
	c	5751237	278353	946,5	23	51,7	-	345	-	-	-	-	-
	d	5751145	278551	727,5	14	54	-	295	-	-	-	-	-
	e	5751103	278664	604,5	16	43	-	346	-	-	-	-	-
CFO1-03	5751061	278794	464,5	15	48	-	289	20 cm - 6 m	2 m	5 cm	Lajada / Brechoza	✓	
CFO2	CFO2-01	5756167	280990	5364	6,5	47	23	1127	20 cm - 4 m	100 - 180 cm	3 cm (bloques)	Rugosa	✓
	a	5755029	280874	3825	3,3	52	21	1200	-	-	-	-	-
	CFO2-02	5754276	280442	3143	6	58	21	1031,6	10 cm - 1 m	35 cm	3 cm (bloques)	Rugosa	-
	b	5753642	280488	2541	1,9	58,5	21	1130,8	-	-	-	-	-
	CFO2-03	5752179	279456	843,7	30	42,5	5	197,4	10 - 20 cm	10 cm	1 cm (bloques)	Rugosa	✓
	CFO2-04	5752674	279826	1485	3	56	24	1260,5	10 - 40 cm	20 cm	2 cm (bloques)	Brechoza / Rugosa	✓
CFO2-05	5751436	279848	0	0	-	-	170	10 - 40 cm	20 cm	1 cm	Rugosa	-	

OBS: a, b, c, d, e, f: corresponden a puntos de control, donde se tomaron datos morfológicos, pero no se tomaron muestras

ANEXO B: COMPOSICIONES QUÍMICAS DEL VIDRIO

- COLADA LQ5-1a

	LON5-02				LON5-06					LON5-08					Promedio Colada
				Promedio Muestra					Promedio Muestra				Promedio Muestra		
SiO2	63,93	65,12	64,10	64,39	64,26	64,20	62,21	63,29	63,49	63,36	62,88	62,86	63,28	63,09	63,66
TiO2	0,91	0,87	0,88	0,89	0,99	0,86	1,50	1,17	1,13	0,82	1,02	1,12	0,87	0,96	0,99
Al2O3	16,53	15,67	16,32	16,18	15,78	15,67	15,63	16,00	15,77	16,41	15,70	16,77	16,03	16,23	16,06
FeO(T)	5,13	5,53	5,00	5,22	5,45	5,71	7,19	6,03	6,10	5,73	6,23	5,60	5,84	5,85	5,72
MnO	0,16	0,09	0,09	0,12	0,16	0,21	0,14	0,16	0,17	0,08	0,12	0,16	0,32	0,17	0,15
MgO	1,06	1,29	1,24	1,20	1,41	1,43	1,45	1,33	1,41	1,32	1,58	1,29	1,53	1,43	1,34
CaO	4,48	4,04	4,27	4,26	4,58	4,41	4,41	4,49	4,47	4,54	4,54	4,63	4,51	4,55	4,43
Na2O	6,18	5,74	6,20	6,04	5,71	5,71	5,46	5,81	5,67	6,28	5,73	5,88	5,64	5,88	5,86
K2O	1,06	1,17	1,23	1,15	1,28	1,15	1,21	1,15	1,20	1,19	1,25	1,13	1,08	1,16	1,17
P2O5	0,56	0,49	0,66	0,57	0,37	0,65	0,80	0,57	0,60	0,27	0,95	0,56	0,91	0,67	0,61
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

- COLADA LQ5-1b

	LON5-01					LON5-04					LON5-03					Promedio Colada
				Promedio Muestra					Promedio Muestra				Promedio Muestra			
SiO2	64,89	63,85	63,63	64,23	64,15	64,23	63,73	63,48	64,01	63,86	63,80	62,78	62,64	63,98	63,30	63,77
TiO2	0,93	1,08	1,06	0,85	0,98	0,82	0,93	0,92	0,84	0,88	0,98	0,97	0,96	0,81	0,93	0,93
Al2O3	16,18	16,24	16,23	16,01	16,16	16,48	16,05	15,78	16,02	16,08	15,32	16,03	14,96	16,05	15,59	15,95
FeO(T)	4,69	5,54	5,49	5,06	5,20	5,12	5,18	5,92	5,23	5,36	5,96	5,46	7,23	5,56	6,05	5,54
MnO	0,24	0,18	0,24	0,11	0,19	0,03	0,31	0,28	0,18	0,20	0,23	0,47	0,40	0,08	0,29	0,23
MgO	1,00	1,03	1,28	1,13	1,11	1,28	1,49	1,28	1,43	1,37	1,58	1,38	1,86	1,61	1,61	1,36
CaO	4,17	4,45	4,18	4,37	4,29	4,38	4,18	4,11	4,29	4,24	4,09	4,59	4,34	4,26	4,32	4,28
Na2O	6,25	6,02	6,13	6,38	6,19	6,15	6,40	6,17	6,09	6,20	6,06	6,04	5,78	5,74	5,91	6,10
K2O	1,28	1,07	1,29	1,29	1,23	1,20	1,24	1,29	1,19	1,23	1,58	1,07	1,33	1,13	1,28	1,25
P2O5	0,37	0,54	0,46	0,58	0,49	0,31	0,48	0,76	0,73	0,57	0,39	1,21	0,51	0,77	0,72	0,59
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

