



Universidad
de O'Higgins

Escuela de Ingeniería
Ingeniería civil geológica

Obtención de parámetros de coladas de lava asociadas a las erupciones históricas de los volcanes Villarrica y Llaima (regiones de La Araucanía y Los Ríos, Chile) para la evaluación de peligros volcánicos.

Catalina Pía Mellado Campos
Profesora guía: Laura Becerril

Memoria para optar al título de ingeniera civil geóloga

Rancagua, Chile
Enero, 2022

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecerle a mi profesora guía Laura, quien con su paciencia, conocimiento, disposición y tiempo me entregó los mejores consejos y apoyo en los momentos difíciles a lo largo del desarrollo de esta memoria. De igual manera se agradecen las conversaciones de temas diversos, donde me llenaba de su conocimiento y vivencias. Se lo dije un día que nos reunimos y lo sigo creyendo: es la mejor profe guía que pude haber pedido.

De igual manera quiero agradecerle a mi familia, que con sus palabras de aliento me brindaban su apoyo para seguir adelante. En especial agradezco a mi mamá, quien siempre ha estado para mí en todos los procesos de mi vida, siendo un pilar y apoyo en los momentos difíciles. Agradezco también a mi hermana mayor que a lo largo de nuestra vida juntas me ha llenado de su conocimiento y me vive asombrando con su inteligencia. Sé que vas a triunfar en lo que sea que te propongas Babita.

Le agradezco profundamente el apoyo a mi compañera de aventuras, quien me contuvo en momentos de estrés y siempre estuvo con la disposición de ayudarme en lo que ella pudiese. Te quiero tanto, muchas gracias por tus palabras de aliento y amor, k <3.

Se me hace imposible dejar afuera a mi mascota Blu. Estuviste en los momentos de alegrías y tristezas, cuando me sentía agobiada eras tú quien me subía el ánimo con tu compañía. Siempre voy a agradecer el haber tenido la oportunidad de cuidarte y quererte. Cada día me haces falta, te quiero para siempre.

Por último le agradezco a las personas que conocí a lo largo de la carrera. Ser la primera generación de la UOH fue complicado en distintos aspectos pero confío en que todxs nosotrxs nos convertiremos en profesionales íntegros que aportaremos en nuestra área de la mejor manera posible. Lucho y Nava estarán siempre en mi corazón jajaj, gracias por las risas 😊.

Índice de contenidos

Resumen	11
I Introducción.....	12
1.1 Presentación	12
1.2 Hipótesis	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo general.	15
1.3.2 Objetivos específicos.	15
II Antecedentes	17
2.1 Volcán Villarrica.....	17
2.1.1 Historia eruptiva.	19
2.2 Volcán Llaima.....	33
2.2.1 Historia eruptiva.	35
III Marco metodológico.....	43
3.1 Trabajo de campo	43
3.2 Cartografía.....	43
3.3 Obtención de parámetros	44
3.4 Simulaciones en Q-LavHA	45
IV Resultados	47
4.1 Cartografía.....	47
4.1.1 Volcán Villarrica.....	47
4.1.2 Volcán Llaima.	56
4.2 Obtención de parámetros.....	65

4.2.1	Volcán Villarrica.....	65
4.2.2	Volcán Llaima.	70
4.3	Simulaciones en Q-LavHA	76
4.3.1	Volcán Villarrica.....	76
4.3.2	Volcán Llaima.	82
V	Discusión	86
5.1	Cartografía.....	86
5.2	Obtención de parámetros	88
5.2.1	Espesor.....	88
5.2.2	Longitud máxima.....	90
5.2.3	Ancho.....	90
5.2.4	Área total.....	91
5.2.5	Volumen.....	92
5.2.6	Tasa de emisión.....	93
5.3	Simulaciones en Q-LavHA	94
VI	Conclusión	99
VII	Anexo	101
7.1	Marco geológico del volcán Villarrica.....	101
7.1.1	Basamento del volcán.	101
7.1.2	Geología del volcán.....	103
7.2	Marco geológico local del volcán Llaima	112
7.2.1	Basamento del volcán.	112
7.2.2	Geología del volcán.....	114

VIII Bibliografía..... 120

Índice de figuras

- Figura 1.1:** Zona de estudio que comprende los volcanes Villarrica y Llaima ubicados en las regiones de La Araucanía y Los Ríos, y La Araucanía, respectivamente. 13
- Figura 2.1:** Volcán Villarrica desde Pucón. Autora: Catalina Mellado. 18
- Figura 2.2:** Mapa geológico de Pizarro et al. (2019) modificado con los flujos de lava de las erupciones de 1787 (morado),1964 (verde) y 1984 (naranja) según Moreno & Clavero (2006).
20
- Figura 2.3:** Volcán Villarrica durante la violenta fase explosiva del 1 de enero de 1949. Autor: Lorenzo Casertano. 24
- Figura 2.4:** 30 de diciembre de 1971, 00:30 hora local. El volcán en erupción es fotografiado desde Villarrica. Se observan las fuentes de lava a ambos costados del cono superior. Sobre el edificio volcánico se proyectan nubes de cenizas, gases y vapor de agua. Fuente: POVi. . 27
- Figura 2.5:** 30 de diciembre de 1971. Se observa el cauce Chaillupén, en la base SE del volcán Villarrica. Una colada de lava tipo “aa” de unos 5 m de alto y 70 m de ancho avanza lentamente en dirección al lago Calafquén. El frente de la lava evapora los restos de agua dejados por los lahares, quemando y calcinando además la vegetación en los márgenes. Fuente: POVi. .. 27
- Figura 2.6:** Vista aérea desde el norte del cráter central del volcán Villarrica en noviembre de 1984. En el interior del cráter se observa un cono de piroclastos y una laguna surtidora de lava en su base. Fuente: POVi. 30
- Figura 2.7:** Estero Correntoso. En el margen inferior de la imagen se aprecia la colada de lava “aa” de 1985 a unos 4 km al NNO del cráter principal. Autor: Werner Keller. 32
- Figura 2.8:** Volcán Llaima desde Sierra Nevada. Autora: Catalina Mellado. 34
- Figura 2.9:** Mapa geológico del volcán Llaima de Naranjo & Moreno (2005) modificado por De Maisonneuve et al. (2012). Los flujos de lava históricos están etiquetados y los flujos de lava pre-históricos son indiferenciados y marcados con rayas oblicuas. F3: Unidad Llaima Fisural 3.

Figura 2.10: 17 de mayo de 1994. Una columna eruptiva se eleva sobre el volcán Llaima. Las fuentes de lava son visibles a lo largo de una fisura de 550 m de largo ubicada en el sector superior del flanco SSE que produjo un flujo de lava subglacial. Autor: Hugo Moreno (1994).

42

Figura 4.1: Cartografía de los flujos de lava históricos estudiados del volcán Villarrica....	48
Figura 4.2: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1787 del volcán Villarrica.....	49
Figura 4.3: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1921 del volcán Villarrica.....	50
Figura 4.4: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1948–1949 del volcán Villarrica.....	51
Figura 4.5: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1964 del volcán Villarrica.....	52
Figura 4.6: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1971–1972 del volcán Villarrica.....	53
Figura 4.7: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1984–1985 del volcán Villarrica.....	54
Figura 4.8: Cartografía de los flujos de lava históricos estudiados del volcán Llaima.	57
Figura 4.9: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1640 del volcán Llaima.....	58
Figura 4.10: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1751 del volcán Llaima.....	59
Figura 4.11: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1780 del volcán Llaima.....	60

Figura 4.12: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1945 del volcán Llaima.....	61
Figura 4.13: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1957 del volcán Llaima.....	62
Figura 4.14: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1994 del volcán Llaima.....	63
Figura 4.15: Depósito de lava asociado a la erupción de 1640 del volcán Llaima. Espesor aproximado de 1,5 m. Ubicación: 38°50'09"S, 71°44'39"O.	70
Figura 4.16: Frente del flujo de lava asociado a la erupción de 1945 del volcán Llaima. Espesor aproximado de 8 m. Ubicación: 38°42'16"S, 71°39'28"O.	71
Figura 4.17: Frente del flujo SE de lava asociado a la erupción de 1957 del volcán Llaima. Espesor aproximado de 4,8 m. Ubicación: 38°44'29"S, 71°37'38"O.	71
Figura 4.18: Frente del flujo NO de lava asociado a la erupción de 1957 del volcán Llaima. Espesor aproximado de 3,2 m. Ubicación: 38°34'45"S, 71°47'15"O.	72
Figura 4.19: Validación de los flujos de lava asociados a la erupción de 1971 del volcán Villarrica.....	77
Figura 4.20: Validación de los flujos de lava asociados a la erupción de 1984 del volcán Villarrica.....	78
Figura 4.21: Simulación de probabilidad de invasión de flujos de lava emitidos desde un punto al suroeste del cráter principal del volcán Villarrica. Coordenadas del centro de emisión: 763125, 5632151.	79
Figura 4.22: Simulación de probabilidad de invasión de flujos de lava emitidos desde el cráter principal del volcán Villarrica. Coordenadas del centro de emisión: 763442, 5632118.	80
Figura 4.23: Simulación de probabilidad de invasión de flujos de lava emitidos desde el área que cubre y rodea al cráter principal del volcán Villarrica.....	81

Figura 4.24: Validación del flujo de lava asociado a la erupción de 1751 del volcán Llaima.82

Figura 4.25: Validación del flujo de lava asociado a la erupción de 1994 del volcán Llaima.83

Figura 4.26: Simulación de probabilidad de invasión de flujos de lava emitidos desde el cráter principal del volcán Llaima. Coordenadas del centro de emisión: 784432, 5711725. 84

Figura 4.27: Simulación de probabilidad de invasión de flujos de lava emitidos desde el área que cubre y rodea al cráter principal del volcán Llaima. 85

Figura 5.1: Frente de lava correspondiente a unidad Llaima Fisural 3 en las cercanías al Lago Verde. Espesor aproximado de 16 m. Ubicación: 38°41'43.91"S, 71°37'23.40"O. 88

Índice de tablas

Tabla 2.1: Cantidad de población a diferentes distancias del volcán Villarrica (Global Volcanism Program, 2021).	18
Tabla 2.2: Cantidad de población a diferentes distancias del volcán Llaima (Global Volcanism Program, 2021).	34
Tabla 4.1: Valores de espesor recabados de otros estudios, obtenidos en este trabajo y promedio representativo de los flujos de lava estudiados del volcán Villarrica.	65
Tabla 4.2: Parámetros asociados a las coladas de lava de las erupciones históricas del volcán Villarrica.....	66
Tabla 4.3: Parámetros de volumen, duración y tasa de emisión máxima de las erupciones históricas del volcán Villarrica.	68
Tabla 4.4: Espesores obtenidos en trabajo de campo y gabinete junto con el valor promedio de los flujos de lava estudiados del volcán Llaima.	72
Tabla 4.5: Parámetros de las coladas de lava de las erupciones históricas de estudio del volcán Llaima.....	73
Tabla 4.6: Parámetros de volumen, duración y tasa de emisión máxima de las erupciones históricas del volcán Llaima.....	75
Tabla 5.1: Valores promedio de los parámetros de las lavas históricas de los volcanes Villarrica y Llaima.	97

Resumen

Los volcanes Villarrica y Llaima son estratovolcanes emplazados en las regiones de La Araucanía y Los Ríos, y ocupan los primeros puestos en el Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile publicado por SERNAGEOMIN (2020). En este trabajo se recabó información bibliográfica de estos volcanes y en especial de sus erupciones efusivas históricas con tal de obtener parámetros de las lavas emitidas. Se utilizaron insumos de gran precisión para cartografiar en ArcGIS Pro 2.5 los depósitos de lava asociados a las erupciones de estudio, para posteriormente obtener los parámetros de longitud y ancho máximos, espesor, área, volumen y tasa de emisión de lava. Se realizó trabajo de campo en el volcán Llaima donde se midieron espesores en terreno, y se obtuvieron el resto de las mediciones con trabajo de gabinete utilizando un MDE de 2.5 m de resolución y perfiles topográficos. Los espesores de las lavas históricas del Villarrica se obtuvieron usando un MDE de 1 m correspondiente al NE del volcán. En este trabajo se calcularon áreas, volúmenes y tasas de emisión de las lavas históricas de los volcanes. Se generaron simulaciones de probabilidad de invasión de flujos de lava con el complemento Q-LavHA de QGIS para validar depósitos de interés y conocer escenarios futuros de emisión de lava. Con este trabajo se logró un gran aporte a la documentación de las coladas históricas de los volcanes Villarrica y Llaima, junto con la realización de una base de datos actualizada de estos. Se concluyó que las lavas históricas del Llaima poseen mayor área y volumen que las del Villarrica. Se destaca la obtención de la totalidad de espesores de las lavas históricas del volcán Llaima, al igual que las áreas y volúmenes asociados. De igual manera en el Villarrica se aportó con mediciones de área y volumen que no se poseían con anterioridad. Las simulaciones en Q-LavHA generadas a partir del cráter principal de los volcanes permitieron notar una tendencia de alta probabilidad de invasión de flujos de lava hacia el SO y E del cráter principal del Villarrica y al SO y SE en caso del Llaima. Esta última información aporta a la evaluación de los peligros volcánicos asociados a los volcanes de estudio.

Palabras clave: volcán Villarrica, volcán Llaima, lavas históricas, parámetros de lavas, simulación en Q-LavHA

I Introducción

1.1 Presentación

El contexto geodinámico presente en el margen oeste de Chile está representado por la convergencia de placas que es visible hasta la península de Taitao, en la cual la placa de Nazca subducta a la placa Sudamericana. Esto se evidencia en las tres grandes franjas morfoestructurales características que posee el territorio: la Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Cordillera de los Andes, siendo esta última la que presenta volcanismo activo en la actualidad. Se ubica al occidente de Sudamérica, bordeando la costa del océano Pacífico y atravesando los países de Argentina, Chile, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela. Dada la gran extensión que posee, la Cordillera de los Andes se divide en cuatro segmentos de volcanismo activo: la Zona Volcánica Norte (ZVN, 6°N– 8°S), Zona Volcánica Central (ZVC, 16°– 28°S), Zona Volcánica Sur (ZVS, 33°–46°S) y Zona Volcánica Austral (ZVA, 49–56°S). Para este estudio, es relevante la Zona Volcánica Sur, que contempla entre las ciudades de Santiago de Chile y Coyhaique, y corresponde a la zona con mayor actividad eruptiva andina. Allí se ubican dos de los volcanes más activos de América del Sur: Villarrica y Llaima (Feris Riquelme, 2018).

El volcán Villarrica se encuentra ubicado en las regiones de La Araucanía y Los Ríos, mientras que el Llaima se emplaza en la región de La Araucanía (fig. 1.1). Estos ocupan los primeros puestos en el Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile publicado por SERNAGEOMIN (2020). Además, poseen características similares en aspectos como la morfología, el estilo eruptivo y la composición de los productos eruptivos (Granados et al., 2021). Estos volcanes han presentado erupciones históricas (últimos 500 años) del tipo estromboliano a hawaiano, en las cuales ha habido emisión de coladas de lava a partir de cráteres o fisuras, formación de columnas eruptivas de hasta 5 km sobre el cráter, eyección de piroclastos, generación de lahares y en algunos casos, flujos piroclásticos.

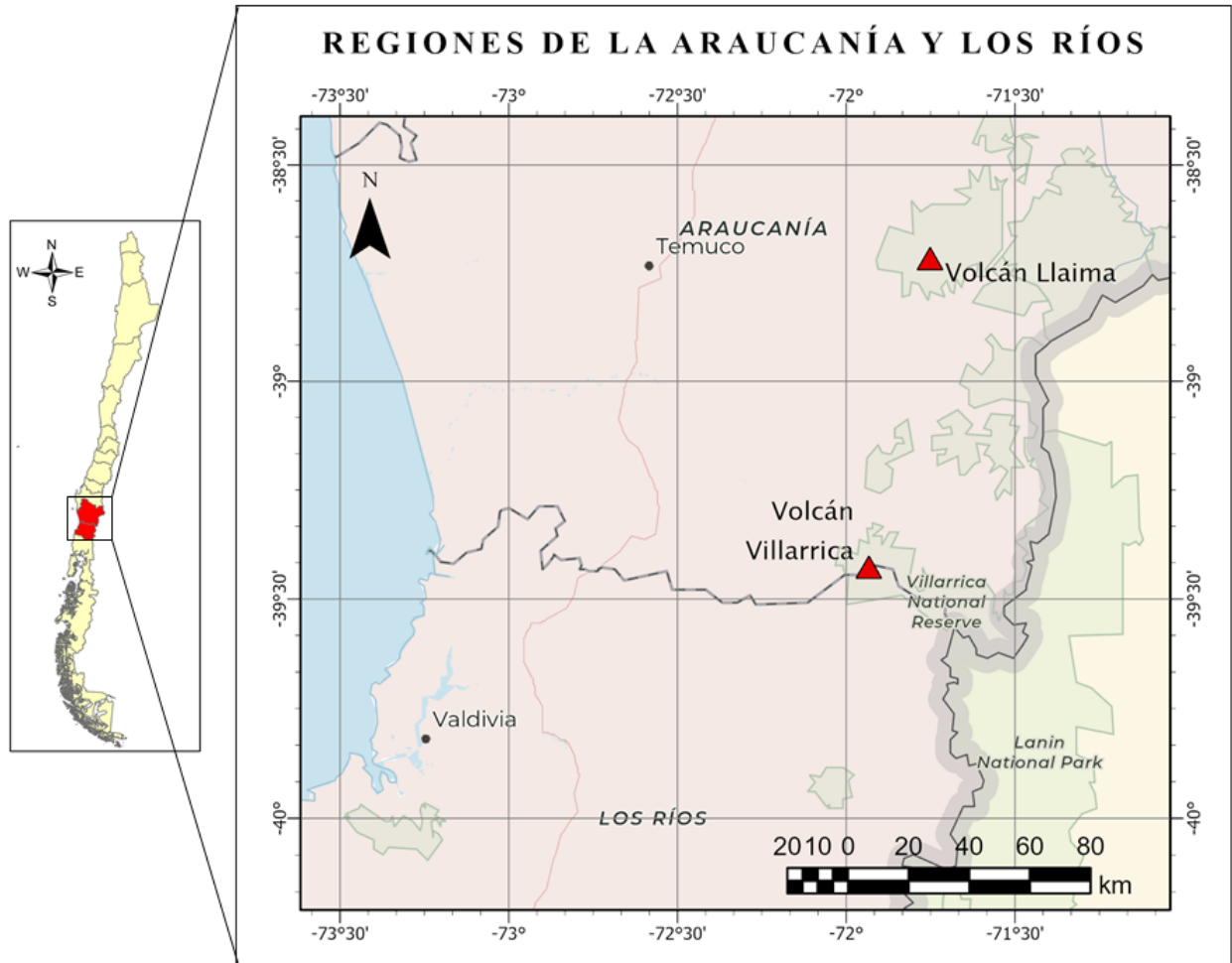


Figura 1.1: Zona de estudio que comprende los volcanes Villarrica y Llaima ubicados en las regiones de La Araucanía y Los Ríos, y La Araucanía, respectivamente.

Diferentes autores se han dado la tarea de estudiar las erupciones históricas (~1520 – actualidad) de los volcanes Villarrica y Llaima. Entre ellos se encuentra Petit-Breuilh (2004), quien documentó los eventos eruptivos de los volcanes mediante la realización de tablas compactas con información referida a la generación de lahares, columnas eruptivas, flujos lávicos, flujos piroclásticos, entre otros, durante las erupciones. Además, las publicaciones enmarcadas en la Carta Geológica de Chile realizadas por Moreno & Clavero (2006) en el caso del volcán Villarrica y Naranjo & Moreno (2005) del volcán Llaima entregan información general de las erupciones históricas de los volcanes, sin ahondar en la caracterización de los depósitos y los parámetros asociados a los flujos de lava. Con lo anterior es posible notar que no se cuenta con un registro claro y completo de las erupciones históricas, a lo cual se le suma la

existencia de discrepancias en la información de los registros, mapas y bibliografía, lo cual genera la necesidad de establecer un registro actualizado de las principales erupciones históricas de los volcanes mencionados. El eje principal de esta memoria es, entonces, la obtención de parámetros asociados a las coladas de lava de las principales erupciones históricas de los volcanes de estudio, lo cual incluye: composición química, longitud máxima, ancho (máximo o promedio), espesor (máximo o promedio), área total, volumen y tasa de emisión máxima. Las erupciones de estudio son aquellas que han presentado flujos de lava, siendo para el volcán Villarrica las ocurridas en los años: 1787, 1893–1894, 1921, 1948–1949, 1964, 1971–1972 y 1984–1985, mientras que para el Llaima se consideran las siguientes: 1640, 1751, 1780, 1945, 1957 y 1994. Cabe mencionar que los volcanes de estudio han tenido erupciones recientes que no conllevaron una actividad efusiva importante por lo tanto no se incluyen en el estudio (Villarrica 2015 y Llaima 2008).

Para lograr el objetivo propuesto, la etapa inicial se ha basado en la recopilación de antecedentes bibliográficos acerca de la geología y erupciones históricas de los volcanes de estudio, para luego cartografiar las lavas históricas de ellos mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica con el software ArcGIS Pro de ESRI. Para esto último se cuenta con modelos de elevación digital de alta calidad e imágenes satelitales de los volcanes. Posteriormente se aplican formulas empíricas para la obtención de volúmenes y tasas de emisión de lavas. Finalmente se realizan simulaciones de las coladas de lava mediante la herramienta Q-LavHA en QGIS para representar posibles escenarios futuros.

El trabajo realizado en el marco de esta memoria permite la caracterización de los depósitos de las coladas de lava históricas de los volcanes de estudio y la generación de una base de datos con los parámetros que estas poseen. Esto a su vez permite conocer las características y el comportamiento de las lavas históricas emitidas por los volcanes Villarrica y Llaima, para así establecer los márgenes de comportamiento en futuras erupciones.

1.2 Hipótesis

Los volcanes Villarrica y Llaima poseen similitudes en su morfología al tratarse ambos de estratovolcanes, el estilo eruptivo histórico considerado estromboliano y en algunos casos hawaiano, la composición de los productos eruptivos que mayormente son andesíticos y andesítico-basálticos (Granados et al., 2021). Los volcanes se encuentran cercanos en cuanto a su emplazamiento y ocupan puestos similares en el Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos publicado por SERNAGEOMIN (2020), donde el Villarrica se encuentra en el primer puesto, seguido en segundo lugar por el Llaima. Estas características en común permiten considerar como hipótesis que los parámetros de las lavas históricas de los volcanes de estudio poseen valores similares o cercanos de igual manera.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.*

Obtener los parámetros de las coladas de lava emitidas en las erupciones históricas de los volcanes Villarrica y Llaima.

1.3.2 *Objetivos específicos.*

- Generar una base de datos actualizada de las erupciones efusivas históricas de estudio de los volcanes Villarrica y Llaima mediante la recopilación de información bibliográfica.
- Catalogar la información de los parámetros de los flujos de lava de los volcanes de estudio para prever el comportamiento de las coladas en futuras erupciones.
- Cartografiar los depósitos correspondientes a las coladas de lava de las erupciones históricas de estudio para realizar una comparación con cartografías previas realizadas por otros autores.
- Determinar los parámetros eruptivos de longitud máxima, espesor máximo, área total, volumen y tasa de emisión de las coladas de lava emitidas en las erupciones históricas de estudio.

- Realizar la simulación de los flujos de lava de las erupciones históricas de estudio mediante la herramienta Q-LavHA de QGIS con tal de establecer el área de influencia.

II Antecedentes

Este capítulo describe la información general de los volcanes bajo estudio, su marco geológico y su historia eruptiva; dentro de esta última se describen las erupciones históricas.

2.1 Volcán Villarrica

El volcán Villarrica es conocido por el nombre de Rucapillán en lengua mapuche, lo cual significa “casa del espíritu” o “casa del demonio”. Está emplazado en el sur de Chile, en el límite de la Provincia de Cautín (Región de la Araucanía) y la Provincia de Valdivia (Región de los Ríos), al sureste del lago Villarrica y al noreste del lago Calafquén, en las coordenadas 39.42°S 71.93°W. Se encuentra cercano a la Zona de Falla Liquiñe–Ofqui alineada N–S y al extremo occidental de la cadena volcánica (de dirección NO–SE) formada por los volcanes Villarrica, Quetrupillán y Lanín. Posee una altitud de 2.847 m s.n.m., cubre un área aproximada de 400 km² y alcanza un volumen estimado de 250 km³ (Pizarro et al., 2019). Posee glaciares que cubren un área de 40 km² del volcán (Global Volcanism Program, 2021).

Es considerado uno de los volcanes más activos de Sudamérica al registrar 88 erupciones con un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) mayor o igual a 2 entre los años 1523 y 1991, con un promedio de una erupción $VEI \geq 2$ cada 5.4 ± 3.9 años de acuerdo con Pizarro et al. (2019).

Es un estratovolcán con forma cónica casi perfecta que lo hace reconocible a distancia, y representa un atractivo turístico importante en la zona. Posee una caldera en la base del cono y más de 30 centros eruptivos adventicios que consisten en conos de piroclastos formados a partir de fisuras menores. Posee un cráter activo en la cima con actividad fumarólica constante que tiene un diámetro de 200 m y una profundidad que varía entre 50 y 100 m. En su fondo presenta casi de forma permanente un lago de lava y, en algunas ocasiones, forma pequeños conos de piroclastos (Moreno & Clavero, 2006).

Las erupciones históricas han variado en su comportamiento, algunas han sido consideradas efusivas, mientras que otras moderadamente explosivas. Los productos eruptivos

emitidos durante las erupciones históricas documentadas incluyen la formación de lahares con gran poder destructivo, la caída de proyectiles balísticos, flujos de lava, caída de tefra y menos frecuentemente flujos piroclásticos. Estos productos poseen composición basáltica a pricobasáltica, andesítica a andesítica basáltica y riolítica (Global Volcanism Program, 2021).



Figura 2.1: Volcán Villarrica desde Pucón. Autora: Catalina Mellado.

Según información obtenida del Global Volcanism Program (2021) (o GVP) del Instituto Smithsonian la población se distribuye alrededor del volcán Villarrica de la siguiente manera:

Tabla 2.1: Cantidad de población a diferentes distancias del volcán Villarrica (Global Volcanism Program, 2021).