- COLADA LQ5-2

	LON5C-01					LON5C-02					LON5C-03					Promedio Muestra
				Promedio Muestra					Promedio Muestra				Promedio Muestra			
SiO2	51,04	51,68	52,59	52,35	51,91	52,04	52,00	50,97	51,23	51,56	52,08	52,35	51,62	51,42	51,87	
TiO2	1,42	1,29	1,25	1,34	1,33	1,31	1,43	1,25	1,26	1,31	1,14	1,20	1,41	1,13	1,22	
Al2O3	17,26	15,64	16,13	17,27	16,58	17,09	16,14	16,42	16,19	16,46	16,84	16,27	15,80	16,92	16,46	
FeO(T)	9,99	11,61	9,92	9,11	10,16	10,03	10,71	10,83	11,03	10,65	9,80	10,38	11,08	10,74	10,50	
MnO	0,21	0,25	0,41	0,28	0,29	0,00	0,22	0,26	0,51	0,25	0,20	0,37	0,35	0,26	0,29	
MgO	2,72	2,80	2,35	2,17	2,51	2,44	2,79	2,95	2,93	2,78	2,11	2,86	3,11	2,37	2,61	
CaO	8,34	7,59	8,06	8,28	8,06	8,35	7,78	7,96	8,17	8,07	7,95	7,75	7,67	8,02	7,85	
Na2O	7,37	7,19	7,49	7,65	7,42	7,23	7,06	7,56	7,11	7,24	8,11	7,24	7,24	7,64	7,56	
K2O	1,22	1,76	1,49	1,34	1,46	1,35	1,47	1,47	1,34	1,41	1,65	1,30	1,47	1,40	1,45	
P2O5	0,43	0,18	0,31	0,22	0,28	0,16	0,39	0,34	0,22	0,28	0,14	0,27	0,23	0,10	0,19	
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

	LON5C-04					Promedio Muestra	Promedio Colada
SiO2	50,26	52,36	52,26	50,99	51,47	51,70	
TiO2	1,20	1,26	1,43	1,08	1,24	1,28	
Al2O3	18,00	17,09	16,80	16,49	17,10	16,65	
FeO(T)	9,82	9,28	9,72	11,17	10,00	10,33	
MnO	0,25	0,12	0,28	0,24	0,22	0,26	
MgO	2,01	2,15	2,77	3,03	2,49	2,60	
CaO	9,32	7,90	7,80	8,02	8,26	8,06	
Na2O	8,14	8,29	7,51	7,39	7,83	7,51	
K2O	0,91	1,28	1,27	1,28	1,19	1,38	
P2O5	0,08	0,26	0,16	0,32	0,20	0,24	
TOTAL	100	100	100	100	100	100	

- COLADA LQ4

	LON4-07a						LON4-08						LON4-09				
						Promedio Muestra						Promedio Muestra					Promedio Muestra
SiO2	58,51	58,79	59,59	59,55	59,04	59,10	59,24	59,60	59,72	59,12	59,42	59,17	58,36	59,29	59,31	59,03	
TiO2	1,15	1,37	1,17	0,90	1,27	1,17	1,57	1,09	1,35	1,29	1,33	1,14	1,40	1,43	1,34	1,33	
Al2O3	16,06	14,48	16,64	16,25	14,99	15,68	15,85	16,34	15,61	17,31	16,28	16,18	16,23	16,44	16,10	16,24	
FeO(T)	8,43	9,86	7,52	7,85	8,97	8,53	8,19	7,73	8,51	7,21	7,91	7,98	9,00	8,07	8,04	8,27	
MnO	0,20	0,34	0,42	0,12	0,17	0,25	0,23	0,21	0,10	0,13	0,17	0,11	0,18	0,30	0,33	0,23	
MgO	2,76	2,72	2,13	2,33	2,17	2,42	2,43	2,47	2,46	2,18	2,39	2,32	2,83	2,46	2,54	2,54	
CaO	5,71	5,60	5,96	5,75	6,23	5,85	6,04	6,04	5,56	6,14	5,94	6,02	5,56	6,01	6,00	5,90	
Na2O	5,80	4,61	5,29	5,87	5,04	5,32	5,18	5,14	5,26	5,12	5,17	5,39	5,08	4,68	4,97	5,03	
K2O	1,16	1,25	0,97	1,08	1,35	1,16	0,89	1,06	0,98	0,85	0,94	1,00	0,90	0,90	0,98	0,94	
P2O5	0,20	1,00	0,33	0,30	0,78	0,52	0,38	0,33	0,44	0,65	0,45	0,69	0,45	0,44	0,39	0,49	
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

	LON4-05a					LON4-06b					Promedio Colada
					Promedio Muestra					Promedio Muestra	
SiO2	59,07	58,90	58,79	58,51	58,82	59,05	58,77	58,66	59,04	58,88	59,05
TiO2	1,37	1,16	1,65	1,29	1,37	1,58	1,47	1,49	1,51	1,51	1,34
Al2O3	16,07	16,48	16,17	16,41	16,28	16,09	15,55	15,70	16,18	15,88	16,07
FeO(T)	8,31	7,89	8,21	8,05	8,11	8,05	8,83	8,11	8,19	8,30	8,22
MnO	0,35	0,20	0,14	0,05	0,19	0,31	0,15	0,43	0,17	0,26	0,22
MgO	2,46	2,78	2,75	2,56	2,64	2,17	2,68	2,45	2,44	2,43	2,48
CaO	6,14	6,32	6,19	6,29	6,23	5,89	5,94	6,04	6,14	6,00	5,99
Na2O	5,22	5,08	4,91	5,34	5,14	5,41	5,01	5,25	5,16	5,21	5,17
K2O	0,95	0,93	1,00	1,04	0,98	0,99	0,93	1,10	0,78	0,95	1,00
P2O5	0,07	0,27	0,20	0,46	0,25	0,46	0,68	0,76	0,39	0,57	0,46
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

- COLADA LQ3

	LON2-01				Promedio Colada
				Promedio Muestra	
SiO2	59,96	58,75	59,90	58,70	59,33
TiO2	0,98	1,25	1,23	0,99	1,11
Al2O3	17,18	16,96	17,17	16,90	17,05
FeO(T)	6,75	7,16	7,03	7,72	7,16
MnO	0,04	0,21	0,19	0,30	0,19
MgO	2,41	2,57	2,41	2,57	2,49
CaO	6,14	6,15	6,05	6,14	6,12
Na2O	5,13	5,19	4,96	5,04	5,08
K2O	0,84	1,26	0,69	0,76	0,89
P2O5	0,57	0,51	0,37	0,87	0,58
	100	100	100	100	100

- COLADA CFO1

	CFO1-01					CFO1-02					CFO1-03					Promedio Colada
					Promedio Muestra					Promedio Muestra					Promedio Muestra	
SiO2	66,65	67,52	65,43	65,92	66,38	66,51	68,13	68,03	67,46	67,53	64,90	66,50	64,52	64,62	65,14	66,35
TiO2	0,48	0,58	0,69	0,28	0,51	0,46	0,55	0,63	0,97	0,65	0,45	0,43	0,87	0,82	0,64	0,60
Al2O3	15,63	16,16	16,27	17,09	16,29	16,50	14,70	14,01	13,97	14,80	17,40	15,86	15,37	15,36	16,00	15,69
FeO(T)	4,22	3,83	4,90	3,78	4,18	3,73	4,27	5,41	5,75	4,79	4,02	4,44	6,59	7,12	5,54	4,84
MnO	0,16	0,15	0,10	0,15	0,14	0,16	0,25	0,29	0,11	0,20	0,06	0,24	0,36	0,21	0,22	0,19
MgO	0,77	0,26	0,28	0,30	0,41	0,44	0,46	0,61	0,56	0,52	0,39	0,47	0,57	0,59	0,51	0,48
CaO	4,08	3,54	3,84	4,29	3,94	4,08	3,13	3,08	3,39	3,42	4,70	3,96	3,80	3,41	3,97	3,78
Na2O	6,33	6,26	6,67	6,46	6,43	6,50	6,44	5,92	6,01	6,22	6,79	6,13	6,50	6,19	6,40	6,35
K2O	1,37	1,59	1,34	1,23	1,38	1,32	1,56	1,67	1,46	1,50	1,22	1,49	1,37	1,42	1,38	1,42
P2O5	0,30	0,10	0,47	0,51	0,35	0,30	0,49	0,35	0,33	0,37	0,07	0,48	0,03	0,27	0,21	0,31
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

- COLADA CFO2

	CFO2-01					CFO2-02					CFO2-03					Promedio Muestra
					Promedio Muestra					Promedio Muestra					Promedio Muestra	
SiO2	60,90	61,30	61,59	61,90	61,42	61,38	61,60	61,63	61,98	61,65	61,61	61,29	61,93	61,86	61,67	
TiO2	1,10	1,01	0,96	0,95	1,00	0,98	0,92	1,09	0,94	0,98	1,07	0,93	0,97	0,89	0,96	
Al2O3	17,19	16,59	17,28	16,59	16,91	16,40	16,73	15,65	17,02	16,45	16,36	17,16	16,64	16,92	16,77	
FeO(T)	6,15	6,73	6,13	6,52	6,38	6,79	6,72	7,31	5,40	6,56	6,53	6,03	6,68	5,95	6,30	
MnO	0,04	0,20	0,28	0,12	0,16	0,18	0,13	0,07	0,27	0,16	0,08	0,12	0,08	0,14	0,11	
MgO	1,29	1,53	1,07	1,46	1,34	1,38	1,56	1,69	1,31	1,48	1,61	1,38	1,29	1,32	1,40	
CaO	5,12	4,74	5,02	5,12	5,00	5,07	4,80	4,79	5,28	4,99	4,93	5,09	4,85	5,05	4,98	
Na2O	6,05	5,95	5,88	5,97	5,96	5,72	5,84	5,65	6,28	5,88	5,83	6,06	5,86	5,76	5,88	
K2O	1,09	1,16	0,93	1,07	1,06	1,12	1,13	1,10	1,07	1,10	1,12	1,08	1,05	1,01	1,06	
P2O5	1,08	0,79	0,86	0,30	0,76	0,98	0,58	1,02	0,45	0,76	0,87	0,86	0,66	1,11	0,87	
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