Distancia (dentro de) [km]	Población
5	477
10	1.067
30	35.118
100	667.788

2.1.1 *Historia eruptiva.*

La historia eruptiva del volcán Villarrica se explica mediante la descripción de la evolución de este, con el fin de comprender los procesos eruptivos ocurridos en tiempos pasados que llegaron a generar el estratovolcán que en la actualidad se conoce. Además, se presenta la caracterización de las erupciones de estudio (1787, 1893–1894, 1921, 1948–1949, 1964, 1971–1972 y 1984–1985) en el apartado correspondiente.

2.1.1.1 *Evolución del volcán Villarrica (Moreno & Clavero, 2006).*

El volcán Villarrica comenzó a edificarse en el Pleistoceno Medio (hace unos 600.000 años) mediante erupciones efusivas y explosivas en las cuales se emitieron coladas de lavas y depósitos piroclásticos principalmente de composición andesítico–basáltica que permitieron la construcción de un edificio volcánico de gran dimensión. Esta etapa corresponde a la zona basal de la Unidad Villarrica 1, y se cree que se extendió al menos hasta los 170.000 años. Hace ca. 100 ka el edificio fue truncado debido a un colapso que generó la denominada Caldera 1, y poco después de este evento, hace ca. 95 ka, la actividad volcánica recomenzó mediante la formación de domos, diques y filones de composición dacítica que se emplazaron en las cercanías de los bordes estructurales de la caldera. Posteriormente (41 ka), el volcán continuó su actividad, siendo generada la parte superior de la Unidad Villarrica 1 mediante erupciones explosivas en las que se generaron flujos piroclásticos y se dispersaron piroclastos de caída hacia la zona oeste. Estos eventos volcánicos se generaban mientras que allí ocurría la Glaciación Llanquihue. De forma posterior al derretimiento de los hielos asociados a la glaciación en las zonas bajas, ocurrió un evento eruptivo de gran volumen (Ignimbrita Licán) que generó un colapso y la generación de la Caldera 2. Este evento marcó el inicio de la Unidad Villarrica 2 hace unos 13.850 años AP al comenzar a formarse un nuevo estratocono mediante erupciones efusivas y explosivas con productos principalmente de composición andesítico–basáltica. Esta etapa culmina con una gran erupción explosiva hace unos 3.700 años AP (Ignimbrita Pucón) y el colapso parcial de la cima del edificio construido durante la Unidad

Villarrica 2, generando la Caldera 3. Poco tiempo después comenzó la construcción de un nuevo estratocono que corresponde al actual (Unidad Villarrica 3) y que rellenó la depresión caldérica a partir de erupciones efusivas y explosivas.

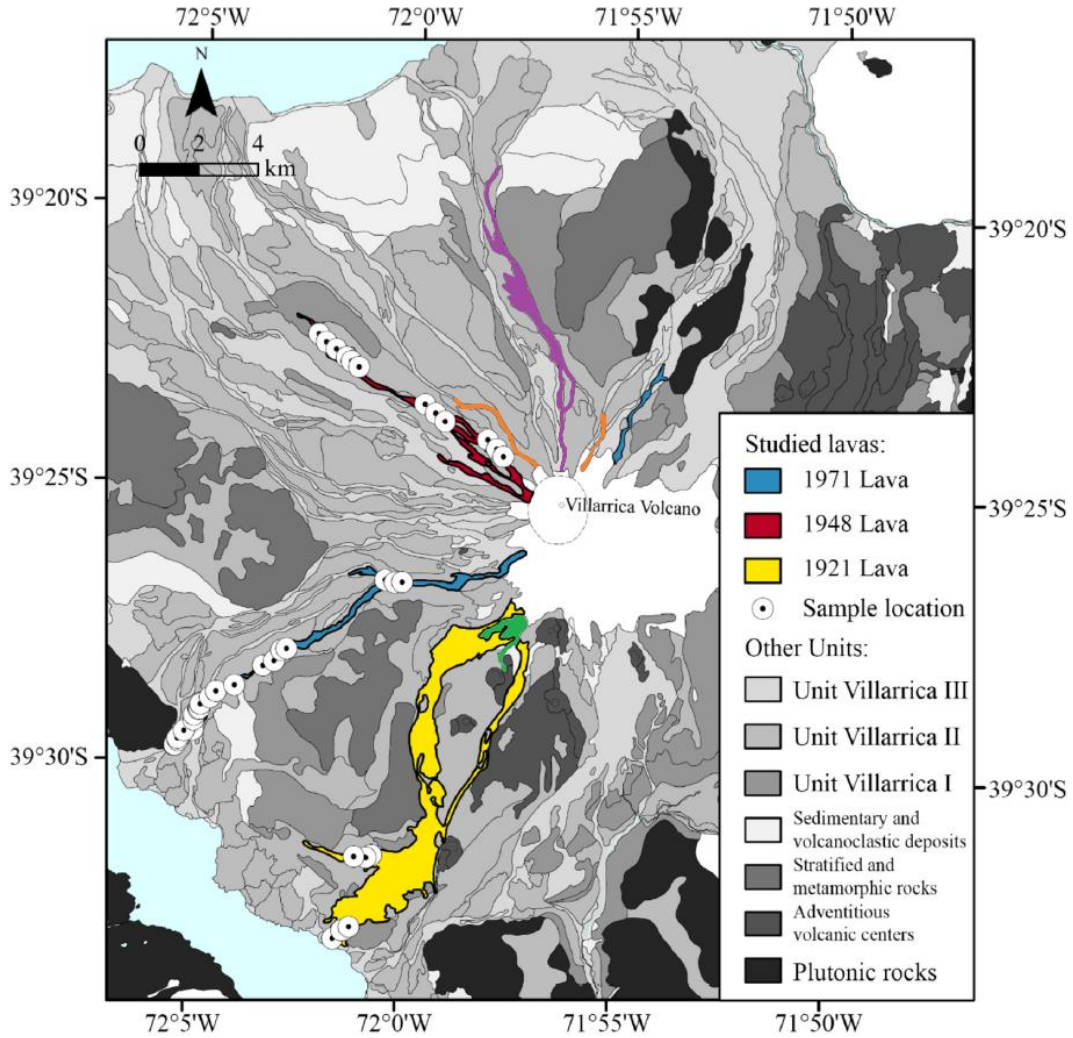


Figura 2.2: Mapa geológico de Pizarro et al. (2019) modificado con los flujos de lava de las erupciones de 1787 (morado), 1964 (verde) y 1984 (naranja) según Moreno & Clavero (2006).

2.1.1.2 *Erupciones históricas de estudio.*

Las erupciones históricas documentadas desde el año 1558 (SERNAGEOMIN, 2021) han consistido en actividad explosiva leve a moderada, donde ha habido emisión de coladas de lava,

dispersión de flujos piroclásticos de caída y generación de lahares producto de la fusión del hielo o nieve en los eventos eruptivos.

La primera erupción histórica del año 1558 destruyó el pueblo de Villarrica que se encontraba emplazado en la ubicación actual de Pucón. Se reconstruyó el pueblo donde actualmente se encuentra, pero fue abandonado entre los años 1602 y 1882 debido a guerras entre colonos españoles y mapuches. Debido a lo anterior, faltan reportes de las erupciones ocurridas entre aquellos años. Posteriormente entre 1750 y 1882 el área fue repoblada de forma gradual por colonos españoles, de forma que los informes de las erupciones fueron más comunes y considerados de mayor confiabilidad (Van Daele et al., 2014).

Cabe mencionar que desde la erupción de 1985 el volcán Villarrica ha presentado un lago de lava activo en su cráter que se desgasifica de forma continua (Moreno & Clavero, 2006).

2.1.1.2.1 *Erupción de 1787.*

Petit-Breuilh (2004) realizó una cronología eruptiva con los productos asociados a cada erupción de los volcanes hispanoamericanos. Allí se menciona que en la erupción de 1787 del volcán Villarrica hubo explosiones en el cráter, eyección de piroclastos, emisión de flujos de lava y la generación de una columna de gases y cenizas mayor a 1 km de altura. La autora establece un VEI que varió entre 1 y 2, considerado por el GVP como VEI 2. Van Daele (2014), con el estudio de los sedimentos de lago, añadió que se generaron lahares durante el evento eruptivo. A pesar de estos datos, no se tiene mucha certeza de la duración de esta erupción.

2.1.1.2.2 *Erupción de 1893 - 1894.*

Comenzó durante el 1 de diciembre \pm 30 días de 1893 y culminó el 1 de febrero \pm 30 días de 1894. Posee un VEI de 2 (Global Volcanism Program, 2021).

De acuerdo con Petit-Breuilh (2004), durante esta erupción hubo explosiones en el cráter central, pero no se tiene certeza de la ocurrencia de una columna eruptiva de gases y cenizas y la eyección de piroclastos. De haberse formado una columna eruptiva esta tuvo más

de 1 km de altura. El estudio de Van Daele (2014) comprobó que se generaron flujos laháricos durante la erupción.

2.1.1.2.3 *Erupción de 1921.*

Se inició el 10 de diciembre y se desconoce su fecha de término. Se le estima un VEI de 2 (Global Volcanism Program, 2021). De acuerdo con la información del GVP, la ocurrencia de esta erupción no se encuentra confirmada, siendo diferente el caso de una erupción confirmada ocurrida en 1920 (10–13 diciembre), lo cual se presta a confusión.

De acuerdo a Pizarro et al. (2019), esta erupción duró aproximadamente 36 horas. Se trató de un evento estromboliano con un VEI de 1–2. Hubo escasa eyección de material piroclástico, la formación de una columna de gas y la emisión de una colada “aa” y pahoehoe de dimensiones $13 \pm 3 \times 10^6 \text{ m}^3$ que fluyó hacia el sur. Según Petit-Breuilh (1994), además hubo explosiones.

Al consultar en el POVi (Proyecto Observación Visual Volcán Villarrica) se recabó más información acerca de esta erupción. A su vez, esta fuente posee datos recabados de Petit-Breuilh (2004) y Van Daele (2014). De acuerdo al POVi, esta erupción fue descrita por Petit-Breuilh (2004) quien le asignó un VEI de 1, pero no fue validada por el estudio posterior realizado por Van Daele (2014).

2.1.1.2.4 *Erupción de 1948 – 1949.*

Se estima que su fecha de inicio fue el 9 de octubre de 1948 y la de término el 3 de febrero del año 1949. Tuvo un VEI de 3 (Global Volcanism Program, 2021).

Esta erupción es considerada la más explosiva del Volcán Villarrica en el siglo XX. Fue del tipo estromboliano y conllevó la emisión de piroclastos y coladas de lava, con la generación de lahares y flujos piroclásticos de pequeño volumen. Las columnas eruptivas alcanzaron hasta 8 km de altura sobre el cráter en distintas etapas de la erupción. El principal flujo de lava alcanzó hasta 15 km de distancia desde la fisura, relleno parcialmente el valle del Estero

Molco. Tuvo una composición andesítico–basáltica, morfología “aa” con hasta 8 m de espesor en las zonas proximales y 15 m en el frente (Moreno & Clavero, 2006). El volumen estimado del flujo de lava principal es de $16 \pm 4 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Pizarro et al., 2019).

Según a la fuente del POVi, que consta de observaciones del profesor dr. Lorenzo Casertano, la erupción tuvo fases efusivas y explosivas, siendo desarrollada toda la actividad en el cráter central. De acuerdo a la misma fuente, los principales eventos eruptivos que ocurrieron durante la erupción fueron los siguientes:

- El día 18 de octubre de 1948 se inició una erupción paroxismal en la cual se generaron lahares que afectaron los cauces Voipir, Molco, Loncotraro, Correntoso, Turbio y Chaillupén. Ese mismo día formó una columna de vapor de unos 1000 m hacia el sur del volcán y se emitieron flujos de lava.
- El 1 de enero de 1949 se formó una pluma eruptiva que alcanzó una altura de 8 km y se generaron lahares que afectaron principalmente el sector SO del volcán (Chaillupén). En la fig. 2.3 se observa la columna eruptiva mencionada.
- El 31 de enero del mismo año hubo actividad similar a la ocurrida durante el 1 de enero. Allí se alcanzó la máxima intensidad de la erupción. Se generaron lahares que afectaron los cauces Turbio, Voipir y Huincacara.
- Los primeros días de febrero se generó una colada de lava en el sector SO (Fundo El Piraó) que en 4 días alcanzó una longitud máxima de 10 km, un ancho promedio de 60 m y una altura terminal de 15 m. Con aquellos datos se estimó un volumen de 9.000.000 m³, tasa de efusividad media de 26 m³/s⁻¹ y velocidad promedio de 104 m/h.



Figura 2.3: Volcán Villarrica durante la violenta fase explosiva del 1 de enero de 1949. Autor: Lorenzo Casertano.

2.1.1.2.5 *Erupción de 1964.*

Existen discrepancias en cuanto a esta erupción ya que algunos autores hacen la distinción entre dos erupciones, una ocurrida el año 1963 y otra en 1964, mientras que otros estiman que se trata de un solo evento eruptivo (1963–1964).

Moreno & Clavero (2006) hacen la distinción entre ambos eventos. La erupción de 1963 según los autores comenzó el 8 de marzo con explosiones y eyección de piroclastos principalmente hacia el este. Se emitieron flujos de lava hacia el SO a partir del cráter central y de una fisura ubicada al SO del edificio volcánico. El 2 de mayo se formó una columna eruptiva densa que generó la caída de material piroclástico hacia el NNE en las localidades de Pucón y

Palguín, y un lahar hacia el flanco norte. El 21 de mayo fueron emitidos nuevos flujos de lava que provocaron la generación de lahares que descendieron por los esteros del valle del Chaillupén. Lo mismo ocurrió en el mes de septiembre donde los lahares se dirigieron al sector norte, cortando el camino entre Villarrica y Pucón. Por otro lado, la erupción de 1964 fue una erupción del tipo estromboliana que conllevó la emisión de columnas de piroclastos y flujos de lava. Estos últimos provocaron el derretimiento de la nieve de la cima, generando lahares que fluyeron principalmente por los cauces del flanco norte del volcán, entre Villarrica y Pucón. Sin embargo, un lahar descendió por el cauce del estero Diuco hacia el sur, destruyendo parcialmente la localidad de Coñaripe y causando la pérdida de alrededor de 25 vidas humanas.

Según el Global Volcanism Program (2021) también se trata de dos erupciones distintas, una ocurrida el año 1963 desde el 25 de febrero (sin tener certeza de tal día) hasta el 21 de septiembre (o después) que correspondió a un VEI de 3 y de la cual no se tienen características; y otra que se desarrolló entre el 2 de marzo y el 21 de abril de 1964, donde hubo actividad en la cima y en el sector superior del flanco SO del volcán y a la que se asocia el lahar que destruyó el pueblo de Coñaripe donde se lamentó la pérdida de vidas humanas.

De acuerdo a la información del POVi, recabada del “Diario Austral” de Temuco, esta erupción ocurrió en los años 1963–1964, comenzando el 7 de marzo de 1963 y culminando el 3 de marzo del año siguiente. En ella hubo ruidos subterráneos, sismos volcánicos, explosiones, formación de una columna eruptiva de gases y ceniza, eyección de piroclastos, emisión de flujos de lava, generación de lahares y aumento del caudal de ríos. En la misma fuente se menciona que la erupción tuvo fases efusivas y explosivas. Durante marzo de 1963 fueron emitidas coladas de lava a partir de una fisura ubicada a 250 m bajo el cráter, en el flanco oeste del volcán, y se produjo actividad eruptiva explosiva en el cráter central. El día 14 de abril del mismo año, hubo emisión de lavas a partir del cráter principal, estimándose extensiones entre 500 y 1000 m. Posteriormente el día 15 se observó un flujo de lava deslizándose por el flanco oeste del volcán que se estimó que poseía 2 km de largo y 200 m de ancho.

2.1.1.2.6 *Erupción de 1971 - 1972.*

De acuerdo con información recabada del Global Volcanism Program (2021), la erupción comenzó el 29 de octubre del año 1971, y culminó el 21 de febrero del año siguiente. Tuvo un VEI de 2 y hubo actividad en la cima y en los flancos NE y SO, y generó múltiples flujos de lava.

Su actividad comenzó en octubre con explosiones débiles de gas y la extrusión de material piroclástico. El día 29 de noviembre se activa nuevamente la actividad en el volcán, eyectando flujos de lava y produciendo un cono de piroclastos en el cráter central. Se tiene registro de que los flujos de lava comienzan a emitirse a partir del 28 de noviembre de 1971. Posteriormente a inicios de diciembre alcanzaron altitudes de hasta 2.200 m. Entre los días 3 y 20 de diciembre de 1971 aumentó la actividad en el volcán. A fines del mismo mes se reporta la generación de tres flujos de lava de composición basáltica que alcanzaron una altitud aproximada de 2 km y fluyeron por el flanco SO del volcán, causando derretimiento del glaciar allí emplazado. Lentamente formaron un canal en el glaciar de profundidad entre 20 y 40 m. El contacto entre la lava y el glaciar provocó la generación de tres columnas densas de vapor de agua (lenta fusión del glaciar). Se reportaron emisiones de flujos de lava y piroclastos desde el cráter central cada 30 segundos. El 30 de diciembre se observó una profunda apertura fisural en la cima de volcán mientras este erupcionaba explosivamente. Simultáneamente se generaron flujos de lava que descendieron por las paredes norte y sur del volcán. Esto produjo derretimiento de glaciar, de forma que a su vez se generaron avalanchas conformadas por agua, arena y bloques de roca que alcanzaron los valles habitados durante la madrugada del 30 de diciembre. Se destruyeron varios puentes y casas, lamentando también la muerte de unas 30 personas. Los eventos ocurridos el 30 de diciembre de 1971 se muestran en las figuras 2.4 y 2.5. Cabe mencionar que, durante esta erupción, una colada de lava que fluía por el lado sur por poco llega al lago Calafquén, el cual se ubica hacia el sur del volcán. La roca poseía composición basáltica, con cerca de un 5% de olivino y 15% de fenocristales de plagioclasas (Global Volcanism Program, 2021).



Figura 2.4: 30 de diciembre de 1971, 00:30 hora local. El volcán en erupción es fotografiado desde Villarrica. Se observan las fuentes de lava a ambos costados del cono superior. Sobre el edificio volcánico se proyectan nubes de cenizas, gases y vapor de agua. Fuente: POVi.



Figura 2.5: 30 de diciembre de 1971. Se observa el cauce Chaillupén, en la base SE del volcán Villarrica. Una colada de lava tipo “aa” de unos 5 m de alto y 70 m de ancho avanza lentamente en dirección al lago Calafquén. El frente de la lava evapora los restos de agua dejados por los lahares, quemando y calcinando además la vegetación en los márgenes. Fuente: POVi.

De acuerdo a la información del POVi la erupción tuvo una fase efusiva y una explosiva. La efusiva ocurrió entre el 29 de octubre y el 29 de diciembre de 1971, comenzando con explosiones freatomagmáticas en el cráter central y luego emitiéndose la primera colada de lava hacia el SO (valle del río Chaillupén). En la cima se formó un cono de piroclastos mientras ocurrían explosiones rítmicas cada 3 minutos. Entre los días 3 y 20 de diciembre aumenta la actividad crecientemente, siendo emitidos delgados flujos de lava hacia el SO, los cuales descendieron hasta la base del volcán (a 2.000 m de altura aproximadamente). Según diversos autores, el cono piroclástico intracraterico colapsó horas o días antes del comienzo de la fase explosiva producto del hundimiento de la columna magmática. Por otro lado, la fase explosiva comenzó el 29 de diciembre de 1971 generando la fractura del cono superior en una longitud de 4 km de largo (con rumbo N30°E), a partir de la cual fueron emitidas cortinas de lava que alcanzaron 400 m aproximados de caída en su frente. La emisión de lava generó lahares en los sectores norte, oeste y sur del volcán que fluyeron a velocidades estimadas de 80 km/h y generaron la muerte y desaparición de alrededor de 15 personas. Fueron emitidas coladas de lava basáltica rica en olivino y muy líquidas que poseían morfología del tipo “aa” y cordadas en las cercanías a la fractura. Estas coladas descendieron por los valles del Chaillupén (flanco SO) y Pedregoso (flanco NE), donde en el primero alcanzó una longitud de 14 km, un ancho promedio de 200 m y un espesor promedio de 5 m, estimándose en 2,8 km² la superficie cubierta, mientras que en el segundo la extensión aproximada fue de 6 km. Varela Moreira (2017) añade que las coladas de lava emitidas en los valles antes mencionados tuvieron una temperatura de extrusión de entre 1123 y 1148 ± 6°C. Se estima que el volumen total de lava emitida durante esta fase fue de 30.000.000 m³ y la tasa máxima de emisión de 500 m³/s aproximadamente. En las 12 horas siguientes, la actividad decreció significativamente, siendo solo observadas emisiones de ceniza y vapor durante enero y febrero de 1972.

A diferencia de la información del POVi, Moreno & Clavero (2006) y Castruccio & Contreras (2016) mencionan que la extensión máxima alcanzada por el flujo de lava principal fue de 16,5 km en el valle del Chaillupén y casi alcanzó la ribera del lago Calafquén. Según Castruccio & Contreras (2016) el flujo de lava fue fuertemente confinado por la topografía del valle,

excediendo rara vez los 150 m de ancho y variando el espesor entre 4 y 12 m. Además, mencionan que se registró una tasa de efusión máxima de $\sim 800 \text{ m}^3/\text{s}$ y un volumen de lava estimado de $\sim 50 \times 10^6 \text{ m}^3$. Pizarro et al. (2019) calcularon un volumen total de lava de $26 \pm 7 \times 10^6 \text{ m}^3$, al igual que Granados et al. (2021) quienes lo estimaron en $11 \times 10^6 \text{ m}^3$.

2.1.1.2.7 Erupción de 1984 – 1985.

De acuerdo con POVi (2021) esta erupción comenzó el día 30 de octubre de 1984 (a las 20:45 (GTM)) y culminó el 18 de noviembre de 1985. Es considerada del tipo estromboliana y se le asigna un VEI de 2. Presentó cuatro fases eruptivas características desde el 30 de octubre hasta el 18 de noviembre de 1984 que son detalladas a continuación:

Primera fase (30 de octubre a 2 de noviembre de 1984):

Las primeras semanas de octubre de 1984 los sismogramas emplazados en el flanco NNO del volcán Villarrica comenzaron a mostrar un incremento en la microsismicidad del volcán. Posteriormente el día 30 de octubre comenzó la erupción como tal con una fuerte fase eruptiva que conllevó explosiones en el cráter central y derrame lávico por el flanco NNO del cráter a través de una fisura producida durante la erupción de 1971.

El primer flujo de lava se deslizó sobre el hielo generando una avalancha mixta de hielo y nieve que avanzó 5 km desde el cráter. Las emisiones continuas de lava desde el cráter central hacia el NNO derritieron la cubierta de hielo, formando un canal de 30 a 40 m de profundidad. En el fondo del canal, formado por lava solidificada recientemente, se observaban dos flujos lávicos delgados.

En el cráter central se formó un cono de piroclastos que produjo una débil erupción estromboliana.

Segunda fase (3–12 de noviembre de 1984):

Durante esta fase se registró una intensa actividad sísmica superficial (vibraciones armónicas), en especial durante los días 4 y 5 de noviembre. En los días posteriores el volcán

no mostró señales de actividad eruptiva, sin embargo, se informó desde Pucón la generación de deslizamientos de tierra y pequeños sismos. Posteriormente durante el 10, 11 y 12 de noviembre se reinició la actividad estromboliana a partir del cono intracraterico, emitiéndose flujos de lava hacia el NNE (ver fig. 2.6).



Figura 2.6: Vista aérea desde el norte del cráter central del volcán Villarrica en noviembre de 1984. En el interior del cráter se observa un cono de piroclastos y una laguna surtidora de lava en su base. Fuente: POVi.

Tercera fase (12-17 de noviembre de 1984):

Desde el 30 de octubre hasta el 12 de noviembre se estima que fue emitido un volumen aproximado de 2.000.000 m³ de lava. El mismo día 12 se generó una avalancha de bloques de lava, hielo y nieve que alcanzó una longitud máxima de 3 km y formó un “puente de hielo” de 150 m de longitud aproximadamente. Posterior a esto la actividad eruptiva decreció y se observaron débiles emisiones de vapor en el cono ubicado dentro el cráter y en el “puente de hielo”.

Cuarta fase (18 de noviembre de 1984):

El día 18 de noviembre de 1984 tuvo lugar una débil emisión de lava que dio origen a un nuevo canal de hielo hacia el NO de 200 m de longitud y 50 m de ancho aproximadamente.

Luego de los eventos ocurridos durante las fases eruptivas descritas, la erupción mantuvo un estado estacionario que presentó explosiones rítmicas cada 10–15 segundos con proyección de material piroclásticos aproximadamente 30 m sobre el cráter central. Esto se desarrolló entre el 18 de noviembre y el 6 de diciembre de 1984.

Durante el mediodía del 6 de diciembre se generaron grandes flujos lávicos desde el cráter central dirigiéndose hacia las nacientes del río Correntoso (cota de los 1400 m aproximadamente). Otra colada de lava fluye hacia el NNE en dirección al río Pedregoso. El día siguiente, mediante observaciones aéreas, se estima que la emisión de lava alcanza su mayor intensidad desde el 30 de octubre. El cono intracratérico de material piroclástico formado con anterioridad era difícilmente reconocible a la fecha, sin embargo, era posible apreciar dos cráteres internos activos eyectando material incandescente en forma sostenida. Se formó un lago de lava semicircular en el sector oeste del cráter principal a partir del cual la lava fluía por gravedad a través de la fisura originada en 1971 hacia el NNE (río Pedregoso) y NNO (estero Correntoso). Se originaron pequeñas avalanchas de barro hacia el lago Villarrica debido al aumento en el caudal de los esteros Zanjón Seco y río Pedregoso.

Durante la madrugada del 14 de diciembre se observaron intensos flujos de lava bajando por los cauces labrados en el hielo. Hasta el día 22 del mismo mes se mantuvo la actividad efusiva que alimentó los dos flujos de lava formados en los días anteriores.

Durante el trabajo de campo desarrollado por Werner Keller en febrero de 2006 se midió el ancho y espesor de la colada de lava ubicada hacia el NNO del volcán. Se determinó un ancho de unos 80 m y espesor de 5 m a unos 4 km al NNO del cráter principal del volcán Villarrica (fig. 2.7).



Figura 2.7: Estero Correntoso. En el margen inferior de la imagen se aprecia la colada de lava “aa” de 1985 a unos 4 km al NNO del cráter principal. Autor: Werner Keller.

Moreno (1993) estimó una tasa de emisión de lava de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a esta erupción, considerando una duración de 1,5 meses. El volumen de lava emitido fue calculado en $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ por Granados et al. (2021).