	CFO2-04					Promedio Muestra	Promedio Colada
SiO2	63,12	61,94	62,44	61,45	62,24	61,74	
TiO2	0,86	0,80	0,74	0,92	0,83	0,94	
Al2O3	16,84	16,13	16,35	16,32	16,41	16,64	
FeO(T)	5,35	6,22	5,90	6,65	6,03	6,32	
MnO	0,00	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	
MgO	1,01	1,73	1,58	1,74	1,51	1,43	
CaO	4,81	5,16	4,52	4,97	4,86	4,96	
Na2O	5,82	5,63	5,72	5,45	5,65	5,84	
K2O	1,40	1,18	1,27	1,35	1,30	1,13	
P2O5	0,80	0,91	1,24	0,93	0,97	0,84	
TOTAL	100	100	100	100	100	100	

ANEXO C: RESULTADOS CONTEO DE CRISTALES

	Muestra	Fenocristales (%)	Microfenocristales (%)	Masa Fundamental (%)	TOTAL
LQ5-1b	LON5-01	3,13	25,47	71,40	100
	LON5-04	3,26	25,87	70,88	100
	LON5-03	2,04	28,16	69,80	100
LQ5-1a	LON5-02a	3,47	24,69	71,84	100
	LON5-08	3,19	25,96	70,85	100
	LON5-07b	3,70	29,63	66,67	100
	LON5-06	3,93	27,69	68,39	100
LQ5-2	LON5c-01	1,30	26,94	71,77	100
	LON5c-02a	1,32	23,30	75,38	100
	LON5c-03	1,40	23,54	75,06	100
	LON5c-04	1,04	18,13	80,83	100
LQ4	LON4-06b	0,21	15,02	84,77	100
	LON4-05a	1,55	10,82	87,64	100
	LON4-09	1,87	13,49	84,65	100
	LON4-08	1,07	17,27	81,66	100
	LON4-07a	1,83	16,50	81,67	100
LQ3	LON2-01	2,13	30,64	67,23	100
CFO1	CFO1-01a	0,41	28,02	71,57	100
	CFO1-02	0,87	24,62	74,51	100
	CFO1-03a	1,06	30,08	68,86	100
CFO2	CFO2-05	2,05	18,24	79,71	100
	CFO2-03a	1,06	22,29	76,65	100
	CFO2-03bc	22,06	33,81	44,12	100
	CFO2-04bm	1,20	21,29	77,51	100
	CFO2-02a	0,20	23,16	76,64	100
	CFO2-01a	1,95	21,65	76,41	100

ANEXO D: TEMPERATURAS Y VISCOSIDADES DEL VIDRIO

	Muestra	TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (Pa s)		TEMPERATURA RANGO MAYOR=1080		TEMPERATURA RANGO MENOR=1100	
			VISCOSIDAD (Pa s)		VISCOSIDAD (Pa s)		VISCOSIDAD (Pa s)	
			0,01% H2O	0,1% H2O	0,01% H2O	0,1% H2O	0,01% H2O	0,1% H2O
LQ5-1a	LON5-02	1022,25	4,50E+05	2,27E+05	1,03E+05	5,65E+04	6,31E+05	3,12E+05
		1028,30	4,44E+05	2,26E+05	1,20E+05	6,57E+04	7,32E+05	3,63E+05
		1027,01	3,80E+05	1,94E+05	1,00E+05	5,50E+04	6,04E+05	3,00E+05
	LON5-06	1031,47	3,43E+05	1,76E+05	1,01E+05	5,53E+04	6,18E+05	3,06E+05
		1032,05	2,95E+05	1,52E+05	8,85E+04	4,89E+04	5,36E+05	2,68E+05
		1032,66	2,15E+05	1,11E+05	6,51E+04	3,60E+04	4,00E+05	1,99E+05
	LON5-08	1029,49	2,96E+05	1,52E+05	8,26E+04	4,54E+04	5,06E+05	2,51E+05
		1029,18	2,47E+05	1,28E+05	6,95E+04	3,86E+04	4,15E+05	2,08E+05
		1035,97	1,88E+05	9,86E+04	6,33E+04	3,52E+04	3,79E+05	1,90E+05
LQ5-1b	LON5-01	1028,31	3,19E+05	1,62E+05	8,51E+04	4,66E+04	5,29E+05	2,60E+05
		1034,52	2,25E+05	1,17E+05	7,22E+04	3,99E+04	4,38E+05	2,19E+05
		1020,61	5,95E+05	2,99E+05	1,31E+05	7,16E+04	7,97E+05	3,93E+05
LQ5-2	LON5-04	1021,62	4,68E+05	2,35E+05	1,05E+05	5,73E+04	6,45E+05	3,18E+05
		1028,08	3,22E+05	1,65E+05	8,74E+04	4,81E+04	5,27E+05	2,62E+05
		1024,09	3,84E+05	1,96E+05	9,48E+04	5,24E+04	5,63E+05	2,81E+05
	LON5-03	1028,05	3,70E+05	1,89E+05	9,96E+04	5,47E+04	6,05E+05	3,00E+05
		1033,55	2,31E+05	1,21E+05	7,35E+04	4,09E+04	4,33E+05	2,18E+05
		1028,00	2,55E+05	1,32E+05	7,04E+04	3,92E+04	4,13E+05	2,08E+05
	LON5C-01	1032,09	2,80E+05	1,45E+05	8,50E+04	4,70E+04	5,07E+05	2,54E+05
		1035,89	1,98E+05	1,04E+05	6,73E+04	3,77E+04	3,93E+05	1,99E+05
		1030,79	2,26E+05	1,17E+05	6,64E+04	3,68E+04	3,96E+05	1,98E+05
1043,34		9,58E+04	5,18E+04	3,96E+04	2,25E+04	2,29E+05	1,18E+05	
1036,80		2,46E+05	1,28E+05	8,38E+04	4,63E+04	5,07E+05	2,53E+05	
1065,96		2,50E+03	1,49E+03	1,83E+03	1,11E+03	9,88E+03	5,40E+03	
LON5C-02	1068,13	1,90E+03	1,16E+03	1,47E+03	9,07E+02	7,53E+03	4,23E+03	
	1056,26	3,88E+03	2,29E+03	2,28E+03	1,39E+03	1,20E+04	6,60E+03	
	1051,55	5,63E+03	3,24E+03	2,93E+03	1,75E+03	1,60E+04	8,62E+03	
	1058,67	3,88E+03	2,27E+03	2,39E+03	1,44E+03	1,30E+04	7,07E+03	
	1067,80	2,55E+03	1,53E+03	1,95E+03	1,19E+03	1,03E+04	5,70E+03	
	1072,00	1,56E+03	9,55E+02	1,31E+03	8,11E+02	6,76E+03	3,79E+03	
LON5C-03	1071,59	1,61E+03	9,83E+02	1,34E+03	8,26E+02	7,00E+03	3,91E+03	
	1049,76	4,39E+03	2,56E+03	2,23E+03	1,35E+03	1,16E+04	6,38E+03	
	1069,75	2,30E+03	1,39E+03	1,84E+03	1,13E+03	9,65E+03	5,36E+03	
	1076,27	1,57E+03	9,64E+02	1,45E+03	8,94E+02	7,48E+03	4,19E+03	
	1056,72	2,82E+03	1,67E+03	1,68E+03	1,02E+03	8,79E+03	4,86E+03	
	1047,29	3,42E+03	1,98E+03	1,61E+03	9,75E+02	8,72E+03	4,76E+03	
LON5C-04	1051,04	4,91E+03	2,85E+03	2,56E+03	1,54E+03	1,34E+04	7,36E+03	
	1067,18	3,03E+03	1,81E+03	2,28E+03	1,38E+03	1,22E+04	6,68E+03	
	1074,19	1,33E+03	8,19E+02	1,17E+03	7,27E+02	6,04E+03	3,40E+03	
	1067,01	1,61E+04	9,22E+03	1,19E+04	6,93E+03	6,85E+04	3,60E+04	
	1065,82	1,93E+04	1,10E+04	1,38E+04	8,00E+03	8,08E+04	4,23E+04	
	1050,38	4,95E+04	2,68E+04	2,38E+04	1,35E+04	1,46E+05	7,43E+04	
LQ4	LON4-07a	1055,56	3,02E+04	1,68E+04	1,69E+04	9,73E+03	9,81E+04	5,10E+04
		1051,38	3,53E+04	1,95E+04	1,77E+04	1,02E+04	1,05E+05	5,43E+04
		1058,31	3,64E+04	2,00E+04	2,14E+04	1,22E+04	1,32E+05	6,72E+04
	LON4-08	1059,44	3,42E+04	1,89E+04	2,08E+04	1,18E+04	1,26E+05	6,47E+04
		1059,12	3,36E+04	1,87E+04	2,05E+04	1,17E+04	1,23E+05	6,33E+04
		1051,68	5,37E+04	2,88E+04	2,65E+04	1,48E+04	1,67E+05	8,37E+04
	LON4-09	1055,45	3,41E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,08E+04	1,13E+05	5,80E+04
		1068,81	1,76E+04	1,00E+04	1,35E+04	7,78E+03	8,10E+04	4,20E+04
		1059,02	3,94E+04	2,16E+04	2,35E+04	1,32E+04	1,48E+05	7,47E+04
LON4-05a	1061,27	3,21E+04	1,78E+04	2,04E+04	1,16E+04	1,25E+05	6,40E+04	
	1058,98	2,98E+04	1,65E+04	1,79E+04	1,02E+04	1,09E+05	5,59E+04	
	1067,44	2,19E+04	1,23E+04	1,62E+04	9,28E+03	9,87E+04	5,08E+04	
	1066,76	2,70E+04	1,50E+04	1,95E+04	1,11E+04	1,22E+05	6,21E+04	
		1061,70	2,52E+04	1,41E+04	1,62E+04	9,28E+03	9,79E+04	5,04E+04