2.2 Volcán Llaima

El volcán Llaima se encuentra ubicado en la región de la Araucanía, a 74 km al este de Temuco, dentro del Parque Nacional Conguillío, específicamente en las coordenadas geográficas 38.692°S 71.729°W. Posee una altitud de 3.125 m s.n.m. y es uno de los volcanes andinos más grandes al poseer un área basal de 490 km² y un volumen de 377 km³ (Farías Lisboa, 2020). Además al igual que el volcán Villarrica, representa uno de los más activos de la Zona Volcánica Sur de la Cordillera de los Andes al registrar más de 50 erupciones desde el año 1640 (Bouvet De Maisonneuve, 2011).

Es un complejo volcánico de escudo y mixto compuesto. La estructura de escudo volcánico comprende la base desde aproximadamente los 1.000 m s.n.m. por el norte, oeste y este, y los 450 m s.n.m. por el sur, hasta la cota de los 2.250 m. Sobre esta altura se eleva un estratovolcán mixto compuesto de dos cimas principales, alineadas en dirección NNE, con 3.125 m la cima norte y 2.920 m la cima meridional. Aproximadamente 40 conos satélites de escoria se distribuyen sobre sus flancos. (Naranjo & Moreno, 1991). Las dos cimas principales mencionadas por los autores hacen referencia al par de cráteres considerados históricamente activos: uno ubicado en la cumbre y otro hacia el SE, este último siendo denominado Pichillaima. El cráter de la cumbre principal (norte) está abierto y posee un diámetro aproximado de 350 m y 300 m de profundidad, además presenta una fumarola activa desde 1994 con emisión de gases y vapor de agua. La cumbre menor (sur) presenta restos de un pequeño cono de escorias anidado en un cráter obstruido de unos 200 m.

Las erupciones históricas documentadas han sido principalmente estrombolianas, habiendo emisión de coladas de lava, generación de lahares, proyección de piroclastos y ocasionalmente la generación de flujos piroclásticos. La composición de sus productos eruptivos es mayoritariamente basáltica a microbasáltica y andesítica a andesítica basáltica, y en menor medida dacítica (Global Volcanism Program, 2021).



Figura 2.8: Volcán Llaima desde Sierra Nevada. Autora: Catalina Mellado.

Según información obtenida del Global Volcanism Program (2021) del Instituto Smithsonian la población se distribuye alrededor del volcán Llaima de la siguiente manera:

Tabla 2.2: Cantidad de población a diferentes distancias del volcán Llaima (Global Volcanism Program, 2021).

Distancia (dentro de) [km]	Población
5	86
10	811
30	18.568
100	630.458

2.2.1 Historia eruptiva.

Al igual que en el caso del volcán Villarrica, en este apartado se describirá la evolución del volcán Llaima y posteriormente se caracterizarán las erupciones de estudio: 1640, 1751, 1780, 1945, 1957 y 1994.

2.2.1.1 Evolución del volcán Llaima (Naranjo & Moreno, 2005).

Se considera que comenzó su actividad durante el Pleistoceno Medio a Superior. Se construyó el primer edificio volcánico mediante erupciones efusivas y de baja explosividad que generaron una secuencia de lavas predominantemente andesítico-basálticas, con escasos basaltos y andesitas y raras intercalaciones de facies de brechas. Este macizo habría alcanzado una altura sobre su base similar al volcán actual (2500 m) y se vio afectado en gran parte por la Glaciación Llanquihue, en la cual se generaron valles glaciares a su alrededor. Esta se considera la primera etapa evolutiva que corresponde a la Unidad Llaima Ancestral y culminó cuando se generó una gran erupción explosiva (hace aprox. 13–13,5 ka) que produjo el colapso parcial del edificio volcánico, generando una caldera de 5–8 km de diámetro y el depósito Ignimbrita Curacautín de 2.200 km² de extensión y 24 km³ de volumen. Estos depósitos poseen un alto intervalo composicional que se asocian a la existencia de una cámara zonada en vías de diferenciación e inyección de un pulso de magma más básico. Lo anterior también se relaciona al desarrollo de una etapa evolutiva altamente explosiva que generó la Secuencia Trifultriful. Durante este periodo se generaron, además de la Ignimbrita Curacautín, depósitos de caída de pómez pliniana y de oleada piroclástica. Esta última etapa culminó hace unos 7.600–7.200 años AP. Posteriormente, hasta ca. 3–4 ka AP, la actividad explosiva continuó con menor intensidad, donde los productos eruptivos cambiaron su composición desde andesitas y dacitas a andesitas basálticas dentro de la Secuencia Trifultriful.

Posteriormente se construyeron una serie de centros adventicios en los flancos del volcán, alineados en una dirección preferente SO–NE a lo largo de 25 km y en forma de arco, los cuales corresponden a las Unidades Llaima Fisural 1 y 2.

De forma posterior a la etapa más explosiva del volcán (luego de los 3 ka AP), se inició un periodo efusivo de emisión de lavas y piroclastos de composición andesítico-basáltica que constituyen la Unidad Llama Cono Principal. Durante esta etapa se construyó un nuevo edificio volcánico del tipo combinado estratovolcán-mixto-escudo y evolucionó el cono hasta como se le ve actualmente, con sus dos cimas principales.

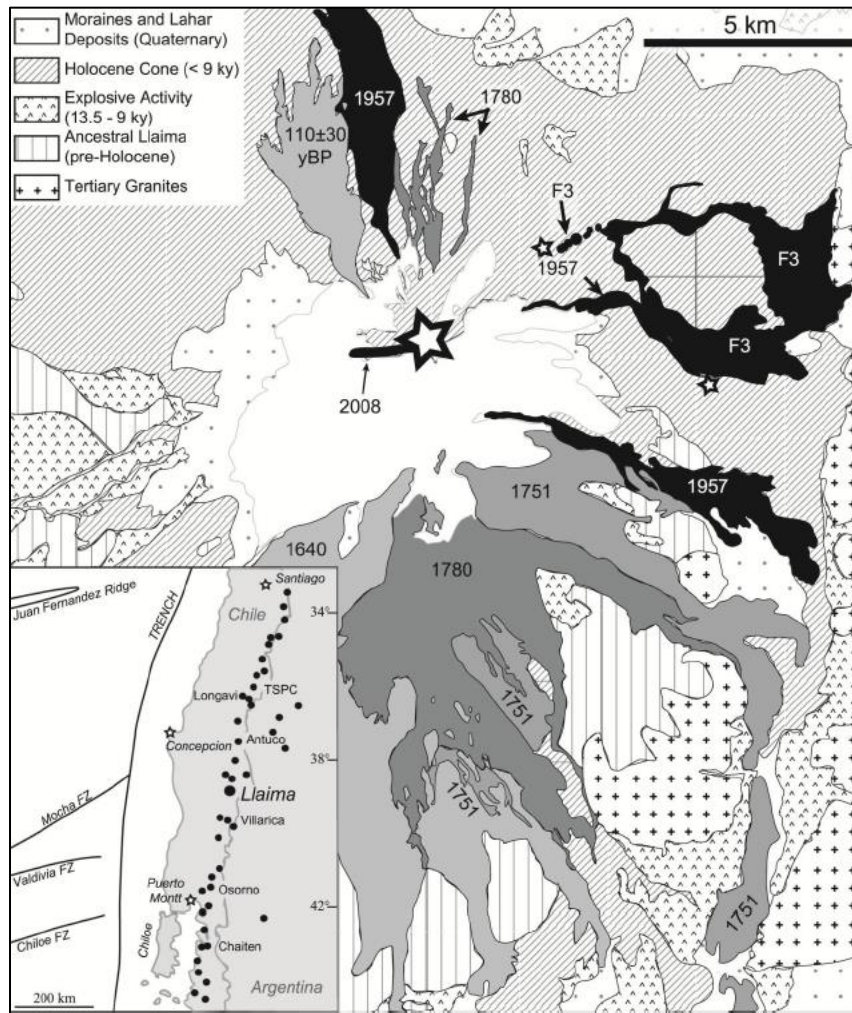


Figura 2.9: Mapa geológico del volcán Llaima de Naranjo & Moreno (2005) modificado por De Maisonneuve et al. (2012). Los flujos de lava históricos están etiquetados y los flujos de lava pre-históricos son indiferenciados y marcados con rayas oblicuas. F3: Unidad Llaima Fisural 3.

2.2.1.2 *Erupciones históricas de estudio.*

A partir de la gran erupción del año 1640, la actividad del volcán se ha notado efusiva a explosiva de baja intensidad, y ha generado coladas de lava y piroclastos escoriáceos de composición basáltica y andesítico-basáltica, lo cual revela un comportamiento predominantemente estromboliano con fases subplinianas y algunas hawaianas. Las erupciones históricas se han desarrollado sobre los flancos del volcán y cráteres de las cimas, teniendo una orientación fisural en dirección de estas (Naranjo & Moreno, 2005).

2.2.1.2.1 *Erupción de 1640.*

Se estima que ocurrió durante febrero de 1640, desconociéndose su fecha de término. Posee un índice de explosividad volcánica (VEI) de 4 (Global Volcanism Program, 2021). Los registros de esta erupción indican que se trata de la erupción histórica de mayor magnitud del volcán (Naranjo & Moreno, 2005).

De acuerdo a Naranjo & Moreno (2005) las lavas emitidas durante esta erupción se originaron a través de dos fisuras de 500 m de largo ubicadas en la cota 2.250 m, sobre los flancos noroeste y suroeste y con esas orientaciones respectivamente. El flujo de lava emitido de la fisura ubicada en el flanco noroeste alcanzó una extensión de 6 km, mientras que la del suroeste unos 15 km. Presentaron morfología “aa” y composición andesítica-basáltica rica en sílice (54,64–55,73% de SiO₂), destacando como las lavas históricas con mayor contenido de SiO₂ y K₂O.

2.2.1.2.2 *Erupción de 1751–1752.*

Comenzó el 18 de diciembre y culminó el año 1752. Posee un VEI de 2 (Global Volcanism Program, 2021).

La colada de lava generada durante esta erupción descendió por el valle del Trifultrful con dirección a Melipeuco, y se originó en la cima sur del volcán. Alcanzó espesores de hasta 6 m en el extremo distal, a 23 km de la fuente de emisión, y presentó morfología “aa”.

Correspondió a un basalto porfírico (35% en volumen de fenocristales), con cristales de plagioclasa, olivino y escaso clinopiroxeno, con 51,78–52,61% de SiO₂ (Naranjo & Moreno, 2005).

2.2.1.2.3 *Erupción de 1780.*

Las lavas asignadas a esta erupción se observan en el flanco norte (entre los 2.000 y 2.200 m s.n.m.) y en el sur del volcán (2.150 m s.n.m.). En el sector norte formaron un campo de lavas angostas entrecruzadas que alcanzan 5 km de longitud desde su origen que se ubica a poco más de 1 km al este de la fisura del año 1640. Poseen morfología “aa”, presentando espesores máximos de 1,40 m en el frente (sector Captrén Alto). En el flanco sur, los flujos de lava alcanzaron extensiones de 10 km desde el centro de emisión (ubicado a 1 km al sur de la fisura del año 1640) y este se encuentra cubierto de campos de lava pahoehoe que en superficie muestran estructuras tipo túmulos, cordones trenzados y formas ovoidales parecidas a las lavas almohadilladas. Los frentes de estas coladas alcanzaron espesor de entre 4 y 6 m, son del tipo “aa” y llegaron a 4,5 km de Melipeuco. Petrográficamente corresponden a basaltos porfíricos (40% en volumen de fenocristales) con cristales de plagioclasa, olivino y escaso clinopiroxeno, y químicamente a andesitas basálticas de bajo sílice (52,00–53,12% de SiO₂) (Naranjo & Moreno, 2005).

Existe una controversia con las lavas que se asocian a esta erupción. En el estudio realizado por Roperch et al. (2015) se concluyó de acuerdo a los datos recabados que el depósito de lava que se estimaba que había sido emitido en esta erupción fue emplazado en el intervalo de 1820–1900 y no en el año 1780. Los autores estimaron que probablemente se trata del flujo de lava asociado a la erupción de 1875–1876. Cabe mencionar que la erupción del año 1780 no cuenta con registros en el Global Volcanism Program (2021).

2.2.1.2.4 *Erupción de 1945.*

Según el Global Volcanism Program (2021) la erupción de 1945 comenzó el 31 de marzo y terminó el 3 de abril, presentando un VEI de 3.

De acuerdo a Naranjo & Moreno (2005) durante la erupción se emitió lava desde el cráter principal, debajo del hielo y hacia el sector este. Llegó a alcanzar 10 km de longitud, una potencia de 13 m en su frente y fue encauzada en una quebrada. Presenta composición andesítico-basáltica (52,18 SiO₂) levemente porfírica con cristales pequeños de plagioclasa y escaso olivino, y morfología del tipo “aa”.

2.2.1.2.5 Erupción de 1955–1957.

Se estima que se inició el 22 de octubre de 1955 y culminó el 16 de noviembre \pm 15 días de 1957. Se produjo actividad en el cráter de la cima y en el ubicado al SE (Global Volcanism Program, 2021). Se trató de una erupción del tipo estromboliano que presentó un VEI que varió entre 2 y 3. A esta erupción se le suele nombrar solo por el año de término, 1957, a diferencia de la convención general que expresa que las erupciones prolongadas se nombran según el año que comenzaron. Esto se debe a que se requiere tener una coherencia entre el mapa geológico de Naranjo & Moreno (2005) y artículos anteriores sobre el volcán Llaima.

Se emitieron flujos de lava a partir de dos fuentes: una ubicada en el flanco norte (cráter de la cima) y otra en el lado este de la cima sur del volcán (cráter SE). La lava que se emitió por el norte originó un flujo de 12 km de largo que descendió hacia el valle del río Captrén a partir de una fisura de 1 km de longitud, bajo los 1.900 m s.n.m., paralela al noreste de la fisura asociada a la erupción del año 1640. Por otro lado, la emitida por el sur, se deslizó hacia el valle del río Trifultruful. Las lavas poseen principalmente morfología del tipo “aa”, aunque a partir de una abertura de túnel de lava también fueron emitidas lavas pahoehoe (cordadas). Los frentes llegaron a alcanzar 8 m de espesor. Corresponden a rocas porfíricas (25% de volumen de fenocristales) con cristales de plagioclasa, olivino y clinopiroxeno, y dado su contenido en sílice (51,84–52,48% de SiO₂) se encuentran en el límite entre basalto y andesita basáltica (Naranjo & Moreno, 2005).

Esta erupción produjo flujos de lava voluminosos en los flancos norte, noreste y este del volcán que poseen una composición de 51,7–52,5 wt% de SiO₂ y 0,99–1,05 wt% de TiO₂ (De

Maisonneuve et al., 2012). Los flujos emitidos desde el norte se originaron del cráter principal, y el flujo este a partir del cráter Pichillaima y de un respiradero ubicado ligeramente al sur del cráter principal. En el cráter principal se formó una colada de morfología “aa” que se extendió hasta ~1,2 km, con un ancho de 200–250 m (Farías Lisboa, 2020).

Poco se conoce de la evolución temporal de esta erupción. El último periodo eruptivo generado desde el 14 de enero hasta noviembre de 1957 presentó fisuras laterales en los flancos norte, este y sureste del volcán, fuentes de lava basáltica a altas tasas y la generación de lahares. Este periodo se puede describir en 3 etapas:

- Etapa 1 (14 de enero – 19 de febrero): Se produjeron ruidos subterráneos perceptibles hasta Victoria y sismos volcánicos. Durante esta etapa se generaron erupciones menores que conllevaron una débil emisión de cenizas.
- Etapa 2 (19 – 21 de febrero): Durante estos días se registró la emisión de coladas de lava. El 21 de febrero se generó un flujo lahárico que descendió por el valle del Trifultruful destruyendo un puente provisorio. Esto a su vez generó que los ríos Trifultruful y Allipén cambiaran su curso y generaran inundaciones. Fueron cortados los puentes Cunco – Collahuén y Peuco – Villa García.
- Etapa 3 (22 – 24 de febrero): Se formó un nuevo cráter al interior del cráter principal, el cual formó una columna eruptiva que depositó una capa de ceniza hasta la ciudad de Temuco. Se emitió vapor de agua y un flujo de lava en el flanco norte que alcanzó una velocidad de ~6 km/h. El día 23 se generaron lahares que afectaron a Peuco. El día 24 cesó la actividad, siendo visibles fumarolas en cráteres y fisuras. La caída de ceniza produjo un depósito de 2 cm de este material a los pies del volcán.

La unidad de tefra de 10 cm de espesor vinculada a esta erupción se conserva en el flanco este, de acuerdo con la dirección predominante del viento, fue producida por una vigorosa erupción estromboliana que duró 12 horas. (Farías Lisboa, 2020)

El volumen de la lava emitida durante la erupción fue de hasta ~0.5–0.8 km³ según el espesor y la extensión de los flujos de lava (Bouvet De Maisonneuve, 2011).

2.2.1.2.6 *Erupción de 1994.*

Comenzó el 17 de mayo de 1994 y culminó el 30 de agosto del mismo año. Se le estima un VEI de 2, siendo considerada una erupción más pequeña que las anteriormente descritas. Durante el mes de mayo tuvo un alto componente freático, evidenciando una erupción del tipo estromboliana a subpliniana y teniendo lahares asociados e inundaciones. Se produjo actividad en el cráter que se ubica al SE y en el sector superior del flanco SO. Esta erupción fue emitida desde una fisura de 500 m de largo, con tendencia N10°E, generada en el cráter de la cima. Allí se produjeron pequeñas explosiones en intervalos de 3 segundos y fuentes de lava que alcanzaron hasta 200 m de altura. A lo largo de la fisura se generó un rápido y violento derretimiento del hielo y también su vaporización, de forma que la lava penetró a través de este generando un flujo de lava que fue drenado a través de la parte inferior del glaciar situado en el flanco oeste del volcán. La extensión del flujo de lava subglacial actualmente sigue siendo incierta. El derretimiento de la nieve provocó lahares que descendieron por el flanco oeste hacia el río Calbuco y luego alcanzaron el río Quepe. Añadido a lo anterior, en esta erupción se produjo una columna compuesta de ceniza, gas y vapor que alcanzó una altura de ~ 4 – 5 km sobre la cima del cráter. La tefra cayó sobre una zona de 300 km de largo, en forma alargada hacia el ESE. En agosto, durante los días 25 a 30 de mayo se generaron plumas eruptivas que llegaron a alcanzar los 3,5 – 4 km de altitud el día 29. Allí se notaba ausencia de vapor, lo cual sugería que se trataba de una erupción con alto componente magmático. Los productos fueron emitidos a partir de un cráter de 100 m de diámetro ubicado en el lado este del cráter principal, rodeado por un pequeño cono de salpicaduras que cubría el suelo del cráter (Global Volcanism Program, 2021).

Durante esta erupción la lava fue emitida hacia el suroeste del cráter principal, fluyendo bajo el hielo y generando un lahar (y crecida) hacia el río Calbuco. El material piroclástico juvenil asociado posee una composición de 52,75–53,11 de SiO₂ (Naranjo & Moreno, 2005).

La tasa de efusión de lava fue de alrededor de 60 m³/s, siendo emitido un volumen de 4,5 x 10⁵ m³ de lava (Granados et al., 2021).

La actividad eruptiva desarrollada durante el día 17 de mayo de 1994 en el volcán Llama se observa en la figura 2.10.



Figura 2.10: 17 de mayo de 1994. Una columna eruptiva se eleva sobre el volcán Llama. Las fuentes de lava son visibles a lo largo de una fisura de 550 m de largo ubicada en el sector superior del flanco SSE que produjo un flujo de lava subglacial. Autor: Hugo Moreno (1994).

III Marco metodológico

3.1 Trabajo de campo

Se realizó trabajo de campo enfocado en el área de estudio del volcán Llaima. El trabajo en terreno fue realizado en conjunto con funcionarios de SERNAGEOMIN. Consistió en 4 días en los cuales se visitaron distintos puntos en los que se poseía conflicto en cuanto a la delimitación de los depósitos de lavas históricas de estudio. Esta tarea permitió realizar una cartografía de mayor precisión en aquellas zonas de interés. Sumado a lo anterior, se realizó la medición de espesores de las coladas de lava utilizando a una persona de escala para la estimación de la altura del depósito, junto con la toma de muestras de ellos.

3.2 Cartografía

Para la obtención de los parámetros físicos asociados a las coladas de lava de las erupciones históricas de los volcanes Villarrica y Llaima, se realizó la cartografía de detalle de dichas coladas utilizando el software ArcGIS Pro de ESRI versión 2.5. Para ello se crearon archivos vectoriales (shapefiles) de tipo polígono para cada lava histórica de cada volcán, en los cuales se delimitó la zona correspondiente al depósito de lava asociada a las erupciones de estudio.

Como base se usaron los modelos de elevación digital (MDE) correspondientes a los volcanes facilitados por SERNAGEOMIN. El MDE del volcán Villarrica fue generado con datos Pleiades stereo en el software Catalyst, cubre únicamente el sector noroeste del volcán y posee una resolución de 1 m. También se contó con imágenes satelitales de 2 m de resolución correspondientes a la misma zona que el MDE. En el volcán Llaima se trabajó con un producto asociado al modelo de elevación digital correspondiente a un modelo de sombras que cubre la totalidad del área de estudio y posee 2,5 m de resolución. Además, se utilizaron imágenes satelitales de 3 m de resolución. Para la realización de la cartografía de las lavas históricas de los volcanes también fueron utilizados los mapas geológicos correspondientes y cartografías previas de los flujos para identificar y delimitar de manera más detallada el área del depósito.

3.3 Obtención de parámetros

La recopilación de distintos parámetros asociados a las coladas de lava de las erupciones históricas se realizó mediante una exhaustiva revisión bibliográfica de documentos históricos y publicaciones científicas. Sumado a esto, en el presente trabajo se determinaron los parámetros de longitud máxima, ancho máximo, espesor promedio, área total, volumen total y tasa de emisión máxima.

Para la obtención de longitud y ancho máximos se utilizó la herramienta Measure que posee el software ArcGIS Pro 2.5. La longitud máxima fue medida a lo largo del polígono cartografiado en cada lava de estudio siguiendo la dirección de este de acuerdo a un flujo tipo Manhattan (Mossoux et al., 2016). Por otro lado, el ancho máximo se midió de forma perpendicular a la dirección de avance del flujo de lava, en el lóbulo de mayor anchura.

El espesor de los flujos de lava fue obtenido mediante el trabajo en terreno previamente descrito y el desarrollo de perfiles topográficos en ArcGIS Pro 2.5. Los perfiles se generaron creando un archivo vectorial tipo shapefile de líneas, sobre las cuales se aplicó la herramienta de análisis 3D denominada Functional Surface y en particular Interpolate Shape. Para esta última se requirió de la utilización del MDE a modo de capa de entrada debido a que allí se encuentran almacenados los datos de altura que permiten generar perfiles topográficos. Luego de haber generado tal archivo haciendo clic derecho sobre este era posible acceder a la opción Create profile graph, es decir, “crear perfil topográfico”. Se realizaron diferentes mediciones de acuerdo a las cualidades del flujo de lava en particular, y finalmente se utilizó el valor de espesor promedio para representar cada flujo de estudio.

El área de las coladas de estudio también fue calculada mediante ArcGIS Pro 2.5. Se determinó este valor utilizando la tabla de atributos de los polígonos, en la cual se creó el campo denominado Área con tal de realizar allí la medición con la herramienta de cálculo de geometría. Tal herramienta permitió el cálculo del parámetro de área total en km². En los casos en que se poseía más de un polígono de flujo de lava por erupción se trabajó realizando ajustes

a los datos que entregaba el software, tal como restar en caso de que un polígono estuviese dentro de otro de mayor área o sumar si fuese el caso contrario.

Para realizar el cálculo del volumen asociado a cada flujo de lava histórica no fue necesario el uso directo del software. Se determinó mediante la multiplicación entre el área total previamente calculada (en m²) y el valor de espesor promedio de los flujos de lava en metros.

Por último, la tasa de emisión fue calculada dividiendo el valor de volumen total de lava de cada erupción en el tiempo en el que fue emitido tal volumen, lo cual corresponde a la duración de la erupción. Por lo tanto, este valor corresponde al volumen emitido por unidad de tiempo.

3.4 Simulaciones en Q-LavHA

Q-LavHA (Quantum-Lava Hazard Assessment) es un complemento de acceso gratuito del software QGIS que permite la simulación de la probabilidad de inundación de flujos de lava canalizados de tipo “aa” generados a partir de uno o varios centros eruptivos en un modelo de elevación digital (MED). El complemento combina modelos probabilísticos y determinísticos existentes y propone mejoras para el cálculo de la probabilidad de propagación espacial del flujo de lava y la longitud terminal (Mossoux et al., 2016).

En primera instancia se requirió de la instalación del software QGIS 3.2 para posteriormente instalar el complemento Q-LavHA 3.1. La instalación se realizó ingresando al sitio web de Q-LavHA con tal de crear una cuenta, para luego descargar el archivo en formato ZIP. Después se inició QGIS, se ingresó a Complementos, luego a Administrar e instalar complementos y finalmente a Instalar a partir de ZIP, donde se buscó el archivo previamente descargado.

La interfaz de Q-GIS contenía el icono de Q-Lavha mediante el cual se accedía al cuadro de dialogo del complemento. En la ventana emergente se observaban cuatro pestañas distintas: ubicación de la abertura, parámetros del flujo, archivos de salida y opciones avanzadas. En la

primera pestaña se seleccionó el MDE de 12,5 m de resolución del volcán y luego se ingresó el tipo de abertura a partir de la cual se generaría el flujo de lava; en este trabajo se utilizó por punto y por área superficial de modo que se ingresaban las coordenadas XY correspondientes en cada caso, siendo cuatro en caso del área. En la segunda pestaña correspondiente a los parámetros del flujo de lava se ingresaron los valores de H_c , correspondiente al espesor, y H_p que hace alusión a la máxima altura de los obstáculos que podría superar el flujo lávico. Luego el complemento permitía ingresar el valor de longitud máxima del flujo mediante distintos tipos de flujo, entre los cuales se escogió el tipo Manhattan con tal de que la cartografía y el modelo fuesen congruentes. También se ingresó en esta misma pestaña el número de iteraciones que se consideraban necesarias, en este caso se realizaron 1500 por simulación. Finalmente en la pestaña de archivo de salida se destinó la carpeta del modelo y el nombre asociado para luego realizar la simulación.

IV Resultados

4.1 Cartografía

Se generó una figura que integra la totalidad de las lavas cartografiadas por volcán, y otras de las cartografías de detalle. Estas últimas integran los perfiles utilizados para la medición de ancho máximo del flujo y espesores de ser así el caso.

4.1.1 *Volcán Villarrica.*

A continuación, se muestran las figuras de las cartografías de lavas del volcán Villarrica.

FLUJOS DE LAVA HISTÓRICOS DEL VOLCÁN VILLARRICA

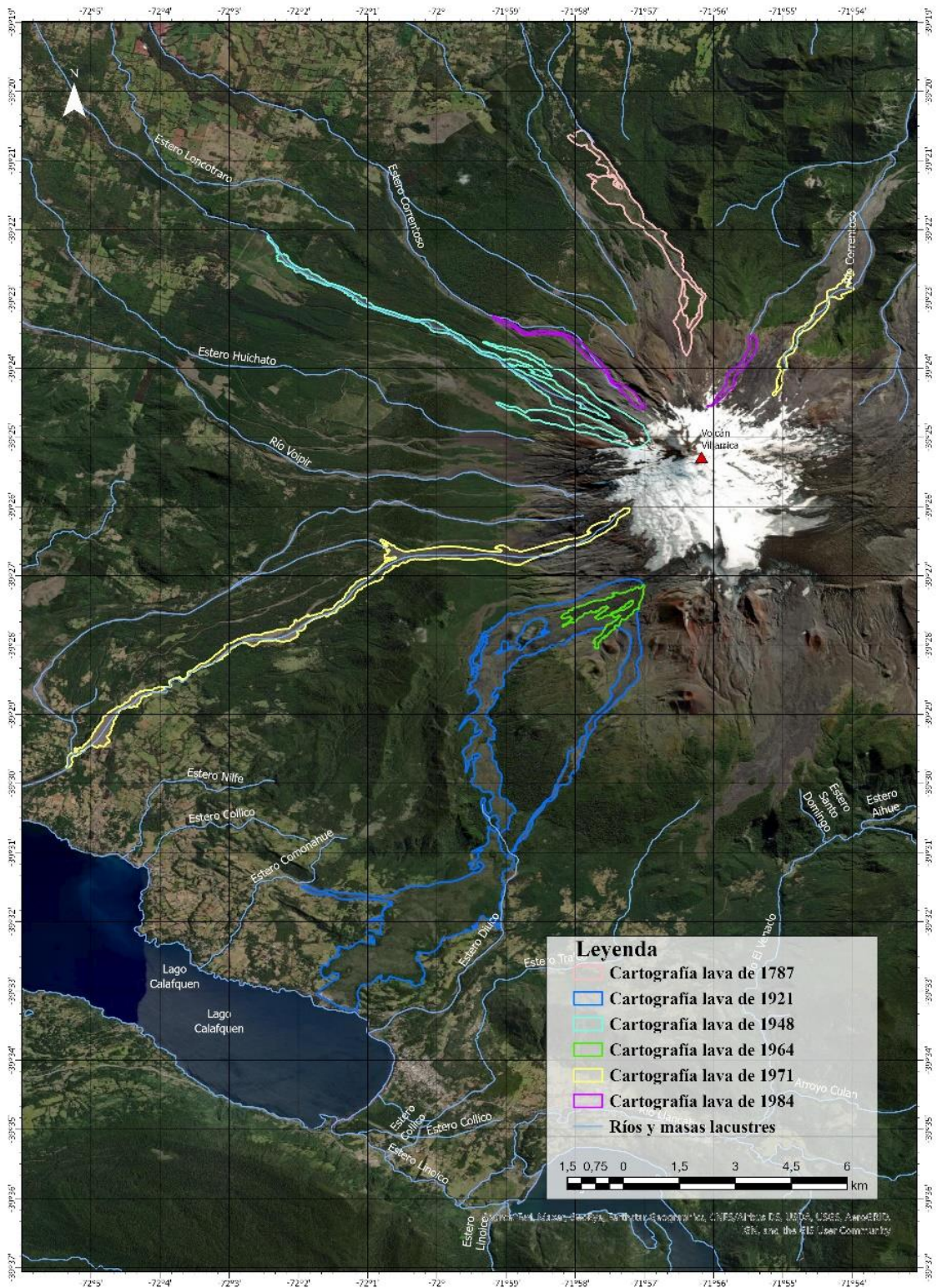


Figura 4.1: Cartografía de los flujos de lava históricos estudiados del volcán Villarrica.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1787 DEL VOLCÁN VILLARRICA

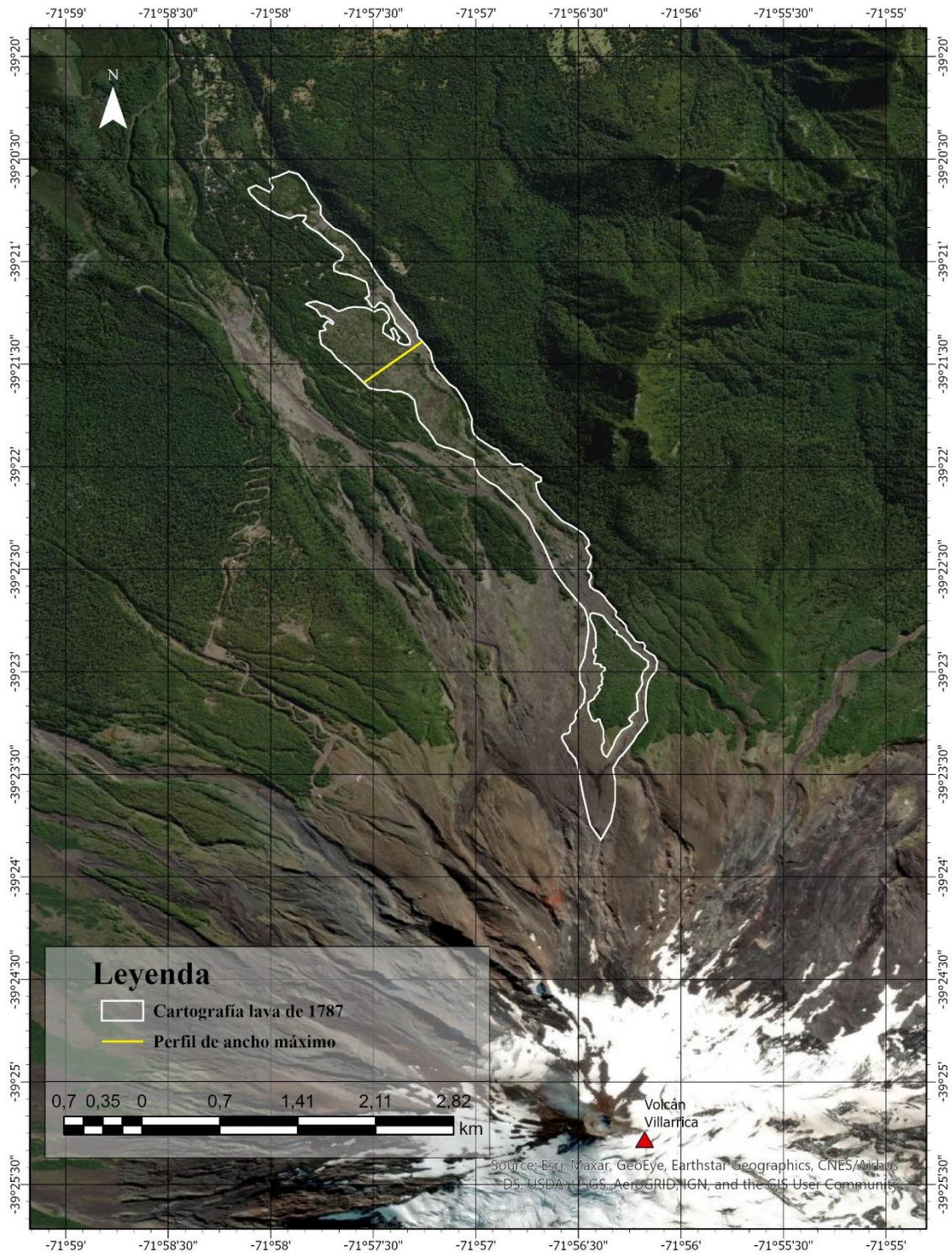


Figura 4.2: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1787 del volcán Villarrica.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1921 DEL VOLCÁN VILLARRICA

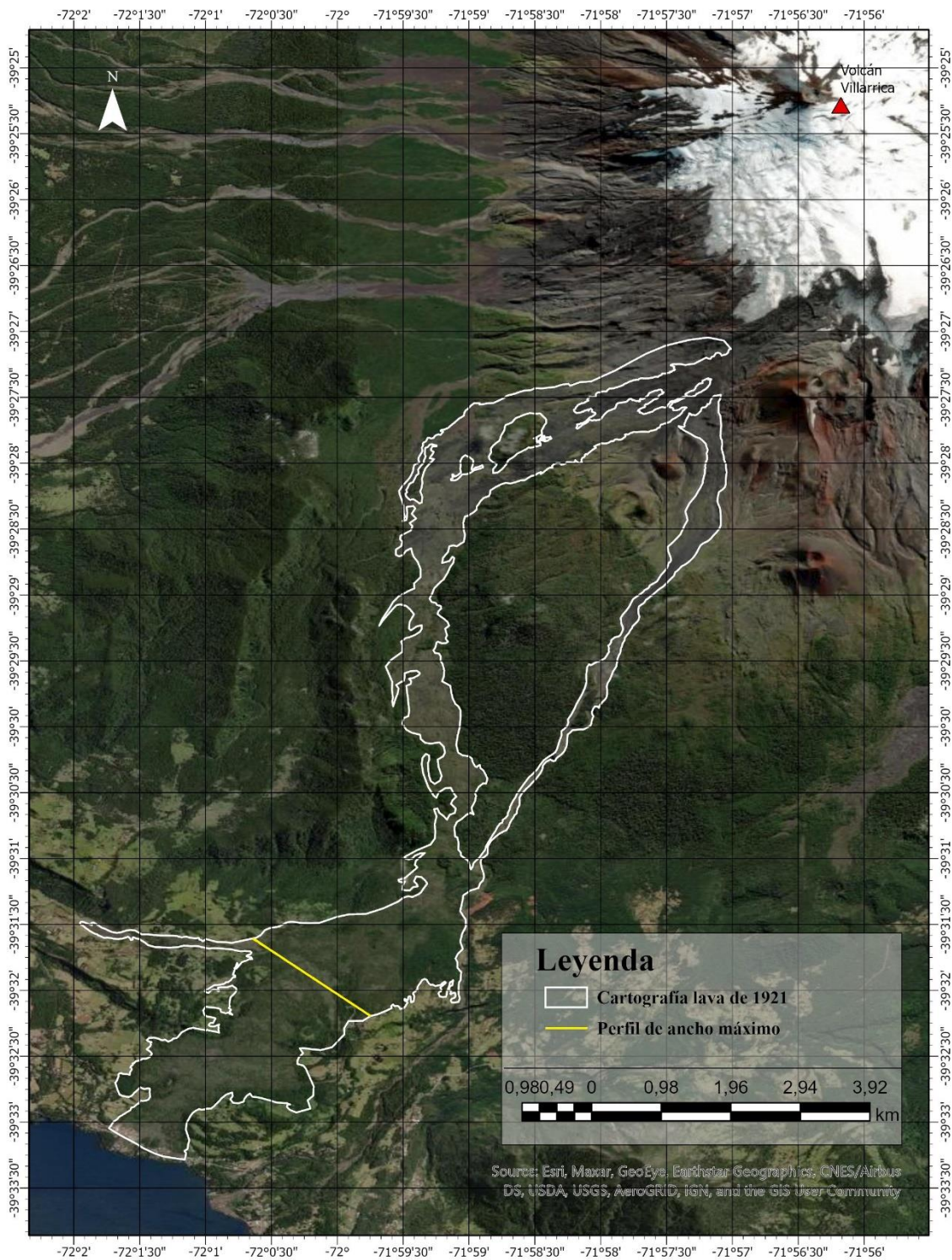


Figura 4.3: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1921 del volcán Villarrica.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1948 DEL VOLCÁN VILLARRICA

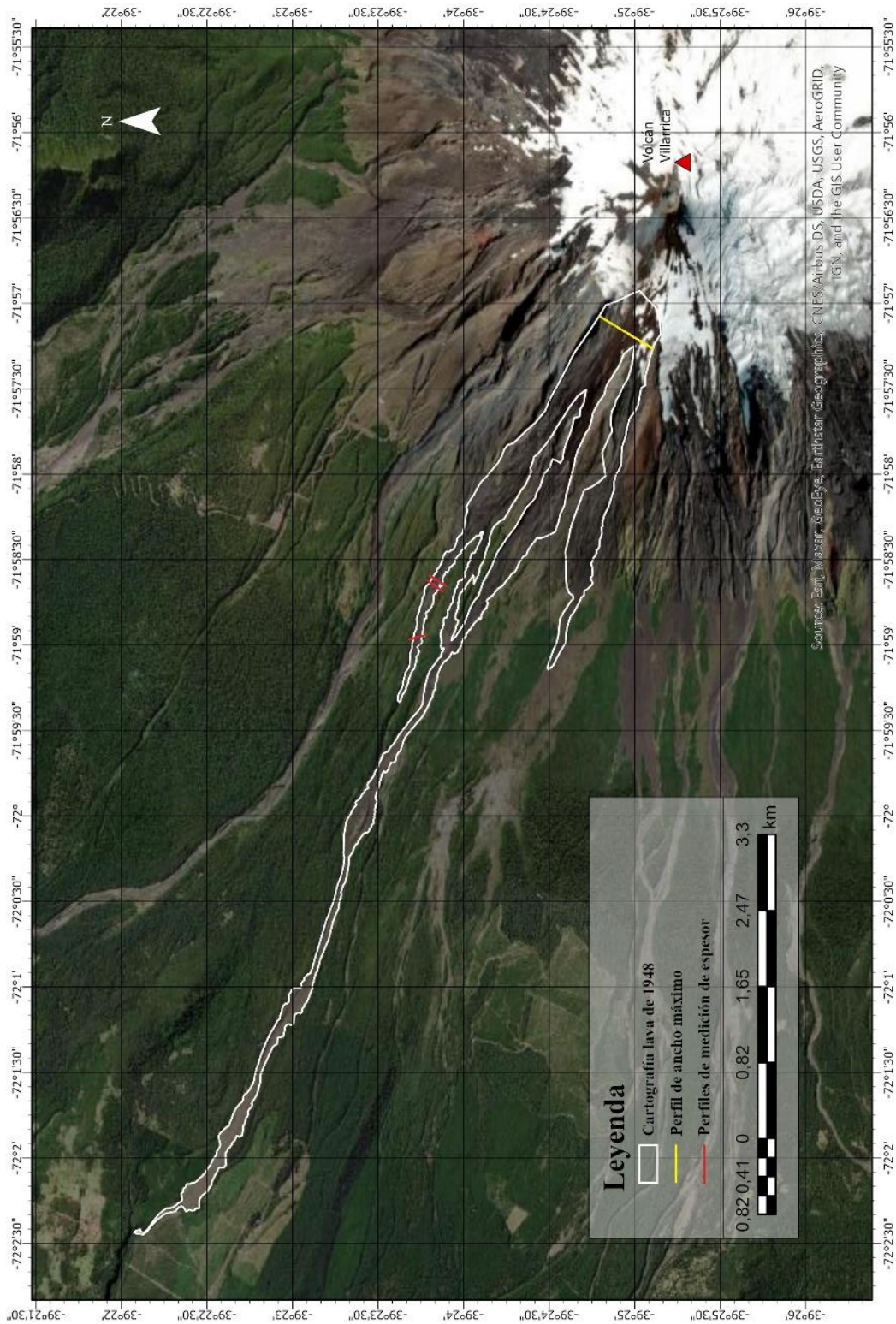


Figura 4.4: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1948–1949 del volcán Villarrica.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1964 DEL VOLCÁN VILLARRICA

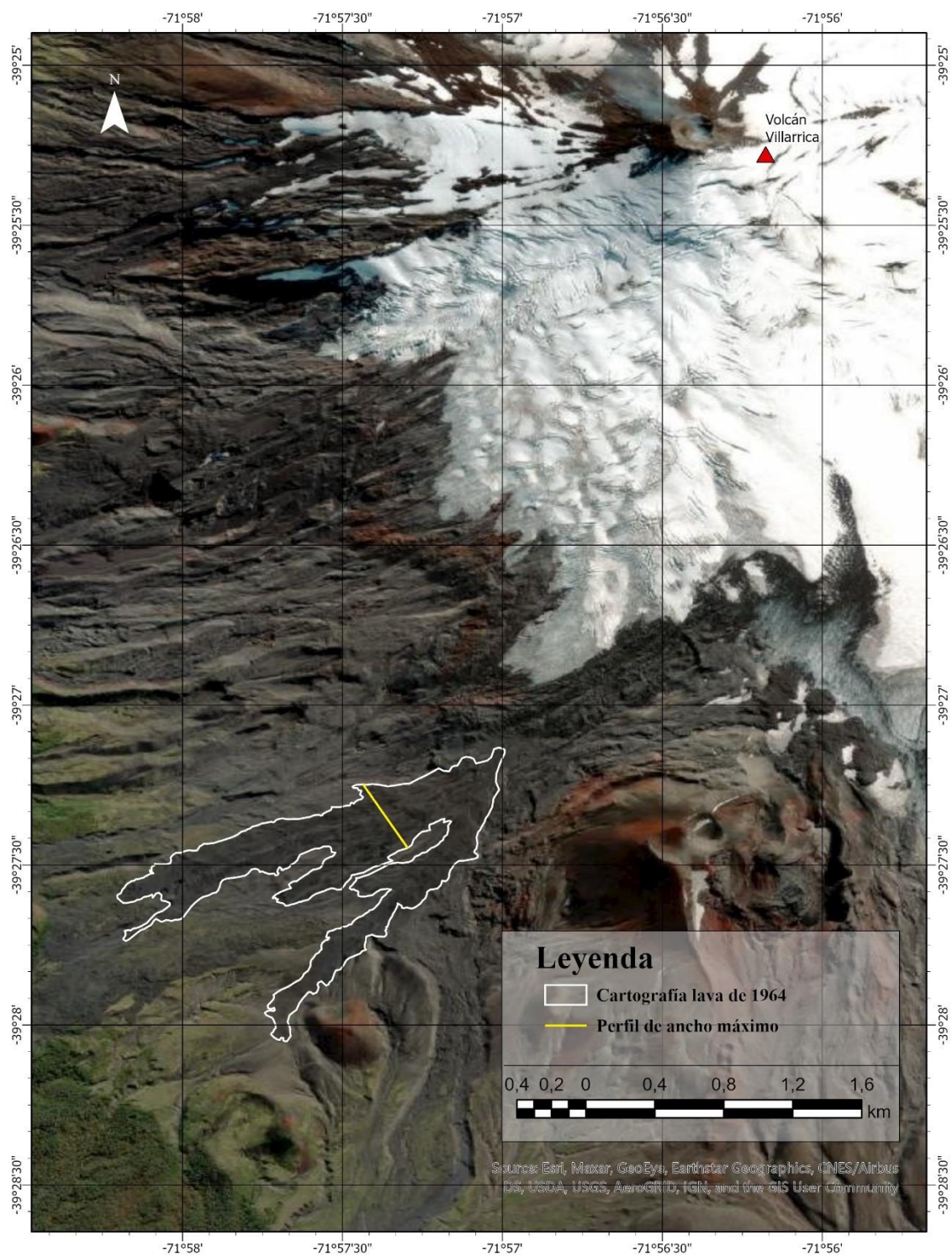


Figura 4.5: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1964 del volcán Villarrica.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1971 DEL VOLCÁN VILLARRICA

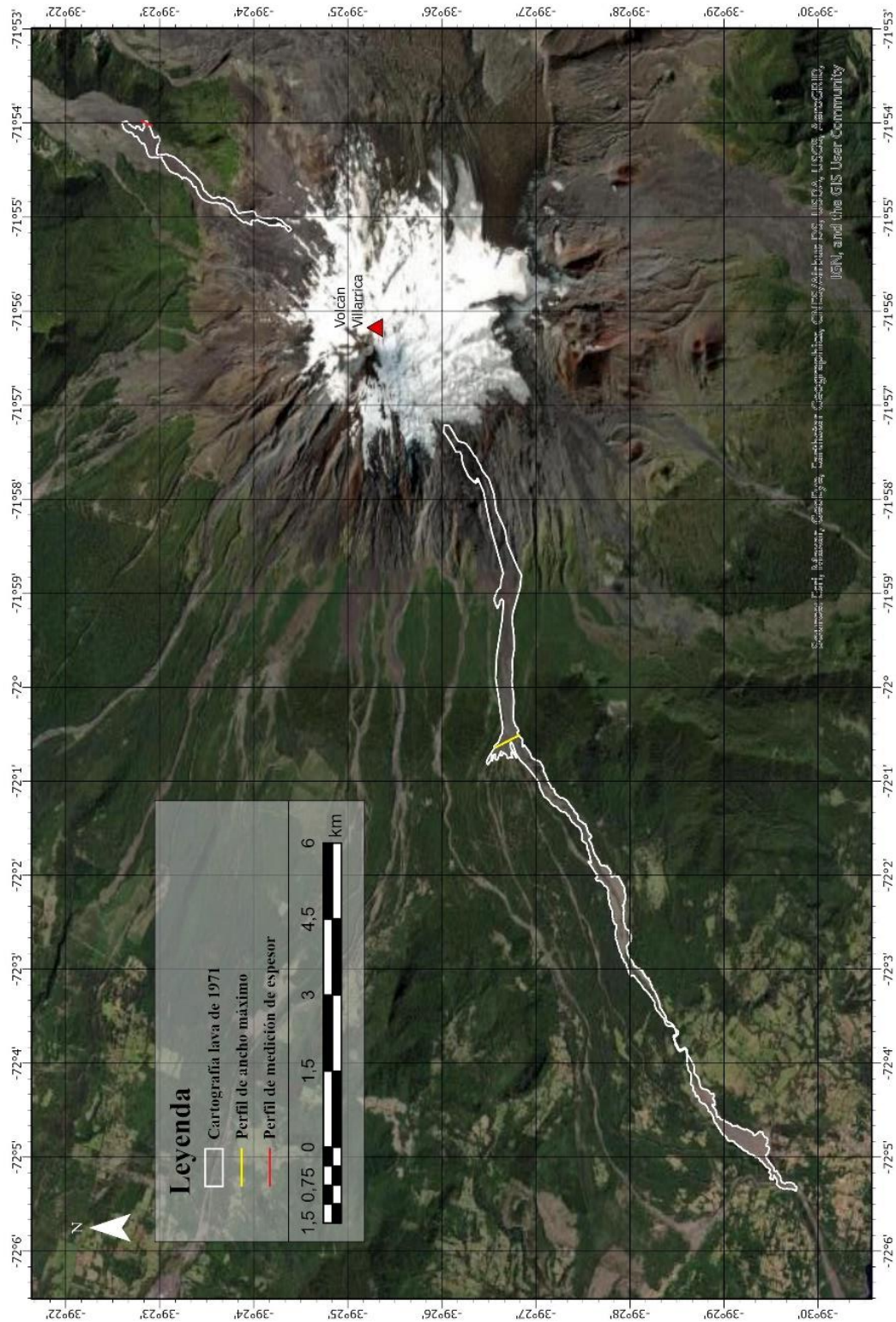


Figura 4.6: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1971–1972 del volcán Villarrica.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1984 DEL VOLCÁN VILLARRICA

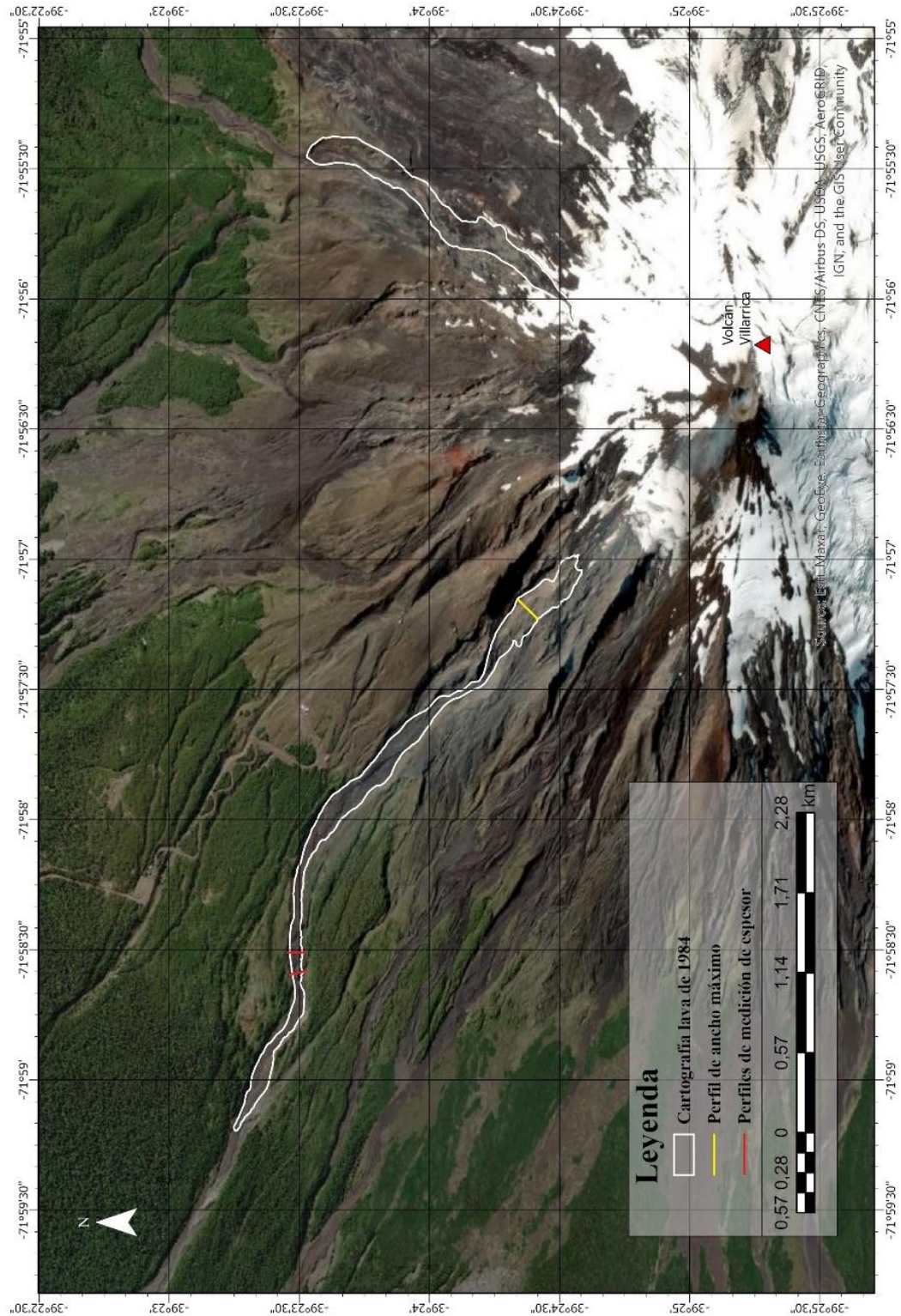


Figura 4.7: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1984–1985 del volcán Villarrica.