				TEMPERATURA RANGO MAYOR=1080°		TEMPERATURA RANGO MENOR=1100°		
	Muestra	TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (Pa s)		VISCOSIDAD (Pa s)		VISCOSIDAD (Pa s)	
			0,01% H2O	0,1% H2O	0,01% H2O	0,1% H2O	0,01% H2O	0,1% H2O
LQ4	LON4-06b	1051,53	4,46E+04	2,43E+04	2,22E+04	1,26E+04	1,35E+05	6,90E+04
		1064,77	2,33E+04	1,31E+04	1,62E+04	9,29E+03	9,74E+04	5,04E+04
		1058,83	2,93E+04	1,63E+04	1,76E+04	1,01E+04	1,06E+05	5,45E+04
		1058,53	3,46E+04	1,90E+04	2,04E+04	1,16E+04	1,26E+05	6,43E+04
CFO1	CFO1-01	1014,76	8,88E+05	4,44E+05	1,01E+06	5,02E+05	1,70E+05	9,29E+04
		1001,33	2,38E+06	1,14E+06	1,86E+06	9,03E+05	3,04E+05	1,63E+05
		1001,85	1,15E+06	5,59E+05	9,15E+05	4,52E+05	1,54E+05	8,40E+04
		1002,29	1,51E+06	7,27E+05	1,22E+06	5,93E+05	1,99E+05	1,07E+05
	CFO1-02	1005,89	1,45E+06	7,04E+05	1,29E+06	6,32E+05	2,13E+05	1,15E+05
		1006,60	1,46E+06	7,21E+05	1,33E+06	6,61E+05	2,29E+05	1,25E+05
		1010,39	1,15E+06	5,74E+05	1,16E+06	5,80E+05	1,99E+05	1,09E+05
		1009,08	1,19E+06	5,93E+05	1,16E+06	5,79E+05	1,96E+05	1,08E+05
	CFO1-03	1004,77	1,06E+06	5,15E+05	9,17E+05	4,49E+05	1,51E+05	8,15E+04
		1006,70	1,26E+06	6,15E+05	1,15E+06	5,64E+05	1,91E+05	1,04E+05
		1009,52	4,89E+05	2,47E+05	4,83E+05	2,44E+05	8,34E+04	4,64E+04
		1009,84	5,08E+05	2,56E+05	5,06E+05	2,55E+05	8,71E+04	4,84E+04
CFO2	CFO2-01	1028,28	1,89E+05	9,68E+04	5,12E+04	2,83E+04	3,12E+05	1,55E+05
		1034,53	1,31E+05	6,87E+04	4,25E+04	2,37E+04	2,53E+05	1,28E+05
		1022,67	2,64E+05	1,33E+05	6,08E+04	3,34E+04	3,76E+05	1,86E+05
		1032,69	1,59E+05	8,30E+04	4,88E+04	2,72E+04	2,95E+05	1,48E+05
	CFO2-02	1030,68	1,59E+05	8,25E+04	4,62E+04	2,57E+04	2,79E+05	1,40E+05
		1035,33	1,36E+05	7,15E+04	4,49E+04	2,51E+04	2,70E+05	1,36E+05
		1038,85	1,13E+05	6,02E+04	4,13E+04	2,32E+04	2,45E+05	1,24E+05
		1028,92	2,14E+05	1,10E+05	5,90E+04	3,26E+04	3,59E+05	1,79E+05
	CFO2-03	1036,63	1,41E+05	7,38E+04	4,79E+04	2,67E+04	2,88E+05	1,45E+05
		1030,61	1,72E+05	8,87E+04	4,97E+04	2,76E+04	3,01E+05	1,50E+05
		1028,33	2,00E+05	1,03E+05	5,44E+04	3,02E+04	3,30E+05	1,65E+05
		1029,11	2,19E+05	1,12E+05	6,03E+04	3,32E+04	3,70E+05	1,83E+05
	CFO2-04	1020,90	4,47E+05	2,23E+05	9,80E+04	5,34E+04	6,05E+05	2,97E+05
		1039,94	1,22E+05	6,47E+04	4,55E+04	2,55E+04	2,72E+05	1,38E+05
		1035,96	1,68E+05	8,81E+04	5,67E+04	3,15E+04	3,37E+05	1,69E+05
		1040,12	1,17E+05	6,19E+04	4,36E+04	2,44E+04	2,63E+05	1,32E+05