Los flujos de lava históricos del volcán Villarrica evidencian prácticamente en todos los casos una canalización de ellos las quebradas que se encuentran alrededor de este. Sumado a esto es posible notar que las coladas se observan preferentemente en dirección noroeste y suroeste, exceptuando el flujo hacia el noreste emitido en la erupción de 1971–1972 y el flujo menor de 1984–1985.

4.1.2 *Volcán Llaima.*

A continuación, se muestran las figuras correspondientes a la cartografía de las lavas históricas del volcán Llaima. Las cartografías de detalle, sumado a los perfiles de ancho máximo y espesor, incluyen los puntos de medición de espesor en trabajo de campo.

FLUJOS DE LAVA HISTÓRICOS DEL VOLCÁN LLAIMA

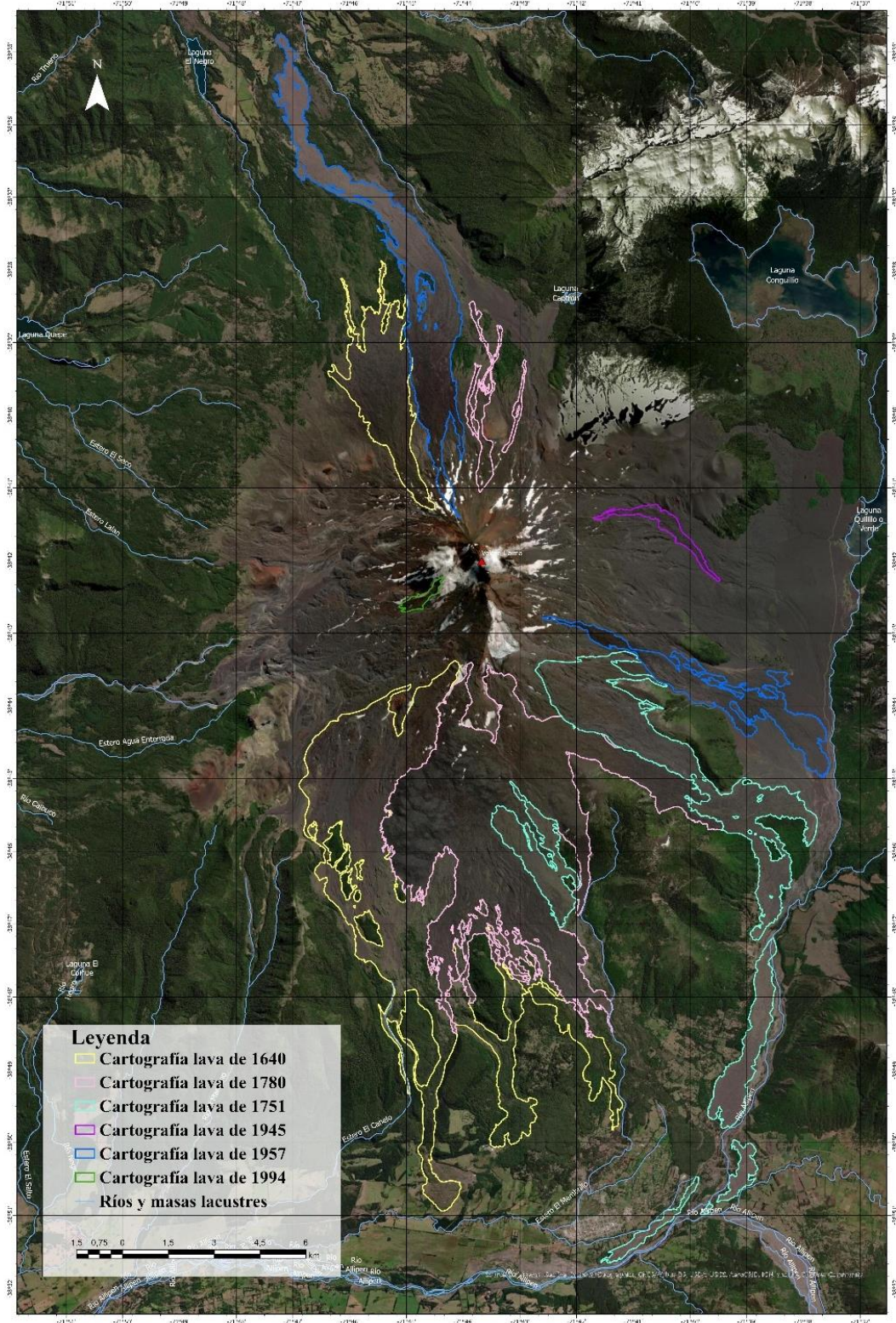


Figura 4.8: Cartografía de los flujos de lava históricos estudiados del volcán Llaima.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1640 DEL VOLCÁN LLAIMA

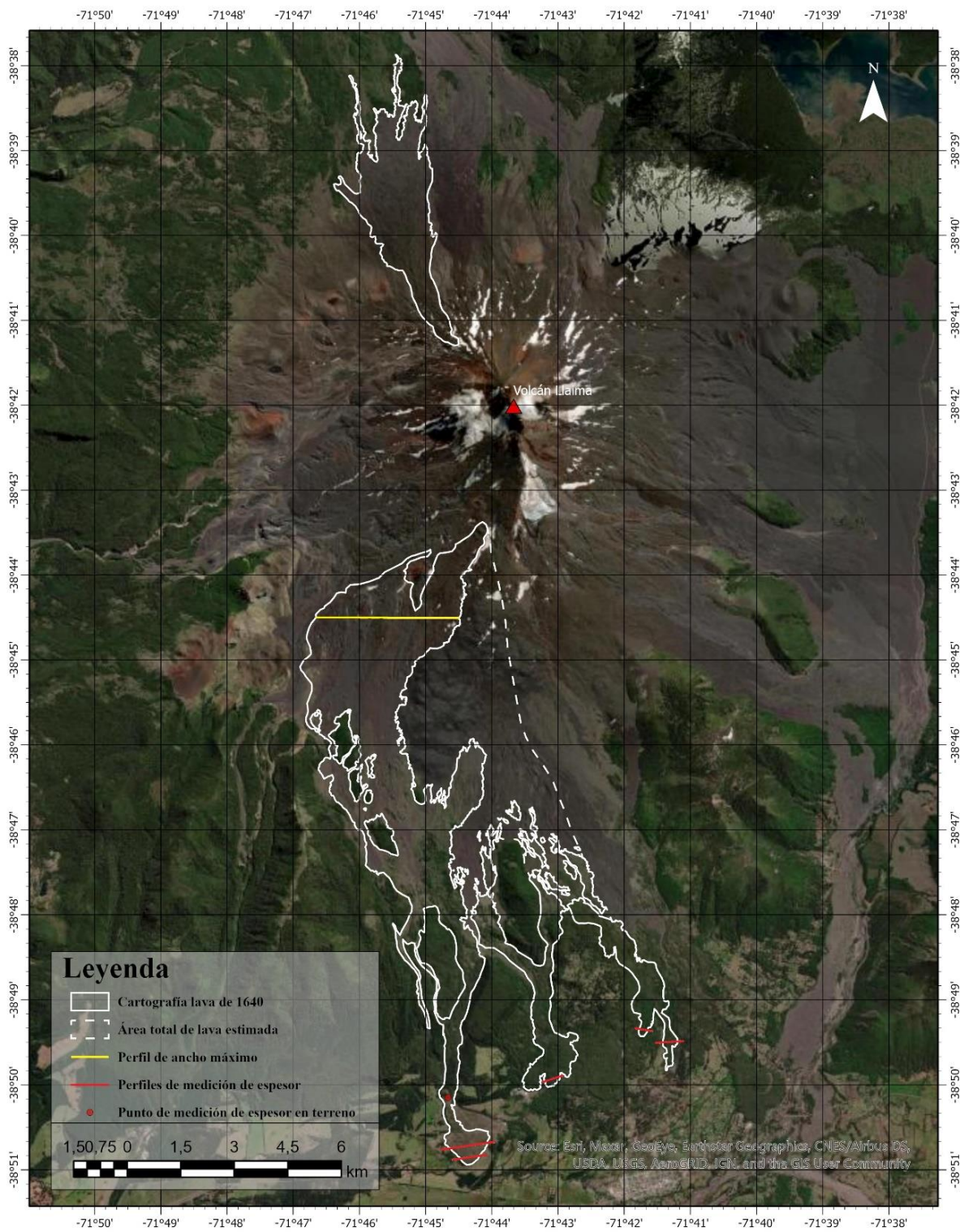


Figura 4.9: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1640 del volcán Llaïma.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1751 DEL VOLCÁN LLAIMA



Figura 4.10: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1751 del volcán Llaima.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1780 DEL VOLCÁN LLAIMA

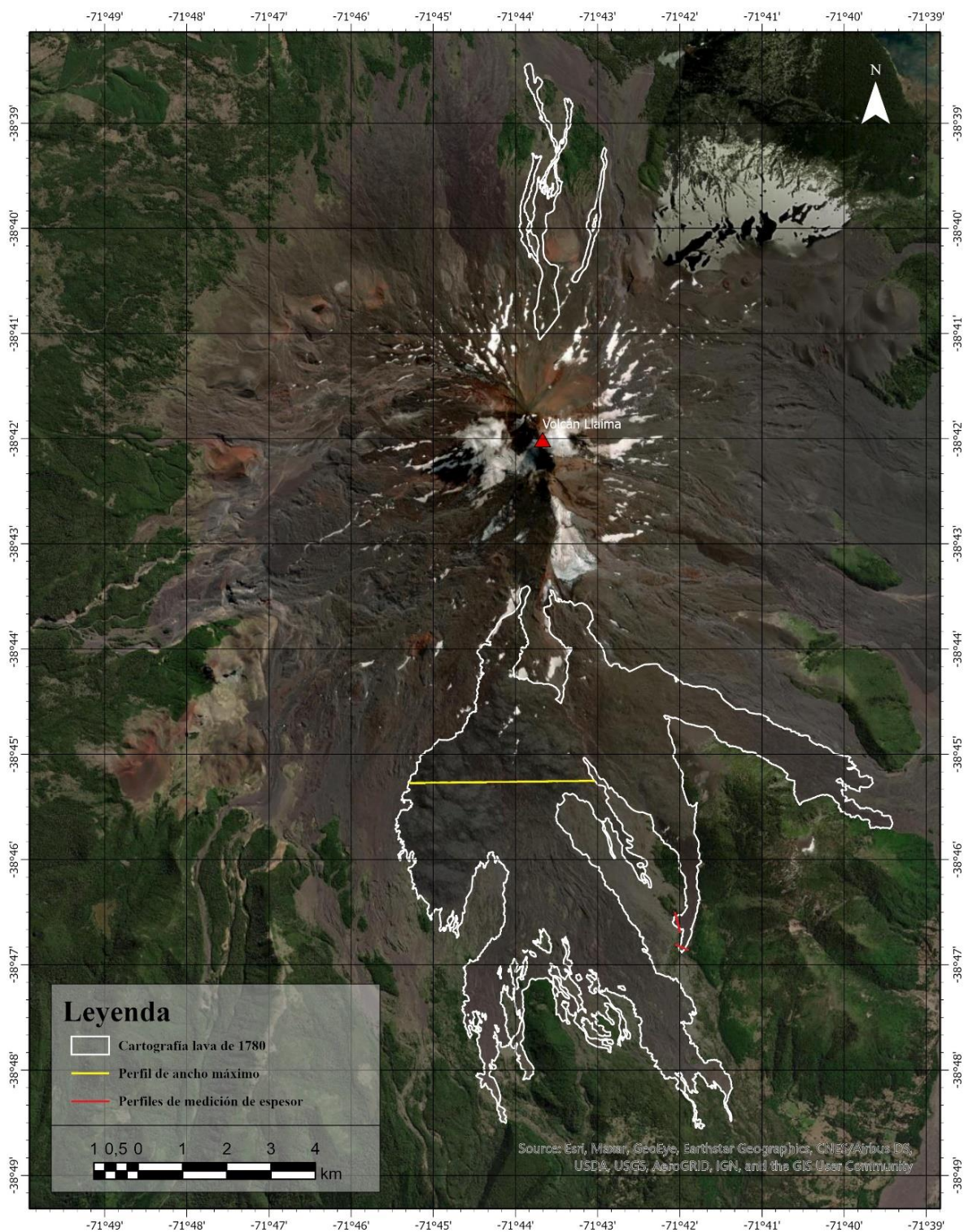


Figura 4.11: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1780 del volcán Llaima.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1945 DEL VOLCÁN LLAIMA

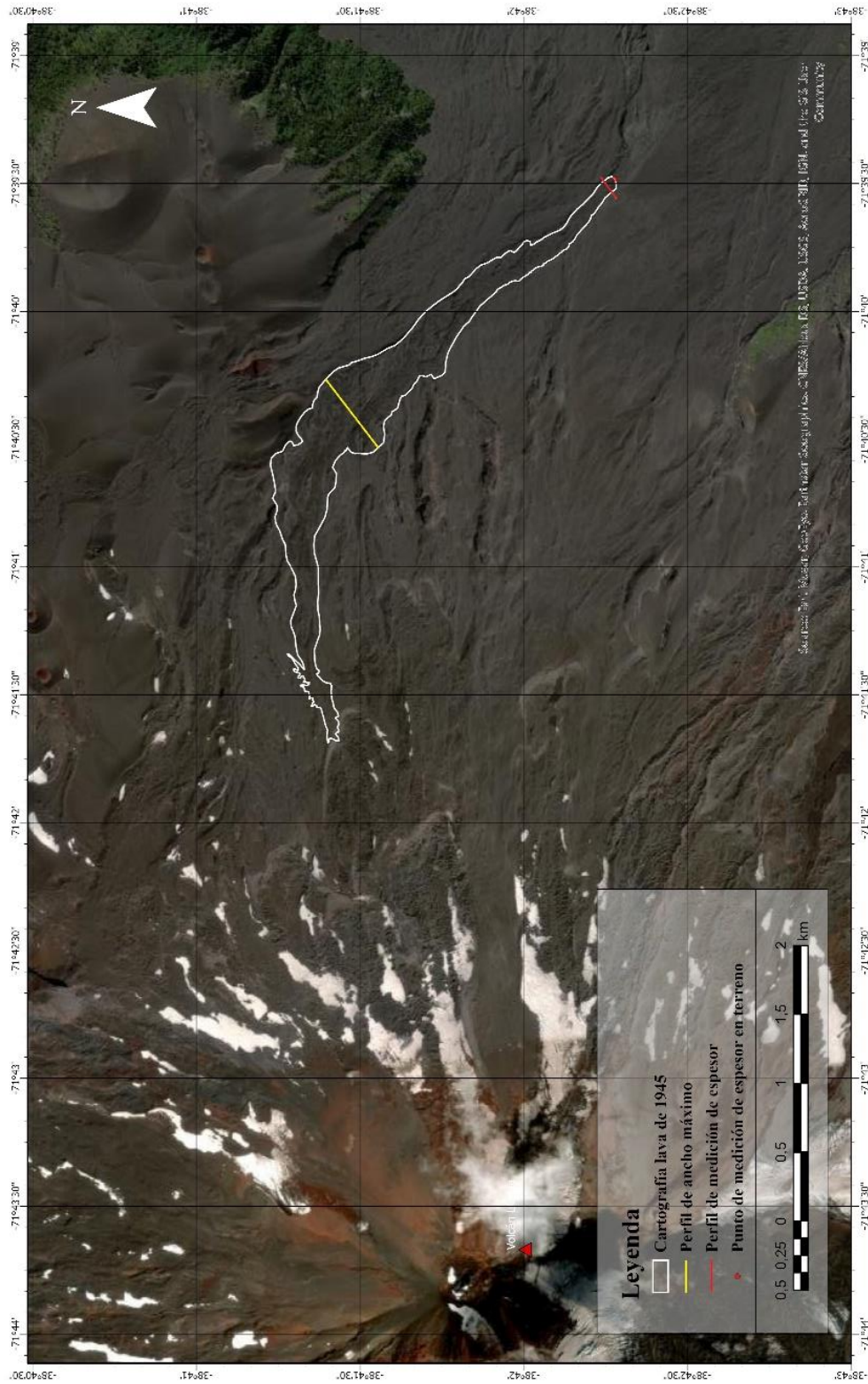


Figura 4.12: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1945 del volcán Llaima.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1957 DEL VOLCÁN LLAIMA

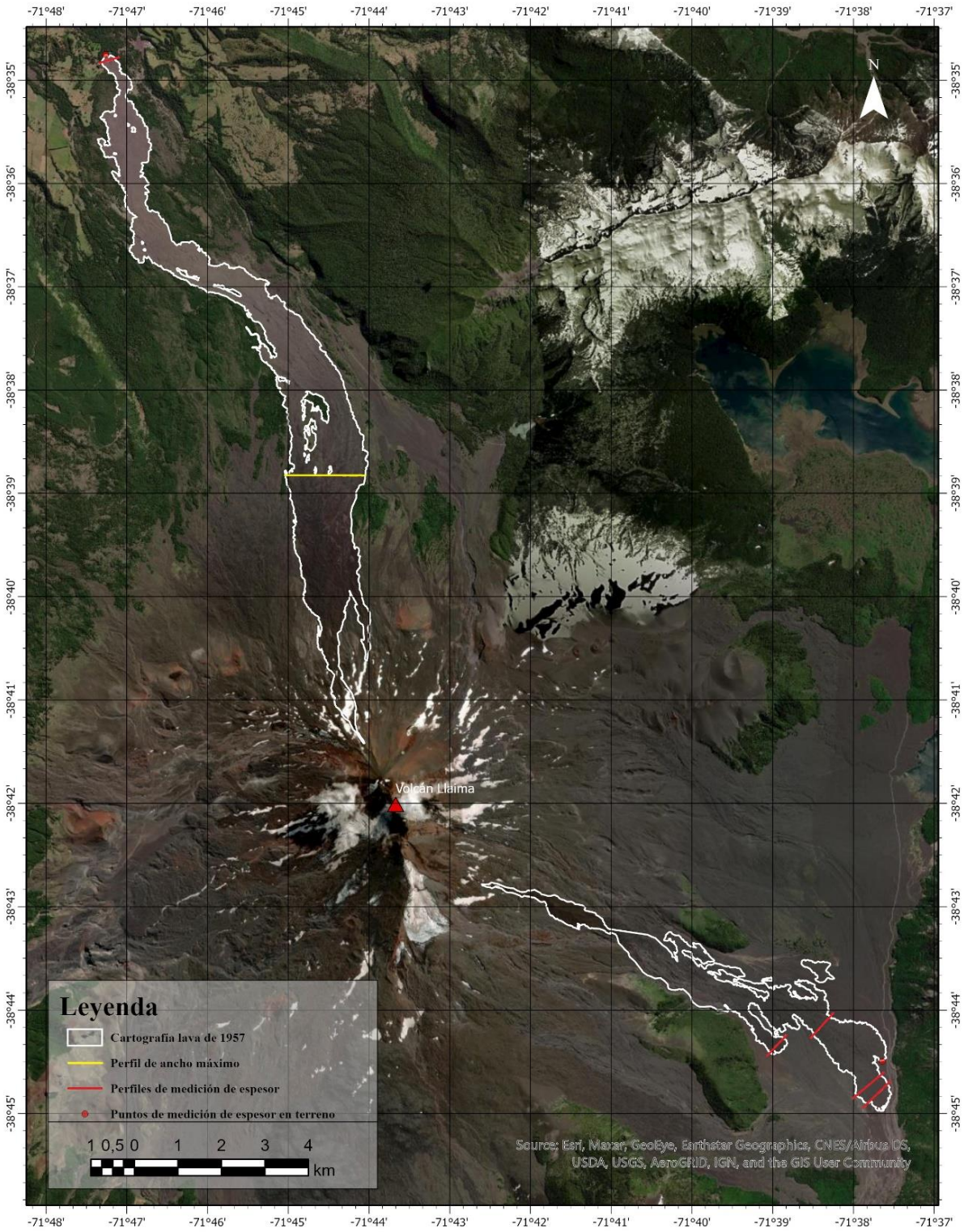


Figura 4.13: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1957 del volcán Llama.

FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1994 DEL VOLCÁN LLAIMA

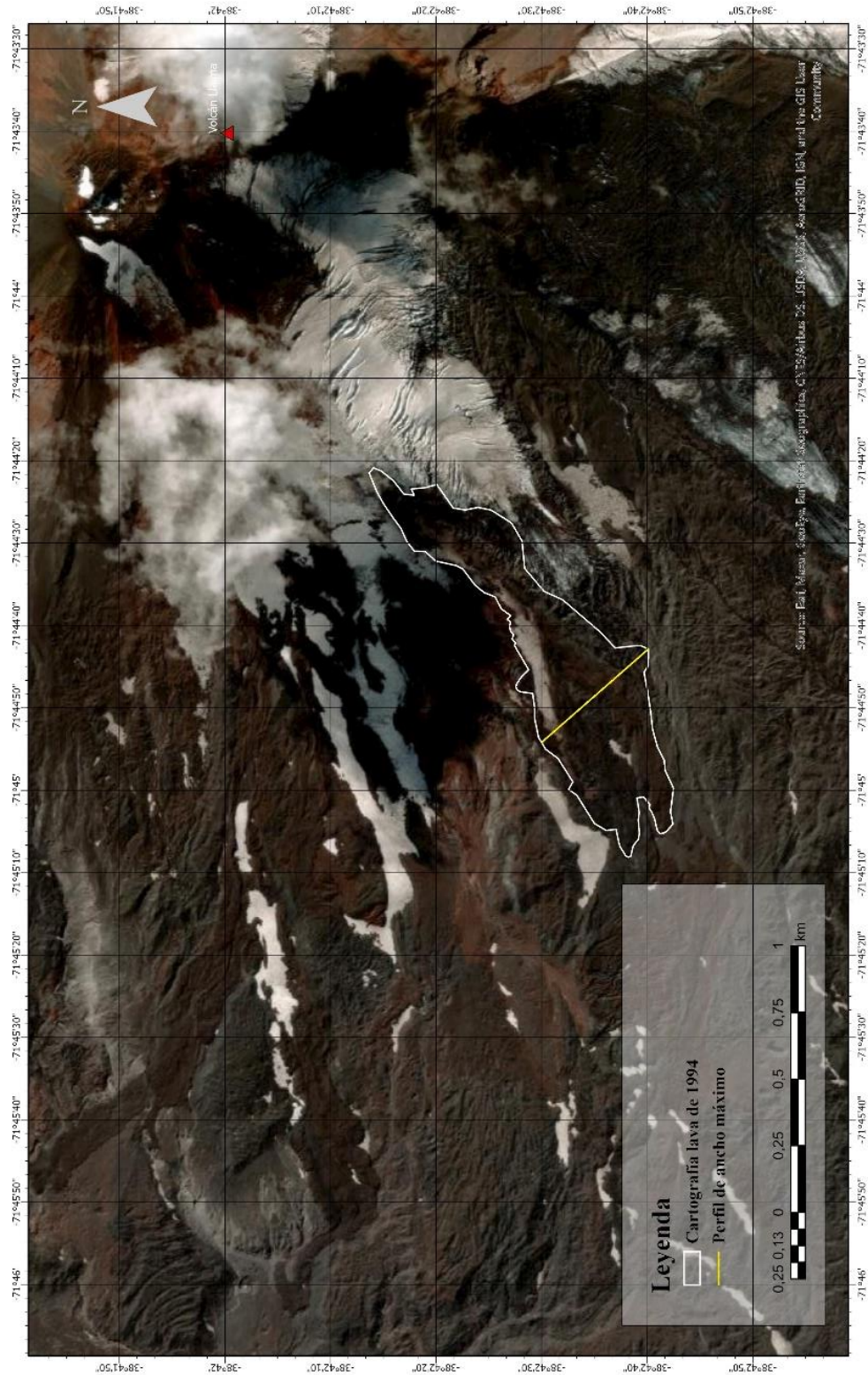


Figura 4.14: Cartografía de detalle del flujo de lava asociado a la erupción de 1994 del volcán Llaima.

Las lavas históricas mapeadas del volcán Llaima no se observan canalizadas por los valles que rodean al volcán. Presentan formas y zona de depósito variadas.

4.2 Obtención de parámetros

Se exponen los parámetros de composición química, longitud máxima, ancho (máximo o promedio), espesor (máximo o promedio), área total, volumen y tasa de emisión (máxima) para cada lava histórica de estudio de los volcanes Villarrica y Llaima. En este apartado se muestran los valores tanto recabados de otros estudios como calculados en este trabajo.

4.2.1 Volcán Villarrica.

La tabla 4.1 muestra los espesores de los flujos de lava de estudio del volcán Villarrica. Se indica el espesor promedio recabado de estudios previos, junto con el valor calculado en trabajo de gabinete y el que representa al flujo en cuestión.

Tabla 4.1: Valores de espesor recabados de otros estudios, obtenidos en este trabajo y promedio representativo de los flujos de lava estudiados del volcán Villarrica.

Erupción	Espesor(es) promedio obtenidos de otros estudios (m)	Espesor(es) obtenido(s) en trabajo de gabinete (m)	Espesor promedio considerado (m)
1787	-	-	-
1921	-	-	-
1948-1949	11,5 ⁽¹⁾	7; 6; 7 ⁽⁴⁾	7,88 ⁽⁴⁾
1964	-	-	-
1971-1972	5 ⁽²⁾ ; 8 ⁽³⁾	3 ⁽⁴⁾	6,5 ⁽⁴⁾
1984-1985	5 (única medición) ⁽²⁾	5; 8 ⁽⁴⁾	6 ⁽⁴⁾

Fuentes:

(1) Moreno & Clavero (2006)

(2) POVi (2021)

(3) Castruccio & Contreras (2016)

(4) [Este trabajo.](#)

El espesor de los flujos de lava fue posible de obtener únicamente en las erupciones de 1948–1949, 1971–1972 y 1984–1985. Las mediciones de espesores de la erupción de los años 1948–1949 realizadas en este trabajo muestran valores similares. Con tal de obtener un valor representativo del flujo se promediaron los espesores medidos en trabajo de gabinete con el valor promedio obtenido previamente por Moreno & Clavero (2006). En cuanto a los flujos de 1971–1972 únicamente se midió un valor de 3 m de espesor en el flujo noreste en trabajo de gabinete, a diferencia de las mediciones promedio obtenidas de otros estudios que corresponden a 5 y 8 m. Dado lo anterior, se consideró el promedio de estos últimos valores para representar al flujo de lava de aquella erupción. En el caso del flujo de 1984–1985, se consideró el espesor promedio de 6 m utilizando la medición en terreno realizada por Werner Keller (POVi, 2021) junto con los espesores obtenidos en este trabajo.