ANEXO E: CÁLCULOS DE PARÁMETROS ERUPTIVOS

	Muestra	Distancia (m)	ϕ	K (Pa s)	K (T menor) (Pa s)	K (T mayor) (Pa s)	n	YS (Pa)	Vol (m3)	Vol acc (m3)	YSC (Pa)
LQ5-1a	LON5-06	369	0,32	4,01E+06	7,64E+06	1,30E+06	6,38E-01	2,14E+05	5,65E+05	5,65E+05	5,00E+05
	LON5-08	712,2	0,29	2,26E+06	4,01E+06	6,85E+05	7,11E-01	1,76E+05	5,13E+05	1,08E+06	5,00E+05
	LON5-02	1073	0,28	3,36E+06	5,14E+06	8,75E+05	7,40E-01	1,59E+05	2,54E+06	3,62E+06	5,00E+05
LQ5-1b	LON5-03	1153,6	0,30	2,10E+06	4,13E+06	7,21E+05	6,80E-01	5,86E+04	1,46E+06	5,08E+06	5,00E+05
	LON5-04	1644,4	0,29	2,61E+06	4,45E+06	7,73E+05	7,12E-01	3,74E+04	4,06E+06	9,13E+06	5,00E+05
	LON5-01	2166	0,29	3,73E+06	5,30E+06	9,06E+05	7,27E-01	5,80E+04	1,88E+07	2,80E+07	5,00E+05
LQ5-2	LON5c-01	112,5	0,24	1,17E+04	5,53E+04	1,08E+04	8,56E-01	2,20E+05	2,17E+04	2,17E+04	2,12E+05
	LON5c-02	488	0,25	1,26E+04	4,74E+04	9,26E+03	8,45E-01	2,34E+05	8,79E+04	1,10E+05	2,12E+05
	LON5c-03	905,5	0,25	1,51E+04	4,99E+04	9,93E+03	8,35E-01	1,82E+05	1,13E+05	2,22E+05	2,12E+05
	LON5c-04	1293,5	0,19	9,39E+03	2,92E+04	5,71E+03	1,01E+00	6,15E+04	2,15E+05	4,37E+05	2,12E+05
LQ4	b	1511	0,18	8,07E+04	2,61E+05	4,57E+04	1,03E+00	7,48E+04	2,58E+05	1,32E+06	4,00E+05
	c	1788	0,18	9,31E+04	9,31E+04	9,31E+04	1,03E+00	3,44E+04	8,37E+05	2,16E+06	4,00E+05
	d	1848	0,18	9,93E+04	2,25E+05	7,67E+04	1,03E+00	3,72E+04	8,54E+05	3,01E+06	4,00E+05
	LON4-09	2580	0,15	6,42E+04	2,37E+05	4,01E+04	1,12E+00	1,61E+04	3,01E+06	9,99E+06	4,00E+05
	LON4-05	3755	0,12	4,32E+04	1,72E+05	2,93E+04	1,21E+00	1,08E+04	1,14E+07	2,14E+07	4,00E+05
	LON4-06	4210	0,15	6,79E+04	2,33E+05	3,98E+04	1,12E+00	3,36E+03	2,29E+07	4,42E+07	4,00E+05
LQ3	LON2-01	9286	0,33	691201,3			0,603915	713137,1	144583020	144583020	713137,0995
CFO1	CFO1-03	464,5	0,31	1,05E+07	9,67E+06	1,68E+06	6,52E-01	1,45E+05	7,52E+05	7,52E+05	1,00E+05
	e	604,5	0,30	9,45E+06	8,78E+06	1,53E+06	6,94E-01	1,59E+05	8,68E+05	1,62E+06	1,00E+05
	d	727,5	0,28	8,57E+06	8,02E+06	1,40E+06	7,35E-01	1,92E+05	1,87E+06	3,49E+06	1,00E+05
	CFO1-02	1022,5	0,25	7,18E+06	6,77E+06	1,18E+06	8,19E-01	3,80E+04	2,98E+06	8,09E+06	1,00E+05
	b	1368,5	0,25	7,18E+06	7,18E+06	7,18E+06	8,19E-01	3,60E+04	2,80E+06	1,09E+07	1,00E+05
	CFO1-01	1704	0,28	1,20E+07	1,02E+07	1,74E+06	7,32E-01	8,70E+04	4,91E+06	1,73E+07	1,00E+05
CFO2	CFO2-03	843,7	0,23	790073,9	1,38E+06	2,35E+05	8,82E-01	1,33E+05	8,33E+05	8,33E+05	3,00E+05
	CFO2-04	1485	0,22	838099,8	1,44E+06	2,45E+05	9,08E-01	2,33E+03	1,94E+07	2,02E+07	3,00E+05
	CFO2-02	3142	0,23	674959,4	1,23E+06	2,12E+05	8,82E-01	2,93E+04	3,59E+07	5,61E+07	3,00E+05
	CFO2-01	5364	0,24	823580,4	1,36E+06	2,31E+05	8,75E-01	4,49E+04	8,76E+07	1,44E+08	3,00E+05

Con, Φ = concentración de cristales; K= consistencia; YS= *Yield Strength*; Vol= volumen; Vol acc= volumen acumulado; YSC= *Yield Strength* utilizado

T menor y T mayor, corresponden a los rangos de temperatura mínimo y máximo utilizados para el cálculo de los distintos parámetros.