La tabla 4.2 indica los valores de los diferentes parámetros de los flujos de lava junto con la erupción del volcán Villarrica a la cual corresponden. La tabla incluye los datos recabados de distintos estudios previos de otros autores y los valores obtenidos en este trabajo.

Tabla 4.2: Parámetros asociados a las coladas de lava de las erupciones históricas del volcán Villarrica.

Parámetro Erupción	Composición química	Longitud máxima (km)	Ancho máximo* o promedio**	Espesor máximo* o promedio** (m)	Área total (km ²)
1787	–	6,65 ⁽⁷⁾	554,26 m* ⁽⁷⁾	–	1,72 ⁽⁷⁾
1921	–	14,41 ⁽⁷⁾	1,68 km* ⁽⁷⁾	–	12,61 ⁽⁷⁾
1948–1949	Andesítico– basáltica ⁽²⁾	15 ⁽²⁾ 10 ⁽³⁾ 9,83 ⁽⁷⁾	60 m** ⁽³⁾ 642,94 m* ⁽⁷⁾	8 * (proximal) y 15 * (frente) ⁽²⁾ 7,88** ⁽⁷⁾	2,87 ⁽⁷⁾
1964	–	2 ⁽³⁾ 2,14 ⁽⁷⁾	200 m ⁽³⁾ 419,61 m* ⁽⁷⁾	–	0,78 ⁽⁷⁾
1971–1972	Basáltica ⁽⁴⁾ Andesítico– basáltica ⁽⁵⁾	14 ⁽³⁾ 16,5 ^{(2) (5)} 14,66 ⁽⁷⁾	200 m** ⁽³⁾ Rara vez excedió los	5 ** ⁽³⁾ 8 ** ⁽⁵⁾ 6,5** ⁽⁷⁾	2,8 ⁽³⁾ 3,49 ⁽⁷⁾

			150 m ⁽⁵⁾ 508,65 m* ⁽⁷⁾		
1984–1985	–	4,27 ⁽⁷⁾	80 m* ⁽³⁾ 183,6 m* ⁽⁷⁾	6** ⁽⁷⁾	0,67 ⁽⁷⁾

Fuentes:

- (1) Pizarro et al. (2019)
- (2) Moreno & Clavero (2006)
- (3) POVi (2021)
- (4) Global Volcanism Program (2021)
- (5) Castruccio & Contreras (2016)
- (6) Moreno (1993)
- (7) [Este trabajo.](#)

En la tabla anterior se observa que la principal composición química de las lavas históricas estudiadas es basáltica a andesítico–basáltica. El parámetro de la longitud máxima posee valores que varían entre 2 y 16,5 km, correspondientes a los flujos de las erupciones de 1964 y 1971–1972. En cuanto a las anchuras máximas de las coladas medidas en este trabajo en general son valores que promedian los 530 m, a excepción de las lavas de 1921 y 1984–1985 que poseen valores de 1,68 km y 183,6 m respectivamente, correspondientes al máximo y mínimo valor medido. Los espesores obtenidos de las erupciones de 1948–1949, 1971–1972 y 1984–1985 poseen valores cercanos que promedian 6,79 m. Por último, el área total de las coladas de estudio es un valor bajo que no suele sobrepasar los 3,49 km², sin embargo, el flujo de 1921 cubre un área de 12,61 km², siendo un valor casi 4 veces mayor.

La tabla 4.3 muestra los parámetros de volumen total, duración de la erupción y tasa de emisión calculados en este estudio y recabados de otros autores.

Tabla 4.3: Parámetros de volumen, duración y tasa de emisión máxima de las erupciones históricas del volcán Villarrica.

Parámetro Erupción	Volumen total (m ³)	Duración de la erupción	Tasa de emisión (máxima) (m ³ /s)
1787	-	-	-
1921	13±3×10 ⁶ ⁽¹⁾	36 horas ⁽¹⁾	23,15 ⁽⁷⁾
1948-1949	16±4×10 ⁶ ⁽¹⁾ 9.000.000 ⁽²⁾ 22.615.600 ⁽⁷⁾	117 días ⁽⁵⁾	26 ⁽²⁾ 2,24 ⁽⁷⁾
1964	-	50 días ⁽⁵⁾	-
1971-1972	26±7×10 ⁶ ⁽¹⁾ 30.000.000 ⁽²⁾ ~50.000.000 ⁽³⁾ 11×10 ⁶ ⁽⁶⁾ 22.685.000 ⁽⁷⁾	115 días ⁽⁵⁾	Sobre 500 ⁽⁴⁾ ~800 ⁽³⁾ 2,28 ⁽⁷⁾
1984-1985	10.000.000 ⁽⁶⁾ 4.020.000 ⁽⁷⁾	384 días ⁽⁵⁾	20 ⁽⁴⁾ 0,12 ⁽⁷⁾

Fuentes:

- (1) Pizarro et al. (2019)
- (2) POVi (2021)
- (3) Castruccio & Contreras (2016)
- (4) Moreno (1993)
- (5) Global Volcanism Program (2021)
- (6) Granados et al. (2021)
- (7) [Este trabajo.](#)

Los volúmenes de emisión de lava calculados de las erupciones de 1948-1949 y 1971-1972 son similares en magnitud, rondando los 22.000.000 m³, a diferencia de la erupción de 1984-1985, de la cual se obtuvo un volumen mucho menor cercano a los 4.000.000 m³. La duración de las erupciones en general se encuentra expresada en días, variando entre 50 y 384, a excepción de la erupción de 1921 que se considera que duró 36 horas. En el caso del parámetro de la tasa de emisión ocurre una situación similar que con el volumen emitido, ya

que las erupciones de 1948–1949 y 1971–1972 expresan valores cercanos entre 2,24 y 2,28 m³/s, mientras que el valor menor es de 0,12 m³/s, correspondiente a la erupción de 1984–1985 y el mayor de 23,15 m³/s asociado a 1921. Este último valor se obtuvo mediante los datos de volumen y duración obtenidos previamente por Pizarro et al. (2019).

4.2.2 *Volcán Llaima.*

La obtención de espesores de las coladas de lava del volcán Llaima se desarrolló en el trabajo de campo y gabinete. En terreno se obtuvo el espesor de un afloramiento del depósito de lava de 1640 y de los frentes de las lavas de 1945 y 1957. A continuación, se muestran las fotografías de los puntos de medición en terreno que incluyen el flujo lávico y a una funcionaria de SERNAGEOMIN de escala (1,6 m).



Figura 4.15: Depósito de lava asociado a la erupción de 1640 del volcán Llaima. Espesor aproximado de 1,5 m. Ubicación: 38°50'09"S, 71°44'39"O.



Figura 4.16: Frente del flujo de lava asociado a la erupción de 1945 del volcán Llaima. Espesor aproximado de 8 m. Ubicación: 38°42'16"S, 71°39'28"O.



Figura 4.17: Frente del flujo SE de lava asociado a la erupción de 1957 del volcán Llaima. Espesor aproximado de 4,8 m. Ubicación: 38°44'29"S, 71°37'38"O.



Figura 4.18: Frente del flujo NO de lava asociado a la erupción de 1957 del volcán Llaima. Espesor aproximado de 3,2 m. Ubicación: 38°34'45"S, 71°47'15"O.

La tabla 4.4 integra los espesores medidos en terreno (figuras 4.15 a 4.18) y en trabajo de gabinete, junto con el valor promedio considerado representativo del flujo.

Tabla 4.4: Espesores obtenidos en trabajo de campo y gabinete junto con el valor promedio de los flujos de lava estudiados del volcán Llaima.

Erupción	Espesor(es) medido(s) en trabajo de campo (m)	Espesor(es) obtenido(s) en trabajo de gabinete (m)	Espesor promedio (m)
1640	1,5	28; 23; 52; 22; 27	25,58
1751-1752	-	14; 9	11,5
1780	-	8; 7	7,5
1945	8	5	6,5
1955-1957	4,8; 3,2	4; 10; 14; 8; 6	7,14
1994	-	-	-

De la tabla anterior es posible notar que la medición de espesor realizada en terreno del flujo de 1640 expresa una diferencia considerable con los valores provenientes del trabajo de

gabinete, siendo el espesor promedio unas 17 veces mayor que el medido en terreno. El resto de los flujos de lava estudiados no presenta diferencias considerables en aquellos términos. El espesor promedio del flujo de mayor antigüedad representa el mayor valor entre las erupciones de estudio (25,58 m), siendo el menor el de 1945 con 6,5 m. Cabe mencionar que no se cuenta con mediciones del flujo de lava correspondiente a la erupción de 1994.

La tabla 4.5 muestra los parámetros asociados a los flujos lávicos históricos de estudio del volcán Llaima. Allí se incluyen los valores recabados de estudios anteriores y aquellos calculados en este trabajo. Cabe destacar que el parámetro de área de las erupciones de 1640 y 1751-1752 corresponde a la extrapolación del área cartografiada mostrada en las figuras 4.8 y 4.9.

Tabla 4.5: Parámetros de las coladas de lava de las erupciones históricas de estudio del volcán Llaima.

Parámetro Erupción	Composición química	Longitud máxima (km)	Ancho máximo* o promedio**	Espesor máximo* o promedio** (m)	Área total (km ²)
1640	Andesítica- basáltica rica en sílice ⁽¹⁾	15 ⁽¹⁾ 19,38 ⁽⁴⁾	3,12 km* ⁽⁴⁾	25,58** ⁽⁴⁾	43,85 ⁽⁴⁾
1751-1752	Basáltica porfírica ⁽¹⁾	23 ⁽¹⁾ 25,42 ⁽⁴⁾	2,12 km* ⁽⁴⁾	6 m* (extremo distal) ⁽¹⁾ 11,5** ⁽⁴⁾	18,53 ⁽⁴⁾
1780	Basáltica porfírica ⁽¹⁾	10 ⁽¹⁾ 13,63 ⁽⁴⁾	3,28 km* ⁽⁴⁾	1,40 m* (frente, Captrén Alto) y 4-6 m* (frente, flanco sur) ⁽¹⁾ 7,5** ⁽⁴⁾	28,32 ⁽⁴⁾
1945	Andesítica- basáltica ⁽¹⁾	10 ⁽¹⁾ 5,1 ⁽⁴⁾	486,91 m* ⁽⁴⁾	13 m* (frente) ⁽¹⁾ 6,5** ⁽⁴⁾	0,8 ⁽⁴⁾
1955-1957	Entre basalto	12 ⁽¹⁾	1,45 km* ⁽⁴⁾	8 m* (frente)	13,99 ⁽⁴⁾

	y andesita basáltica ⁽¹⁾	18,08 ⁽⁴⁾		⁽¹⁾ 7,14** ⁽⁴⁾	
1994	–	1,56 ⁽⁴⁾	415,54 m* ⁽⁴⁾	–	0,29 ⁽⁴⁾

Fuentes:

- (1) Naranjo & Moreno (2005)
- (2) Bounet De Maisonneuve (2011)
- (3) Granados et al. (2021)
- (4) [Este trabajo.](#)

La información referida a la composición de los flujos de lava es bastante variable entre las erupciones históricas de estudio del volcán, predominando entre los flujos la andesítica-basáltica. En cuanto a la longitud máxima medida, en general se tienen valores entre 13 y 15 km aproximados, exceptuando los flujos asociados a las erupciones de 1945 y 1994 que poseen longitudes de 5,1 y 1,56 km respectivamente. El ancho máximo medido posee un valor promedio de 2,84 km en el caso de los flujos más antiguos (1640, 1751–1752 y 1780), mientras que las coladas de 1945 y 1994 presentan un ancho que rodea los 450 m y la de 1955–1957 triplica aquel valor. En el caso del espesor promedio, este alcanza los 25,58 m en el flujo de 1640, variando el resto de los flujos estudiados entre 6,5 y 11,5 m. El área total determinada posee un valores que decrecen desde 43 hasta 28 km² en el caso de las erupciones históricas de 1640, 1751–1752 y 1780, mientras que el flujo de 1955–1957 cubre una zona aproximada de 14 km², siendo mucho menor en los correspondientes a 1945 y 1994, de 0,8 y 0,3 km² respectivamente.

La tabla 4.6 muestra el resto de los parámetros considerados en este estudio. Allí se indican los volúmenes totales, duración de las erupciones y valor de tasa de emisión máxima tanto calculados en este estudio como recabados de otras fuentes bibliográficas.

Tabla 4.6: Parámetros de volumen, duración y tasa de emisión máxima de las erupciones históricas del volcán Llaima.

Parámetro Erupción	Volumen total (m ³)	Duración de la erupción	Tasa de emisión (máxima) (m ³ /s)
1640	1.121.683.000 ⁽⁴⁾	-	-
1751-1752	213.095.000 ⁽⁴⁾	-	-
1780	212.400.000 ⁽⁴⁾	-	-
1945	5.200.000 ⁽⁴⁾	3 días ⁽³⁾	20,06 ⁽⁴⁾
1955-1957	$\sim 5 \times 10^8 - 8 \times 10^8$ ⁽¹⁾ 99.888.600 ⁽⁴⁾	756 ± 15 días ⁽³⁾	~1,5 ⁽⁴⁾
1994	450.000 ⁽²⁾	105 días ⁽³⁾	60 ⁽²⁾

Fuentes:

- (1) Bounet De Maisonneuve (2011)
- (2) Granados et al. (2021)
- (3) Global Volcanism Program (2021)
- (4) [Este trabajo.](#)

Los volúmenes totales expuestos en la tabla fueron determinados utilizando el área y espesor obtenidos en este trabajo. La erupción de 1640 emitió un volumen de lava 215 veces mayor que en 1945, siendo este último el menor valor de volumen obtenido en este trabajo. Las coladas de lava de 1751-1752 y 1780 expresan un valor similar en volumen que se aproxima a los 210.000.000 m³, siendo esto el doble del emitido en 1955-1957 de acuerdo con los cálculos efectuados. La tasa de emisión de 1945 es de 20 m³/s aproximados, de forma que es bastante mayor que la de 1955-1957 que alcanza únicamente un valor de 1,5 m³/s.

4.3 Simulaciones en Q-LavHA

Se realizaron modelaciones de coladas de lava a ser emitidas por los volcanes de estudio utilizando el complemento de QGIS denominado Q-LavHA. Se generaron validaciones de flujos de lava y simulaciones de coladas futuras. En este apartado se exponen los resultados obtenidos.

4.3.1 *Volcán Villarrica.*

Se realizó la validación de los flujos de lava asociados a las erupciones de 1971 y 1984 del volcán Villarrica. Además, se generaron simulaciones de los flujos que podrían emitirse a futuro desde el punto del cráter principal, al suroeste de este y por otro lado, de la superficie que integra y rodea al cráter principal.

VALIDACIÓN DE LOS FLUJOS DE LAVA ASOCIADOS A LA ERUPCIÓN DE 1971 DEL VOLCÁN VILLARRICA

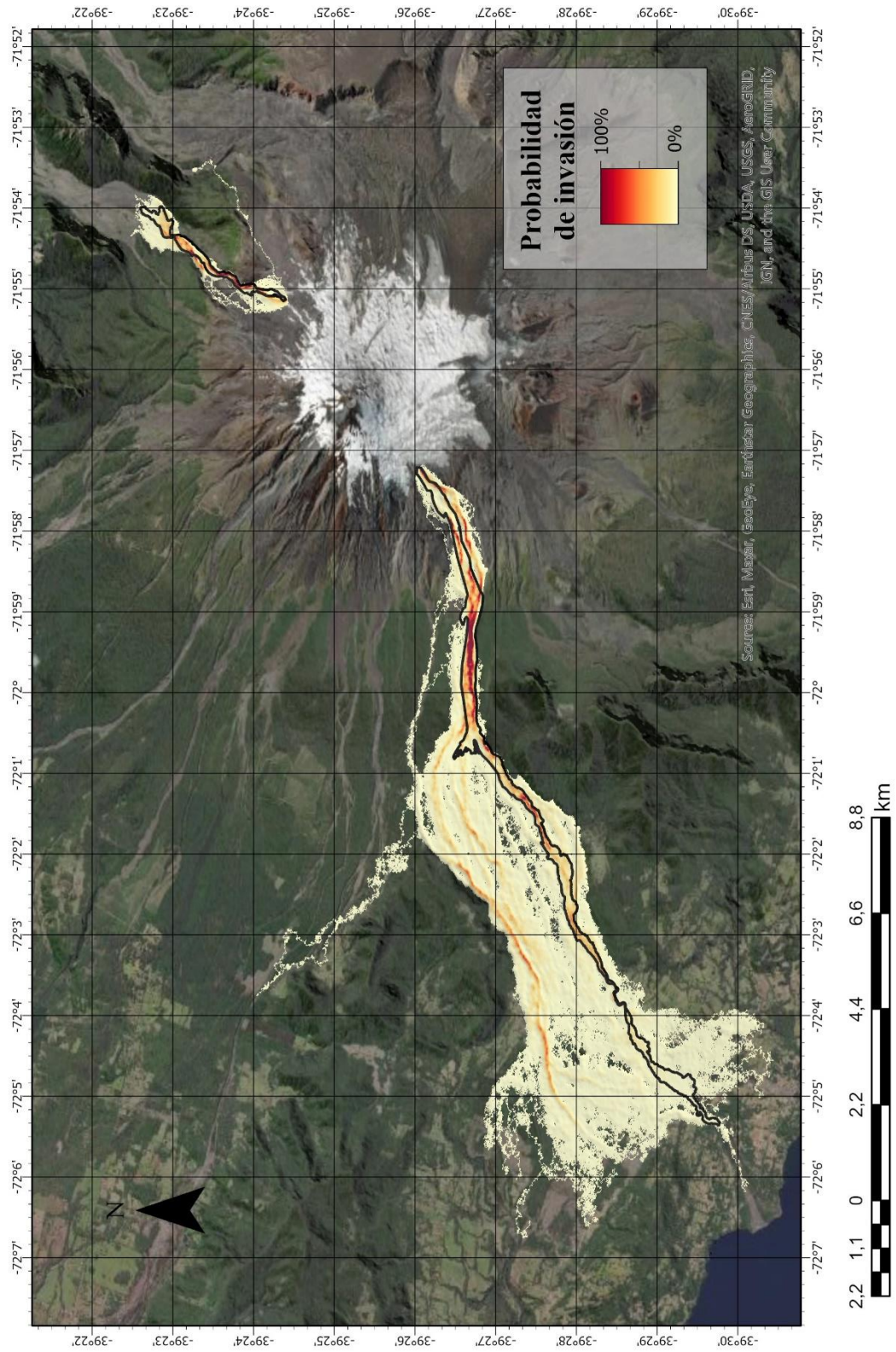


Figura 4.19: Validación de los flujos de lava asociados a la erupción de 1971 del volcán Villarrica.

VALIDACIÓN DE LOS FLUJOS DE LAVA ASOCIADOS A LA ERUPCIÓN DE 1984 DEL VOLCÁN VILLARRICA

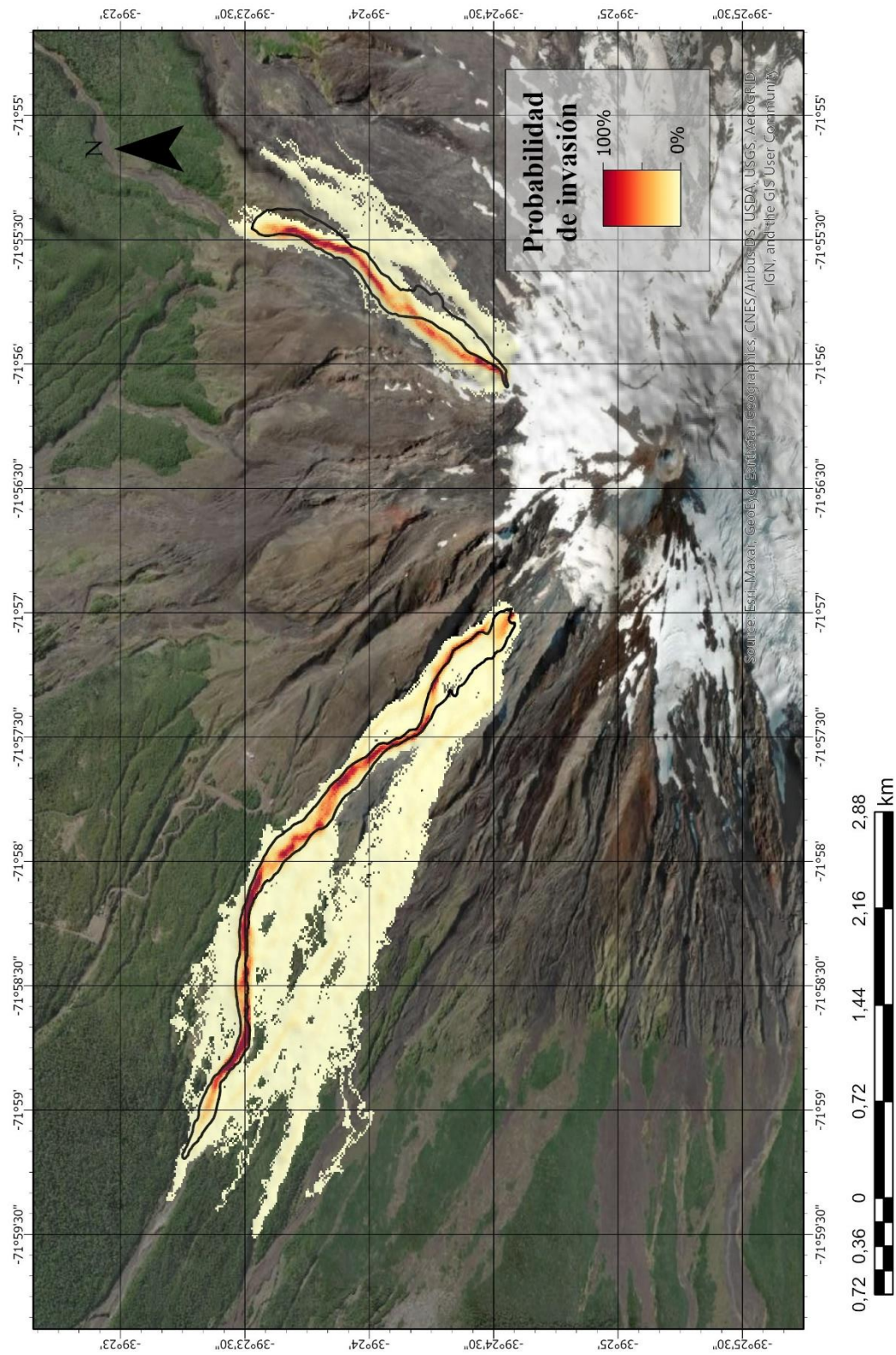


Figura 4.20: Validación de los flujos de lava asociados a la erupción de 1984 del volcán Villarrica.

SIMULACIÓN DE PROBABILIDAD DE INVASIÓN DE FLUJOS DE LAVA EMITIDOS DESDE UN PUNTO AL SUROESTE DEL CRÁTER PRINCIPAL DEL VOLCÁN VILLARRICA

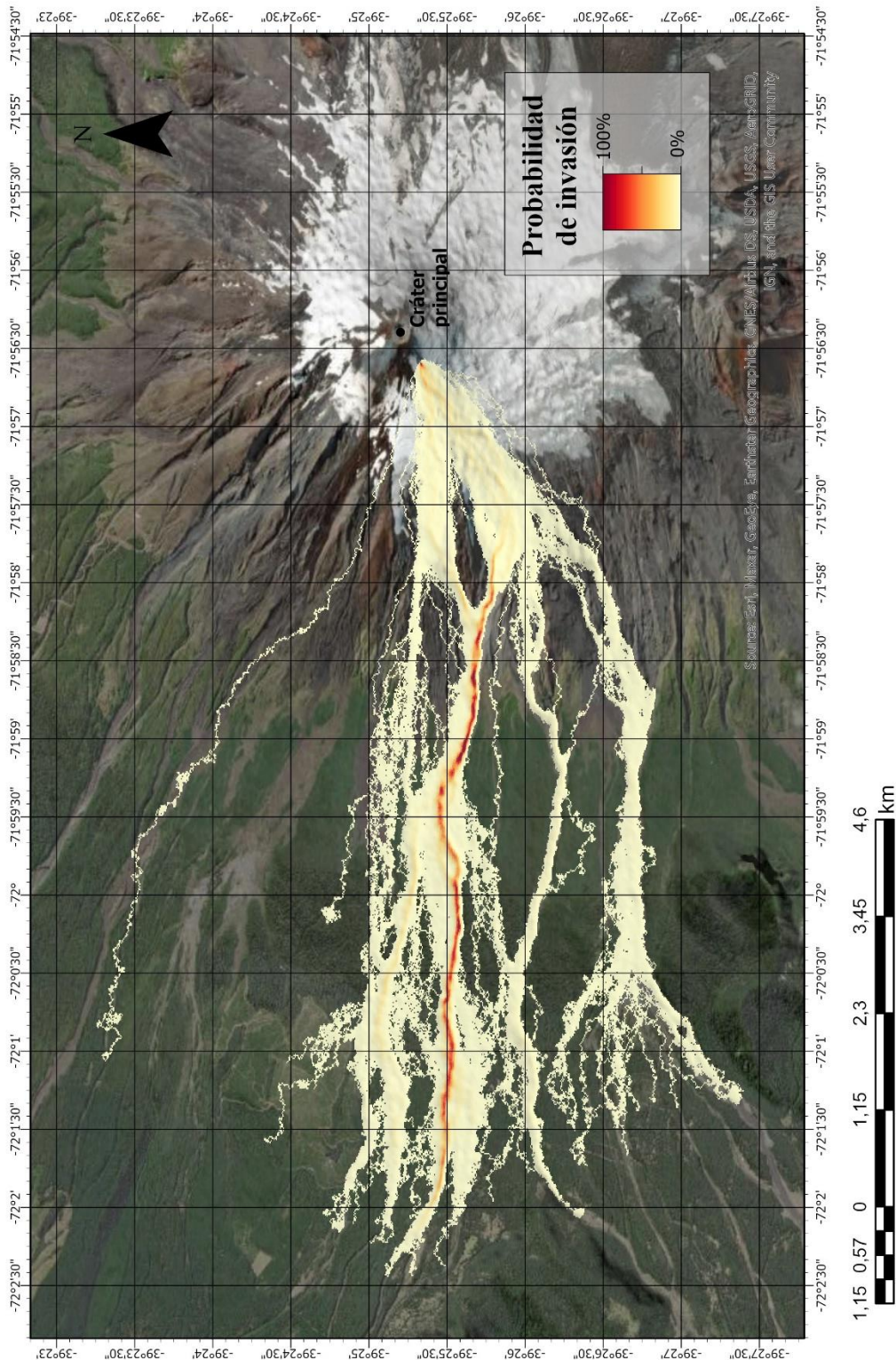


Figura 4.21: Simulación de probabilidad de invasión de flujos de lava emitidos desde un punto al suroeste del cráter principal del volcán Villarrica. Coordenadas del centro de emisión: 763125, 5632151.

SIMULACIÓN DE PROBABILIDAD DE INVASIÓN DE FLUJOS DE LAVA EMITIDOS DESDE EL CRÁTER PRINCIPAL DEL VOLCÁN VILLARRICA

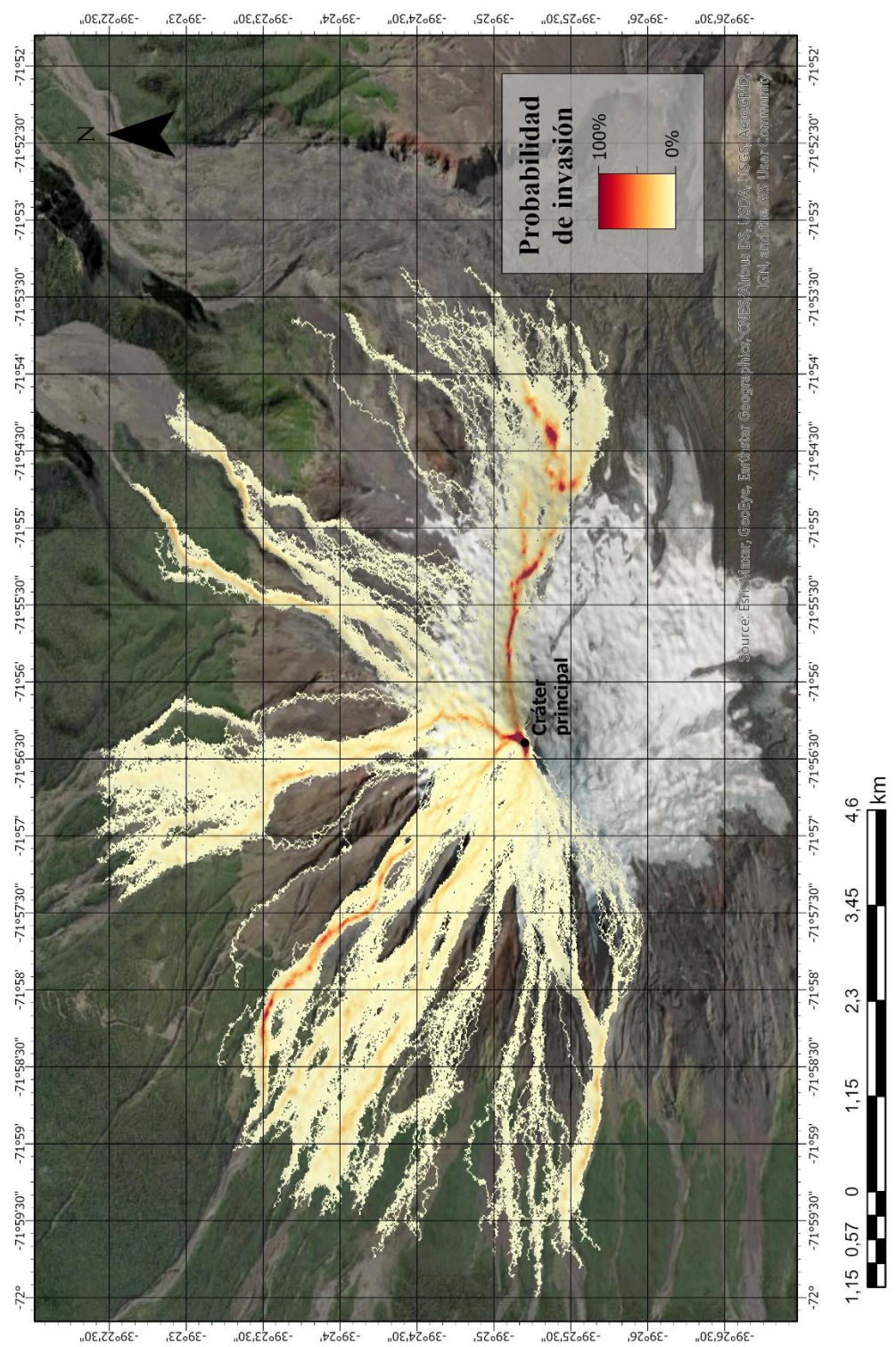


Figura 4.22: Simulación de probabilidad de invasión de flujos de lava emitidos desde el cráter principal del volcán Villarrica. Coordenadas del centro de emisión: 763442, 5632118.

SIMULACIÓN DE PROBABILIDAD DE INVASIÓN DE FLUJOS DE LAVA EMITIDOS DESDE EL ÁREA QUE CUBRE Y RODEA AL CRÁTER PRINCIPAL DEL VOLCÁN VILLARRICA

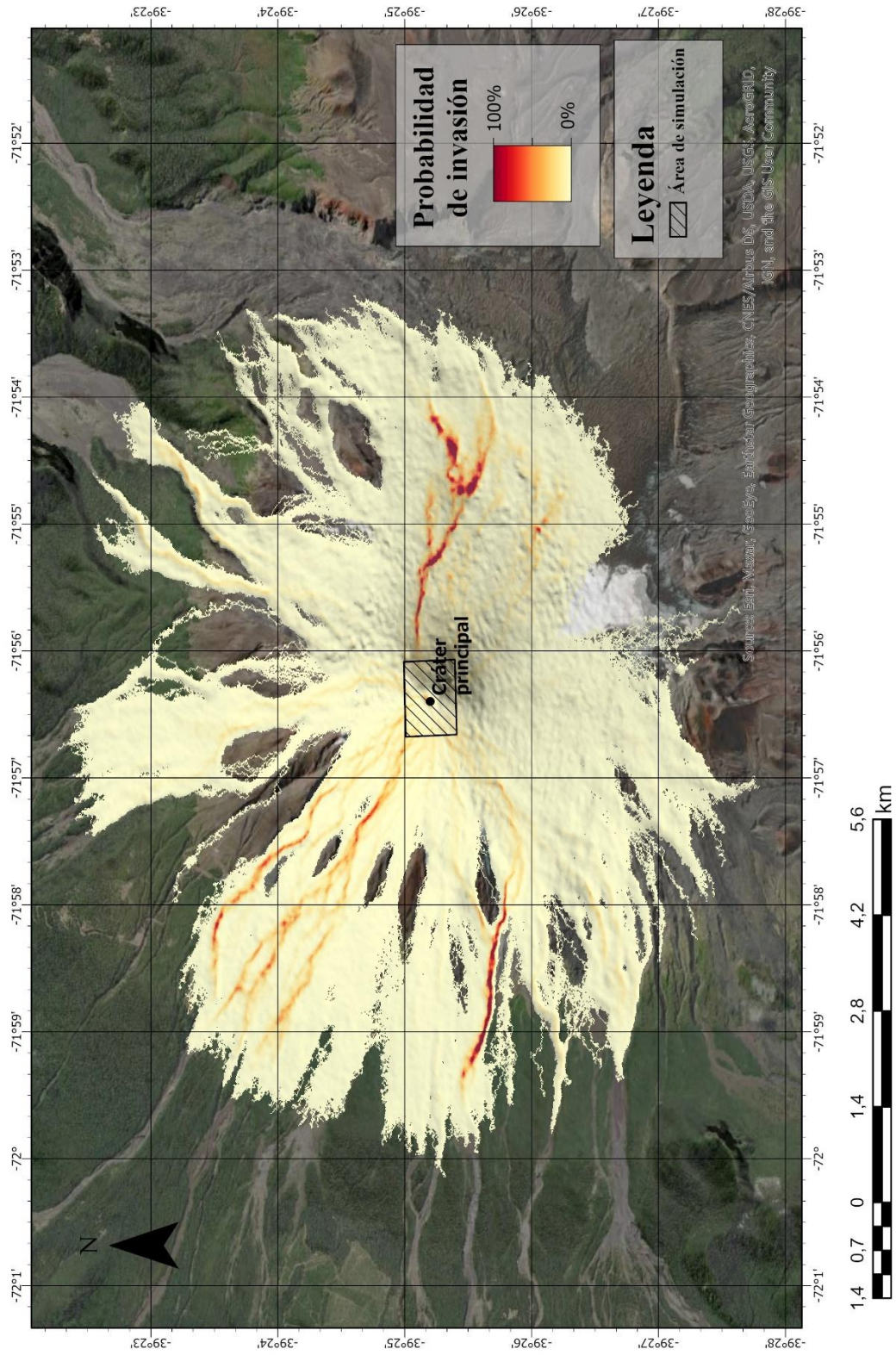


Figura 4.23: Simulación de probabilidad de invasión de flujos de lava emitidos desde el área que cubre y rodea al cráter principal del volcán Villarrica.

4.3.2 Volcán Llaima.

Se validaron las coladas de lava de las erupciones de 1751 y 1994 del volcán Llaima. Sumado a esto se simuló la emisión de flujos de lava del punto cráter y del área que lo cubre y rodea.

VALIDACIÓN DEL FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1751 DEL VOLCÁN LLAIMA

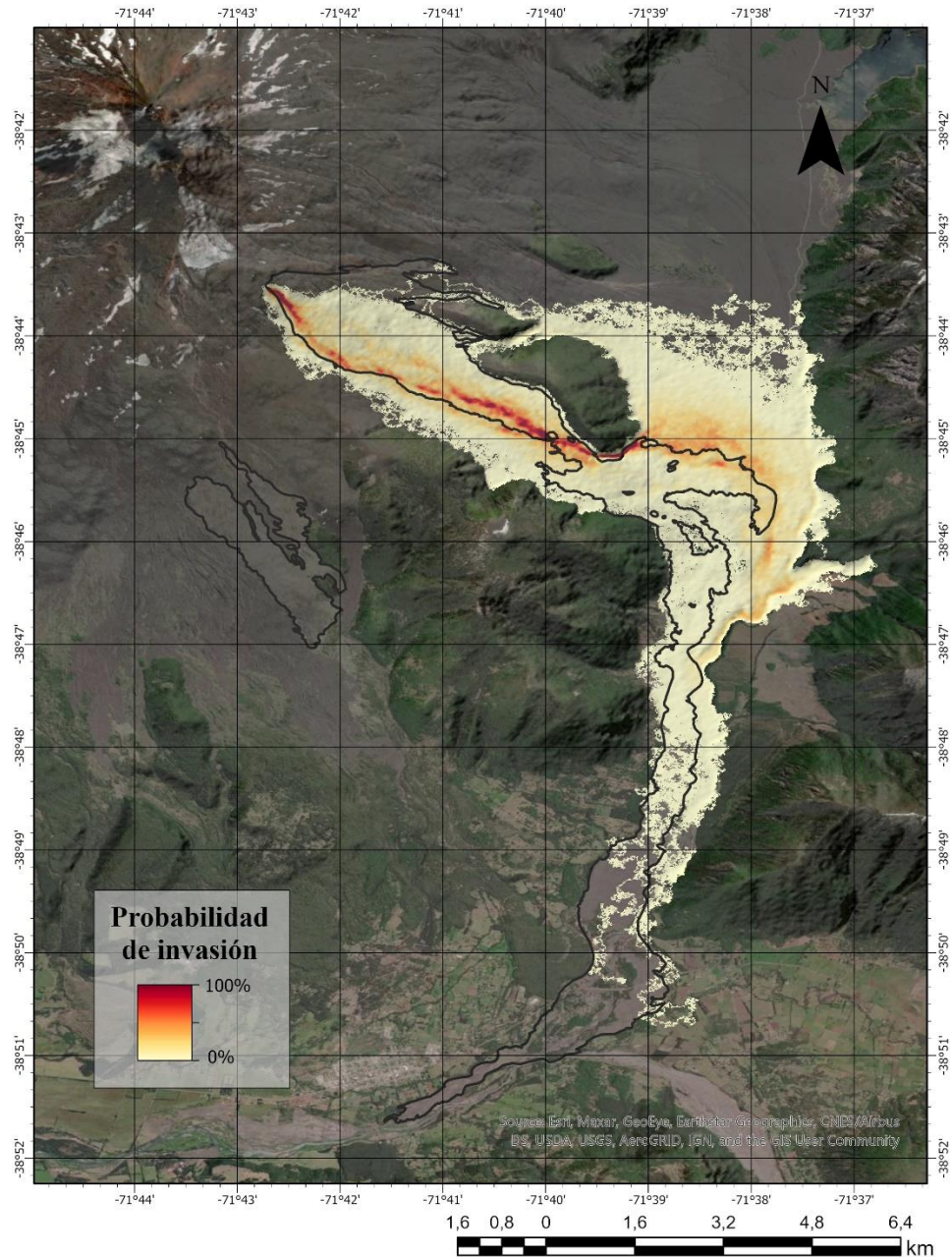


Figura 4.24: Validación del flujo de lava asociado a la erupción de 1751 del volcán Llaima.

VALIDACIÓN DEL FLUJO DE LAVA ASOCIADO A LA ERUPCIÓN DE 1994 DEL VOLCÁN LLAIMA

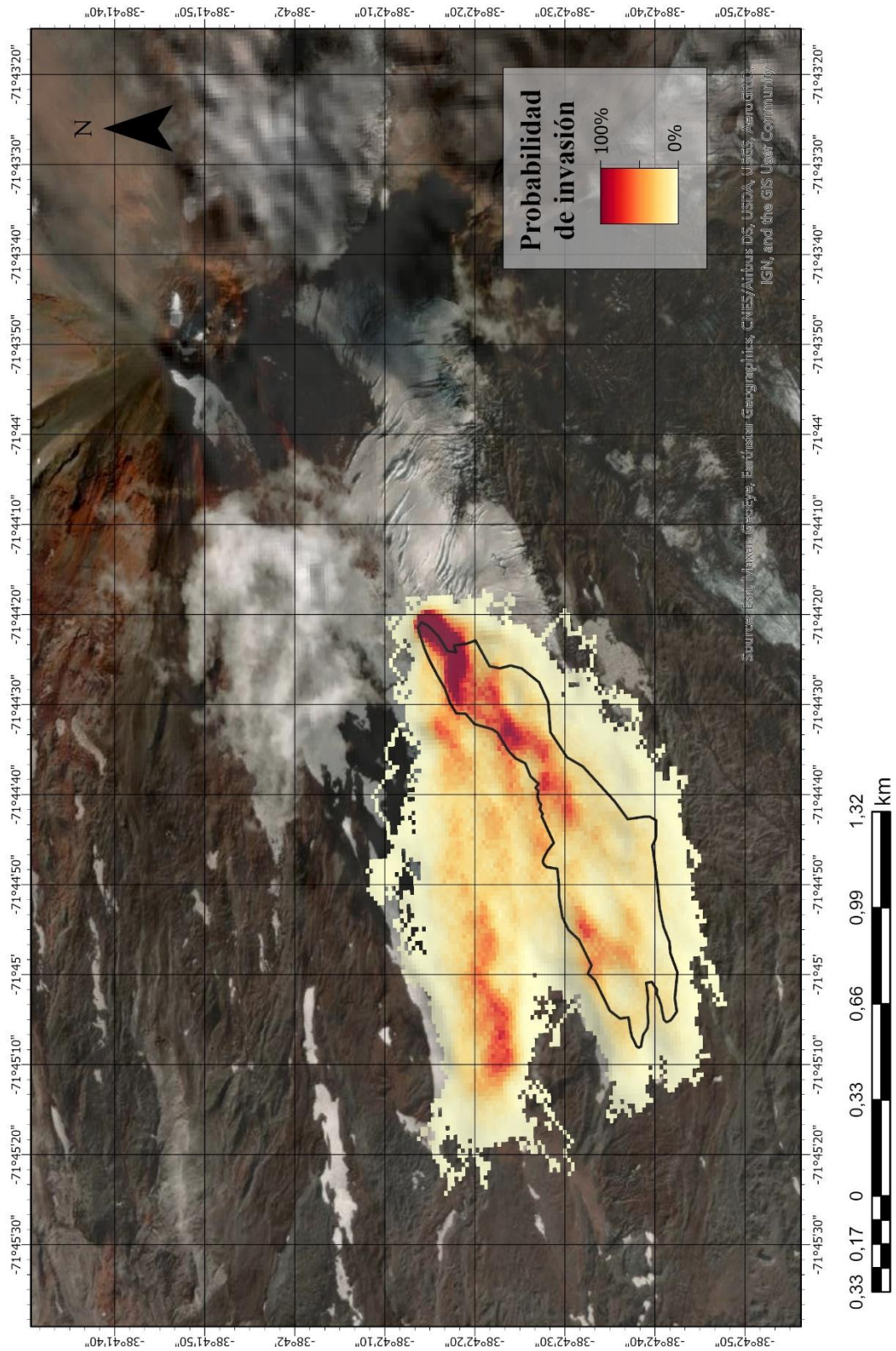


Figura 4.25: Validación del flujo de lava asociado a la erupción de 1994 del volcán Llaima.

SIMULACIÓN DE PROBABILIDAD DE INVASIÓN DE FLUJOS DE LAVA EMITIDOS DESDE EL CRÁTER PRINCIPAL DEL VOLCÁN LLAIMA

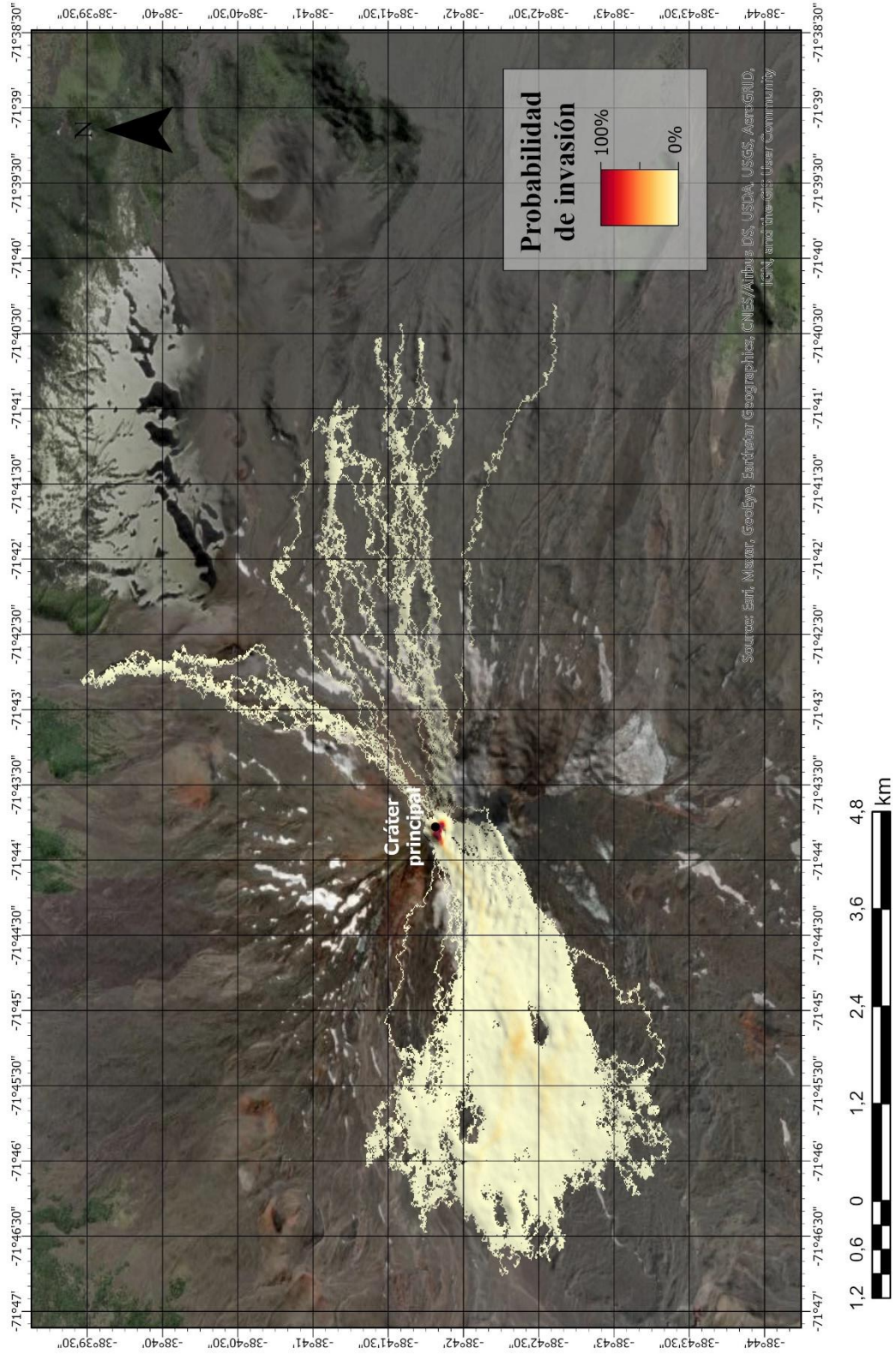


Figura 4.26: Simulación de probabilidad de invasión de flujos de lava emitidos desde el cráter principal del volcán Llaima. Coordenadas del centro de emisión: 784432, 5711725.

SIMULACIÓN DE PROBABILIDAD DE INVASIÓN DE FLUJOS DE LAVA EMITIDOS DESDE EL ÁREA QUE CUBRE Y RODEA AL CRÁTER PRINCIPAL DEL VOLCÁN LLAIMA

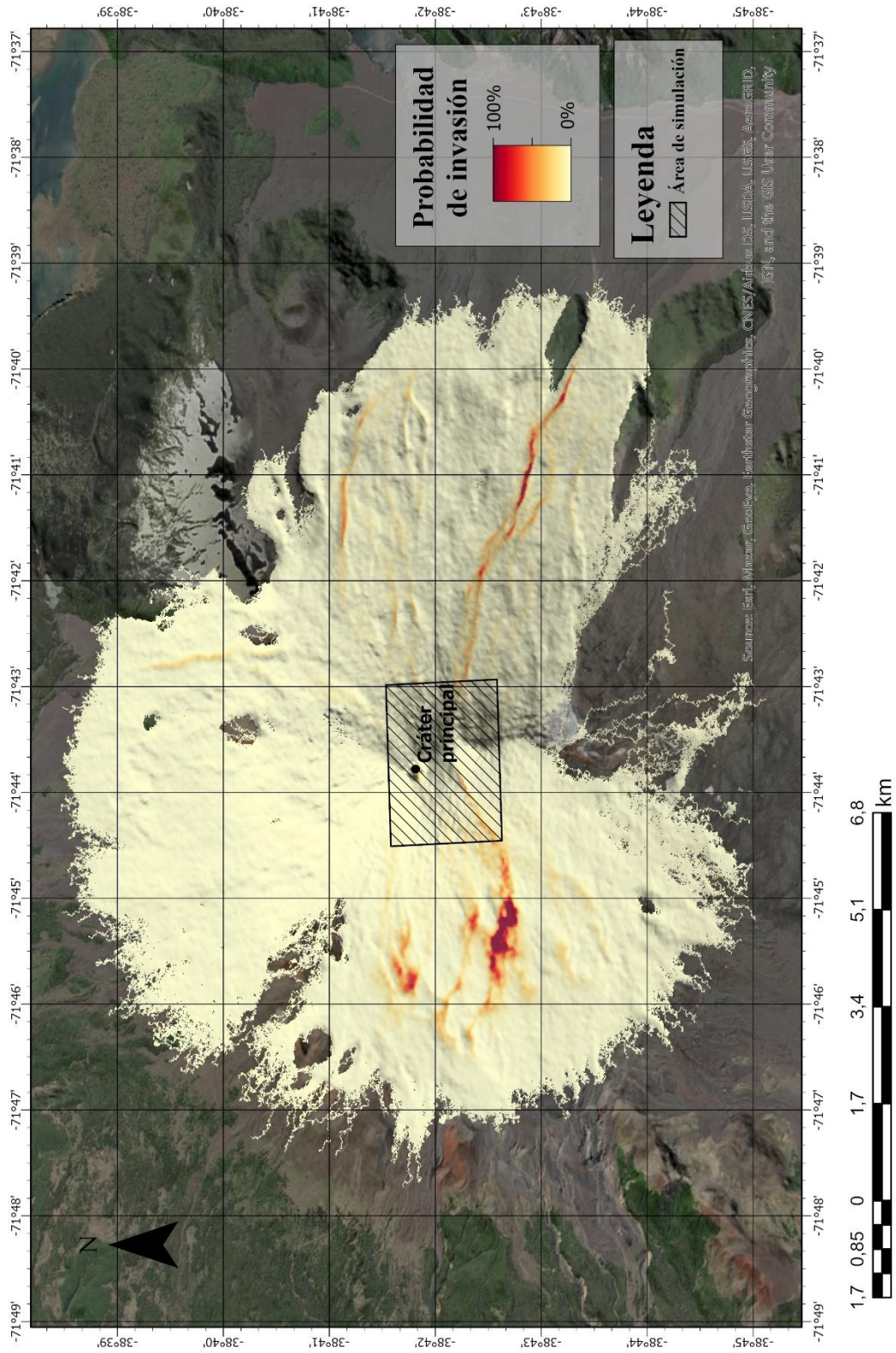


Figura 4.27: Simulación de probabilidad de invasión de flujos de lava emitidos desde el área que cubre y rodea al cráter principal del volcán Llaima.

V Discusión

Es relevante comenzar mencionando que la erupción correspondiente a los años 1893–1894 del volcán Villarrica descrita en la sección de “Erupciones históricas de estudio” correspondiente al volcán, fue excluida del análisis desarrollado de forma posterior debido a la escasa documentación de la erupción en el registro geológico y bibliográfico, y la nula existencia de mapeos previos del posible depósito de lava asociado. Por lo anterior, se cree que se trató de una erupción de corta duración en la que fue emitido un pequeño volumen de lava, el cual debió ser sepultado por flujos lávicos posteriores.