METODO CRHB											
	Muestra	hc	V (m/s)	V (T menor) (m/s)	V (T mayor) (m/s)	t (s)	t (T menor) (s)	t (T mayor) (s)	Q (m3/s)	Q (T menor) (m3/s)	Q (T mayor) (m3/s)
LQ5-1a	LON5-06	13,82	2,07E-03	7,55E-04	1,22E-02	1,78E+05	4,88E+05	3,03E+04	3,17E+00	1,16E+00	1,87E+01
	LON5-08	18,11	7,63E-04	3,40E-04	4,08E-03	6,28E+05	1,50E+06	1,14E+05	5,49E-01	2,57E-01	2,94E+00
	LON5-02	21,00	7,67E-15	0,00E+00	0,00E+00	1,10E+06	2,56E+06	2,03E+05	1,81E-11	0,00E+00	0,00E+00
LQ5-1b	LON5-03										
	LON5-04										
	LON5-01										
LQ5-2	LON5c-01										
	LON5c-02										
	LON5c-03										
	LON5c-04										
LQ4	b	1,17E+00	1,68E-01	5,38E-02	2,92E-01	1,80E+03	5,64E+03	1,04E+03	2,88E+01	9,21E+00	5,00E+01
	c	1,88E+00	4,38E-01	4,38E-01	4,38E-01	2,44E+03	6,27E+03	1,67E+03	2,05E+02	2,05E+02	2,05E+02
	d	1,65E+00	5,11E-01	2,31E-01	6,57E-01	2,55E+03	6,53E+03	1,76E+03	2,36E+02	1,07E+02	3,04E+02
	LON4-09	3,08E+00	1,20E-01	3,75E-02	1,83E-01	5,46E+03	1,59E+04	3,65E+03	1,40E+02	4,37E+01	2,14E+02
	LON4-05	4,75E+00	3,80E-03	1,21E-03	5,24E-03	3,15E+05	9,91E+05	2,28E+05	1,15E+01	3,65E+00	1,59E+01
	LON4-06	8,70E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,35E+05	1,37E+06	3,15E+05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
LQ3	LON2-01										
CFO1	CFO1-03	1,15E+01	2,96E-03	3,35E-03	4,92E-02	1,57E+05	1,39E+05	9,43E+03	9,58E+00	1,08E+01	1,59E+02
	e	1,15E+01	4,31E-03	4,79E-03	5,96E-02	1,89E+05	1,68E+05	1,18E+04	1,24E+01	1,37E+01	1,71E+02
	d	1,15E+01	5,03E-02	5,51E-02	5,93E-01	1,92E+05	1,70E+05	1,20E+04	2,58E+02	2,83E+02	3,04E+03
	CFO1-02	2,55E+01	3,07E-02	3,30E-02	2,77E-01	3,39E+05	3,06E+05	2,64E+04	1,79E+02	1,92E+02	1,62E+03
	b	2,27E+01	4,58E-03	4,58E-03	4,58E-03	4,15E+05	3,81E+05	1,02E+05	1,87E+01	1,87E+01	1,87E+01
	CFO1-01	2,27E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,88E+05	4,55E+05	1,75E+05	2,64E+01	0,00E+00	0,00E+00
CFO2	CFO2-03										
	CFO2-04										
	CFO2-02										
	CFO2-01										

Con, V= velocidad; t= tiempo; Q= tasa eruptiva

METODO CYSC						
	Muestra	t (s)	t (dias)	t total (dias)	Q (m3/s)	V (m/s)
LQ5-1a	LON5-06					
	LON5-08					
	LON5-02					
LQ5-1b	LON5-03	1,82E+06	2,10E+01	1,84E+03	8,04E-01	6,35E-04
	LON5-04	1,02E+06	1,18E+01	1,85E+03	3,97E+00	1,61E-03
	LON5-01	5,39E+06	6,23E+01	1,92E+03	3,50E+00	4,02E-04
LQ5-2	LON5c-01	1,47E+05	1,70E+00	1,70E+00	1,48E-01	7,68E-04
	LON5c-02	1,40E+05	1,63E+00	3,32E+00	6,26E-01	2,67E-03
	LON5c-03	3,77E+05	4,36E+00	7,68E+00	2,99E-01	1,11E-03
	LON5c-04	3,45E+06	4,00E+01	4,77E+01	6,21E-02	1,12E-04
LQ4	b					
	c					
	d					
	LON4-09					
	LON4-05					
	LON4-06					
LQ3	LON2-01	510204,082	5,90513983	5,90513983	283,382719	
CFO1	CFO1-03					
	e					
	d					
	CFO1-02					
	b					
	CFO1-01					
CFO2	CFO2-03	5,65E+05	6,54E+00	6,54E+00	1,47E+00	1,49E-03
	CFO2-04	1,31E+06	1,52E+01	2,18E+01	1,48E+01	4,88E-04
	CFO2-02	1,00E+07	1,16E+02	1,38E+02	3,58E+00	1,65E-04
	CFO2-01	1,55E+07	1,79E+02	3,17E+02	5,66E+00	1,43E-04