Por otro lado, en el volcán Llaima también hubo controversias en cuanto a los depósitos de lava asociados a una erupción histórica. Este es el caso de la lava de 1780, la cual se encuentra cartografiada en el mapa geológico de Naranjo & Moreno (2005), sin embargo, en el estudio posterior realizado por Roperch et al. (2015) se estimó que el flujo correspondía a los años 1820–1900, siendo probablemente un producto asociado a la erupción de 1875–1876 descrita por Petit-Breuilh (2004). En este trabajo se utilizó la cartografía previa realizada por los autores Naranjo & Moreno (2005) para re-cartografiar el depósito debido a la nula información disponible acerca del flujo asociado a 1780 en caso de que no fuese este. Esto abre una oportunidad para la realización de estudios posteriores que aborden únicamente el estudio de la erupción en cuestión con tal de encontrar el depósito que se le asocia, considerando la controversia existente.

5.1 Cartografía

Siguiendo en la línea del volcán Llaima, y a modo de comentario acerca de la cartografía de sus lavas, se tiene el caso de las erupciones históricas de mayor antigüedad: 1640 y 1751. La re-cartografía de estos depósitos conllevó una dificultad asociada a la antigüedad que poseen, lo cual es observable en la discontinuidad que presentan debido a diversos factores. La lava de 1640 se encuentra en gran parte cubierta por el depósito de lava de 1780. Por otro lado, la de 1751 se encuentra discontinua debido a la acción erosiva del río Allipén hacia el sur

del depósito. Las lavas fueron cartografiadas considerando los depósitos identificables con la utilización del mapa de sombras, imágenes satelitales, trabajo de campo y cartografía previa de Naranjo & Moreno (2005). Sumado a esto se hizo una extrapolación de la cartografía generada con tal de estimar el área total correspondiente a los flujos y evitar la subestimación de los parámetros de área y volumen totales. En el caso de 1640 se consideró el área hacia el este del flujo sur, que se encuentra cubierta por el depósito de 1780 (fig. 4.9). Los segmentos correspondientes al flujo de 1751 se unieron mediante la cartografía del área total considerada (fig. 4.10). Se realizaron los cálculos del parámetro de área de los flujos utilizando el polígono correspondiente al área total estimada con tal de obtener un valor más representativo, lo cual a su vez generó variaciones en cuanto en su volumen por el mismo motivo. Como se mencionó anteriormente esto se realizó con tal de obtener valores más precisos a pesar de la dificultad que existe de estimar de forma correcta el área que realmente corresponde a cada erupción estudiada, en especial en el caso de la lava de 1640 que se encuentra sepultada por flujos posteriores. Debido a la nula existencia de cálculos previos de los parámetros de área y volumen realizados por otros autores, se imposibilita realizar algún tipo de validación de ellos sin embargo, se entiende este trabajo como un punto de partida para otros estudios futuros.

El trabajo de campo enfocado en las lavas históricas del volcán Llaima permitió una cartografía de mayor precisión en diferentes puntos de interés sumado al reconocimiento de la unidad Llaima Fisural 3 (Naranjo & Moreno, 2005). Tal unidad fue identificada en los sectores de Laguna Arcoíris y Lago Verde, ambos ubicados dentro del Parque Nacional Conguillío. En este último punto fue posible además la medición de su espesor, el cual allí alcanza unos 16 m aproximados (fig. 5.1), presentando el flujo una morfología del tipo “aa” de coloración oscura. El depósito en cuestión, que se encuentra descrito en el Anexo, corresponde a uno histórico datado en la carta geológica por Naranjo & Moreno (2005) en $+320 \pm 50$. Para ámbitos de este trabajo no fue posible asignarlo a una erupción histórica en particular debido a la falta de información bibliográfica del mismo, de modo que no se realizó la re-cartografía de este.



Figura 5.1: Frente de lava correspondiente a unidad Llama Fisural 3 en las cercanías al Lago Verde. Espesor aproximado de 16 m. Ubicación: 38°41'43.91"S, 71°37'23.40"O.

5.2 Obtención de parámetros

Se discutirán a continuación los resultados relacionados a la obtención de los diferentes parámetros de las lavas históricas estimados en este trabajo y recabados de otros estudios.

5.2.1 *Espesor.*

El trabajo de la obtención de parámetros de las coladas de estudio requirió de un alto componente crítico, en especial a la hora de decidir el valor de espesor que representa a cada flujo. Tal parámetro no fue obtenido para la totalidad de las lavas de estudio, sino que únicamente para aquellas en las que se poseían mediciones de otros autores o propias. Si bien en la totalidad de los flujos se trabajó con el espesor promedio, no se consideró el mismo principio en todos los casos. Un ejemplo de esto son los flujos de 1948–1949 y 1971–1972 del

volcán Villarrica (tabla 4.1). En el primer caso se poseía un único valor de espesor promedio de 11,5 m obtenido por Moreno & Clavero (2006) junto a tres mediciones obtenidas en trabajo de gabinete, todas ellas cercanas a 7 m. Debido a lo anterior se consideraron los cuatro valores para obtener el espesor promedio, debido a que en caso de utilizar únicamente los medidos en este trabajo, se cree que se hubiese subestimado el espesor correspondiente al flujo. A diferencia de lo anterior, de los flujos de lava de 1971–1972 únicamente se logró medir un valor en gabinete, el cual por tales razones no se consideró representativo del flujo. Sin embargo, mediante la recopilación bibliográfica previamente desarrollada, se poseían dos espesores promedio calculados por Moreno & Clavero (2006) y Castruccio & Contreras (2016). Al tratarse de valores numéricamente distintos se optó por la utilización del promedio entre ellos para obtener el espesor promedio representativo del flujo en términos del presente trabajo.

A diferencia del volcán Villarrica, el espesor promedio representativo de las lavas históricas del volcán Llaima fue obtenido únicamente con los datos de espesor calculados en este trabajo (tabla 4.4). Se destaca la cantidad y calidad de datos obtenidos mediante las mediciones hechas en terreno y el posterior trabajo de gabinete, lo cual permitió la estimación del valor más representativo posible, sin únicamente considerar mediciones en el frente de los flujos.

De la colada de lava del volcán Llaima asociada a 1640 se poseía una única medición de espesor en trabajo de campo que resultaba mucho menor que las cinco obtenidas en gabinete. Al tratarse de un depósito de grandes dimensiones existe una gran variación en la morfología que presenta a lo largo y ancho de los lóbulos de lava, variando de igual manera el espesor. Añadido a esto, el acceso en terreno a este flujo de lava resulta muy limitado debido a que se encuentra la zona en gran parte privatizada y por la presencia de forestales en los lóbulos sur, lo cual explica la medición de un único valor en trabajo de campo. Para representar este flujo en particular se consideró la totalidad de las mediciones tanto de campo como gabinete con tal disminuir la incertidumbre que conlleva la morfología que presenta el depósito.

5.2.2 Longitud máxima.

También fueron estimadas las longitudes máximas de los flujos de lava históricos. Entre estos se destacan las mediciones realizadas a los flujos del volcán Villarrica (tabla 4.2) de los años 1787, 1921 y 1984–1985 puesto que este parámetro no fue encontrado en bibliografía previa. Debido a lo anterior estos resultados son considerados un aporte a la documentación de estas lavas. Por otro lado, para las erupciones de 1948–1949, 1964 y 1971–1972 del volcán se poseen valores bibliográficos previos bastante cercanos a los obtenidos en este estudio, existiendo tan solo diferencias decimales en prácticamente todos los casos, lo cual valida fuertemente los resultados.

En el caso del volcán Llaima se encontraron diferencias un tanto mayores en el cálculo de la longitud máxima, las cuales llegan a alcanzar los 6 m de discrepancia (tabla 4.5). Los datos bibliográficos fueron obtenidos de Naranjo & Moreno (2005), exceptuando el flujo más actual de 1994. La mayor diferencia se observa en el flujo de 1955–1957 siendo superado en 6,08 m el valor obtenido por los autores en comparación al estimado en este trabajo. Sucede algo similar para la lava de 1640 donde se obtuvo una longitud 4,38 m mayor. Para 1945 ocurre lo contrario ya que se obtuvo un valor de 5,1 m versus los 10 m obtenidos por Naranjo & Moreno (2005). Estas diferencias pueden estar relacionadas a la metodología utilizada en este estudio basada en el uso de modelos de elevación digital e imágenes satelitales de gran precisión. Sumado a esto podría existir una variación en el valor de este parámetro al no poseer la localización exacta del centro de emisión de cada flujo estudiado, lo cual conllevaría una subestimación del valor.

5.2.3 Ancho.

En cuanto al parámetro de anchura de las coladas de lava, en este estudio se trabajó con el valor máximo medido de forma perpendicular a la dirección de cada flujo. En bibliografía se encontraron mayoritariamente valores de espesor promedio, lo cual no se considera comparable al valor máximo ya que este será mayor por razones obvias. Se aportó en este estudio con el valor de ancho máximo de la totalidad de los flujos del volcán Llaima (tabla 4.5)

y las lavas de los años 1787 y 1921 del volcán Villarrica (tabla 4.2), de los cuales previamente no se poseían tales cifras en la bibliografía existente. Del flujo de lava de 1964 del volcán Villarrica se posee un dato bibliográfico recabado del POVi (2021) que hace alusión a 200 m de ancho del flujo, sin especificar si se trata del valor promedio, máximo o de una única medición. Aquella cifra es bastante lejana a los cerca de 420 m medidos en este trabajo con el software ArcGIS Pro 2.5, lo cual no es comparable debido a que se desconoce a que tipo de medición de ancho es la anterior, sin embargo como en este trabajo se usaron insumos de gran calidad los resultados son considerados más realistas. Por otro lado, de la erupción de 1984–1985 del volcán Villarrica se posee un ancho máximo también recabado del POVi (2021) que fue medido en terreno a 4 km al NNO del cráter principal del volcán. Existe una diferencia de 100 m entre el valor medido en aquel punto y el obtenido en este trabajo, siendo 80 y 180 m respectivamente. Esto puede deberse a la gran limitación que existe al realizar trabajo en terreno que conlleve la medición de grandes distancias, debido a diferentes factores como son la dificultad de acceso y la imposibilidad de poseer una vista general de los flujos que permita identificar la zona de mayor anchura. Al realizar esta tarea de manera remota como fue en este trabajo se evitó lo anterior y se pudo identificar claramente el perfil del flujo que poseía mayor ancho, siendo este el punto de medición.

5.2.4 *Área total.*

Se calculó también el parámetro de área total asociado a la totalidad de las lavas históricas de los volcanes de estudio (tablas 4.2 y 4.5). Estos resultados representan una gran contribución a la documentación de las erupciones históricas de los volcanes Villarrica y Llaima debido a la carencia de estos datos en estudios previos. Tan solo de la erupción de 1971–1972 del volcán Villarrica se poseía un cálculo previo del área de los flujos de lava asociados recabado del POVi (2021) y estimándose en 2,8 km², mientras que en este trabajo se obtuvo 3,5 km² aproximados. En este estudio se trabajó con insumos de gran precisión para lograr la obtención del área, de manera que los resultados se consideran bastante precisos de igual manera.

5.2.5 *Volumen.*

Se estimaron además los volúmenes totales de los flujos de lava de 1948–1949, 1971–1972 y 1984–1985 del volcán Villarrica (tabla 4.3). De la erupción más antigua entre las nombradas se poseen datos bibliográficos de volumen obtenidos de Pizarro et al. (2019) y POVi (2021), siendo de $16 \pm 4 \times 10^6$ y $9.000.000 \text{ m}^3$ respectivamente. La cifra calculada en este trabajo es bastante mayor, alcanzando los $22.600.000 \text{ m}^3$ aproximadamente. Pizarro et al. (2019) estimó el volumen total únicamente del flujo de lava principal, siendo que en la erupción se generaron dos flujos, lo cual explica que el valor sea menor al calculado en este estudio. Por otro lado, el POVi (2021) menciona que los $9.000.000 \text{ m}^3$ de volumen se obtuvieron de la colada generada los primeros días de febrero en el sector SO, de modo que al tratarse de un dato específico y no general al igual que en el caso anterior se explica de igual manera la subestimación del volumen total de lava asociado a la erupción. En cuanto a la erupción de 1971–1972, se recabó mayor cantidad de datos bibliográficos. En este trabajo se obtuvo un valor similar al anterior cercano a los $22.700.000 \text{ m}^3$, el cual se encuentra dentro del rango estimado por Pizarro et al. (2019) de $26 \pm 7 \times 10^6$. Granados et al. (2021) estimaron un valor bastante menor, siendo de $11.000.000 \text{ m}^3$, sin mencionar detalles de la obtención de este. Sucede lo opuesto para los $30.000.000$ y $\sim 50.000.000 \text{ m}^3$ estimados por el POVi (2021) y Castruccio & Contreras (2016) respectivamente, valores bastante mayores que el obtenido en este trabajo. Estos autores tampoco entregan información detallada del cálculo desarrollado, lo cual imposibilita emitir comentarios al respecto debido a que simplemente entregan la cifra en cuestión. Por último, la lava de 1984–1985 se estimó que posee un volumen total de $4.000.000 \text{ m}^3$ aproximados, sin embargo Granados et al. (2021) calculó $10.000.000 \text{ m}^3$, sin tampoco entregar información de su cálculo. A pesar de lo anterior, las diferencias existentes en este valor pueden deberse a los insumos utilizados en cada estudio y al espesor promedio utilizado para el cálculo, lo cual fue previamente discutido.

Por otro lado, los resultados obtenidos en este trabajo de volumen total de las lavas de 1640, 1751–1752, 1780 y 1945 del volcán Llaima poseen gran relevancia debido a que no se poseían estos datos en bibliografía anterior (tabla 4.6). Únicamente se recabó en bibliografía el

volumen asociado a las lavas de 1955–1957 y 1994, de las cuales en este trabajo solo fue posible obtener el volumen de la primera de ellas. Bounet De Maisonneuve (2011) menciona que el volumen de la lava de 1955–1957 se encuentra entre $\sim 5 \times 10^8$ y 8×10^8 m³, valores que son bastante mayores a los casi 100.000.000 m³ calculados en este trabajo. Como se mencionó en el Marco metodológico de este trabajo, se utilizó el área y espesor promedio para la obtención del volumen. En el caso particular de este flujo se considera que su espesor promedio es especialmente representativo debido a que se posee una densidad mayor de mediciones en comparación a otras lavas, por lo cual a su vez se estima que el volumen obtenido es el más cercano a la realidad.

5.2.6 Tasa de emisión.

La obtención de parámetros permitió también recabar datos de duración de las erupciones con tal de estimar la tasa de emisión de lava asociada. Tales resultados se muestran en las tablas 4.3 y 4.6, siendo del volcán Villarrica y Llaima respectivamente. Se calculó este parámetro con los datos bibliográficos que se poseían, de forma que del flujo de 1921 del volcán Villarrica a pesar de que no se haya calculado su volumen en este trabajo se consideró aquel estimado por Pizarro et al. (2019) y el dato de duración que los autores entregaban para estimar la tasa de emisión. Además, se pudo estimar este parámetro de las erupciones de 1948–1949, 1971–1972 y 1984–1985 del volcán. En los tres casos se considera que se subestimó el valor debido a que es mucho menor que aquellos calculados en estudios previos. Esto se debe a la larga duración en días que poseen las erupciones, lo cual provoca una disminución en la tasa de emisión. En particular la erupción del volcán Llaima de 1955–1957 posee una duración aproximada de 750 días, lo cual al tratarse de una cifra alta provoca cierto sesgo de error en los cálculos meramente por la carencia de datos bastante relevantes para las tareas realizadas en este estudio. Lo anterior demuestra que una documentación poco exacta de las erupciones genera a su vez cierta incertidumbre en los parámetros que se calculan con los datos disponibles. Únicamente de la lava de 1921 del volcán Villarrica se posee el dato de la duración exacta de la emisión del flujo de lava (36 h), siendo el caso contrario en el resto de las

lavas estudiadas de ambos volcanes, donde se utilizó la cifra de la cantidad de días totales de la erupción para calcular la tasa de emisión.

5.3 Simulaciones en Q-LavHA

En este trabajo se realizaron simulaciones de probabilidad de invasión de flujos de lava utilizando el complemento Q-LavHA de QGIS. Se validaron las cartografías de las lavas de 1971-1972 y 1984-1985 del volcán Villarrica, debido a que se trata de las más actuales emitidas por el volcán (fig. 4.19 y 4.20). En ambos casos se obtuvieron resultados que sobrestiman los flujos de lava cartografiados, sin embargo, la zona de mayor probabilidad de invasión presenta una forma similar a la cartografiada de forma previa. Se observan diferencias entre la cartografía y la zona de mayor probabilidad en los sectores cercanos a cada punto de emisión considerado.

Por otro lado, se trabajó en la validación de los flujos de 1751 y 1994 del volcán Llaima (fig. 4.24 y 4.25). El primero no se logró validar por completo a pesar de ingresar distintos parámetros para lograrlo, siendo posible notar que los flujos simulados no siguen la cartografía de este, de forma que no alcanzan a llegar al punto final. En cuanto al de 1994 este se considera más cercano a la cartografía a pesar de que se genera una bifurcación del flujo simulado con mayor probabilidad de invasión, existiendo una sobrestimación de la simulación con respecto al flujo cartografiado. Cabe mencionar que esta simulación fue realizada ingresando el parámetro de espesor promedio de las lavas del volcán Llaima al no poseer el dato del flujo en particular, lo cual podría explicar en parte la diferencia existente.

Las diferencias observadas entre las simulaciones y los polígonos de los flujos cartografiados pueden explicarse por el hecho de que se trabajó con el modelo de elevación digital que ya contiene los depósitos de las lavas estudiadas. Para obtener mejores resultados en las simulaciones se requiere de un trabajo previo basado en la extracción de los depósitos del MDE, lo cual no se realizó en este trabajo. Sumado a esto se tiene también el parámetro de H_p requerido por Q-LavHA, el cual expresa la máxima altura de los obstáculos que puede

superar el flujo modelado. Para obtener tal parámetro se requiere de un fuerte análisis del perfil topográfico de los flujos, lo cual tampoco fue realizado en este trabajo. Además, la localización del punto de emisión puede no reflejar bien la invasión de las lavas, pues como fue mencionado con anterioridad, se desconoce la ubicación exacta de cada uno de ellos.

Utilizando de igual manera el complemento Q-LavHA se simuló la invasión de flujos de lava desde el cráter principal de cada volcán de estudio y el área poligonal que lo cubre utilizando los parámetros de longitud y espesor promedio de las lavas históricas de cada volcán. Se consideraron tales puntos y áreas debido a que no se poseen mapas de probabilidad espacial o de susceptibilidad volcánica que permitan conocer las zonas más probables de abrirse nuevos centros de emisión. Además, no se simuló la emisión de lava a partir de fisuras debido a la gran incertidumbre existente a la hora de estimar los puntos de estas. A diferencia de las validaciones mencionadas en el párrafo anterior, al realizar una simulación de invasión de flujos de lava futuros tiene todo el sentido realizarlo con el MDE que contiene la totalidad de depósitos del volcán, de modo que no existe un sesgo de error asociado a este punto.

En el caso del volcán Villarrica también se realizó una simulación a partir de un punto al SO del cráter principal (fig. 4.21). Las lavas históricas de este volcán se encuentran hacia el NE, N, NO y SO, sin haber depósitos en el punto cercano al cual se generó la simulación. En el caso de una futura erupción del volcán es esperable que este continúe con el comportamiento histórico, de modo que el flujo de lava podría emplazarse hacia el O-SO del cráter principal. En la simulación generada a partir del área del cráter principal se observa con alta probabilidad de invasión el mismo flujo hacia el SO, lo cual se considera una validación de este (fig. 4.23). En este modelo también se observa una tendencia de alta probabilidad hacia el este del cráter principal y probabilidad media hacia el NE. La simulación puntual desde el cráter principal del volcán lo rellena y aumenta la probabilidad en este punto, sin embargo también se notan probabilidades altas de invasión de flujos hacia el este nuevamente y se destaca un flujo hacia el NE que sigue el depósito de lava de 1984 (fig. 4.22). Resulta relevante considerar la información anterior en erupciones efusivas futuras del volcán.

La simulación puntual generada desde el cráter principal del volcán Llaima no presenta tendencias claras de alta probabilidad de invasión de los flujos de lava, sin embargo muestra una probabilidad media-baja de invasión hacia el SO del cráter (fig. 4.26). Esta tendencia se observa con mayor claridad y probabilidad en la simulación generada de área (fig. 4.27). En este modelo también se nota una alta probabilidad de invasión de coladas hacia el SE del cráter principal. En eventos eruptivos efusivos futuros del volcán los flujos lávicos podrían desplazarse hacia los sectores mencionados. Cabe mencionar que el hecho de que el modelo puntual no muestre tendencias claras sucede debido a que los flujos simulados tienden a rellenar el cráter principal al igual que en el volcán Villarrica, aumentando la probabilidad en ese punto. Las altas probabilidades de invasión de coladas se observan principalmente en el modelo de área, lo cual se relaciona con la fuerte tendencia que posee el volcán de erupcionar por fisuras en sus flancos. La generación de fisuras a su vez se asocia a las erupciones efusivas volumétricas como es el caso de 1640, durante la cual se emitió lava a partir de dos fisuras.

Es importante tener en cuenta que las longitudes de los flujos de lava simulados usando Q-LavHA son menores que las esperadas. Este punto es abordado por Becerril et al. (2021) quienes mencionan que, dado que este complemento considera de parámetro de entrada la longitud, sucede que cada línea de flujo sigue una trayectoria sinuosa cuya longitud será mucho mayor que la longitud recta medida a lo largo del canal principal de un flujo de lava real. De igual manera se menciona en este estudio que las longitudes de los flujos de lava simulados están influenciadas por la resolución del MDE utilizado y la pendiente de la zona.

Las simulaciones de invasión de flujos de lava futuros adquieren gran relevancia debido a la presencia de elementos expuestos ante un posible evento eruptivo de los volcanes de estudio. Las regiones de La Araucanía y Los Ríos presentan alta densidad de población por el uso industrial, agrícola y el turismo en la zona, de forma que se requiere de una evaluación de los peligros volcánicos que representan los volcanes Villarrica y Llaima.

La alta densidad de población, el uso industrial y agrícola y el atractivo turístico de las regiones adyacentes a los volcanes activos requieren una evaluación de los peligros volcánicos,

con el objetivo de predecir y mitigar las erupciones en esas zonas expuestas a peligros (Dzierma & Wehrmann, 2010). Esto adquiere aún mayor relevancia ya que en el estudio de hace 12 años realizado por Dzierma & Wehrmann (2010) se pronosticó que en el Llaima ocurrirá al menos una erupción con IEV 2 dentro de los próximos 20 años, correspondiente al 2030, con una probabilidad del 90%. En el caso del Villarrica esto se estimó hasta el 2060.

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que existe una clara y gran diferencia en los parámetros de las lavas históricas de los volcanes Villarrica y Llaima. Si bien el trabajo bibliográfico permitió establecer ciertas similitudes en cuanto a la composición química de las lavas emitidas, esto solo ocurre entre las erupciones de 1948–1949, 1971–1972 del volcán Villarrica y las de los años 1640 y 1945 del volcán Llaima, las cuales presentan composición andesítica–basáltica (tablas 4.2, y 4.5). Las diferencias existentes entre los volcanes de estudio fueron observables en un inicio al desarrollar la cartografía de las lavas, donde fue posible notar que en general existe una canalización de las lavas históricas del volcán Villarrica en las quebradas que lo rodean, siendo contrario el caso del volcán Llaima, cuyos flujos cubren áreas mayores tanto en los flancos del volcán como zonas cercanas a este. Las diferencias persisten en los valores de longitud máxima, ancho, espesor, área, volumen y tasa de emisión. Para visualizar correctamente estos parámetros se generó la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Valores promedio de los parámetros de las lavas históricas de los volcanes Villarrica y Llaima.

Parámetro Volcán	Longitud máxima (km)	Ancho máximo (m)	Espesor promedio (m)	Área total (km ²)	Volumen (m ³)	Tasa de emisión (m ³ /s)
Villarrica	8,66	664,84	6,79	3,69	16.440.200	6,95
Llaima	13,86	1812,08	11,64	17,63	330.453.320	10,78

En la tabla anterior se observa que la totalidad de los parámetros obtenidos en este trabajo presentan valores mayores para las lavas históricas del volcán Llaima en comparación al Villarrica. Es importante destacar la gran diferencia que existe en el volumen promedio emitido

en las erupciones históricas, que es 20 veces mayor en el volcán Llaima frente al Villarrica. Sucede algo similar con el área total, donde el valor asociado al volcán Llaima es cerca de 5 veces mayor. De esta forma se estima que las lavas históricas del volcán Llaima son más volumétricas y de mayor área que las del Villarrica, a pesar de que este último ocupe el primer puesto en el Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos publicado por SERNAGEOMIN (2020).

De lo anterior se desprende otro punto importante a considerar. Las lavas históricas del volcán Llaima poseen mayor variación en los parámetros estudiados (tablas 4.5 y 4.6), presentando una mayor gama de valores posibles que las lavas del volcán Villarrica. Esto genera una mayor complejidad a la hora de establecer valores estándar para el macizo y por ende mayor incertidumbre en el comportamiento de flujos de lava futuros. El volcán Villarrica por otra parte presenta valores cercanos entre una erupción y otra debido a la similitud observable en los flujos históricos, existiendo únicamente la excepción de la erupción de 1921 que conllevó un mayor volumen de lava asociado. Se considera que los escenarios futuros de erupciones efusivas por parte del volcán Villarrica seguirán el comportamiento histórico que este ha evidenciado, siendo mayor el grado de incerteza para el Llaima, el cual ha emitido flujos de lava históricos con parámetros más variados.

VI Conclusión

El trabajo realizado apuntó a la obtención de los parámetros de las coladas de lava históricas de los volcanes Villarrica y Llaima. Para esto se desarrolló la búsqueda bibliográfica de ellos, junto con la re-cartografía de los flujos de lava para posteriormente realizar el cálculo de los parámetros de longitud máxima, ancho máximo, espesor, área total, volumen y tasa de emisión, y finalmente simular la probabilidad de invasión de coladas con Q-LavHA. Se considera entonces que los resultados de este trabajo representan un gran aporte a la documentación actual de las lavas históricas de los volcanes de estudio.

Se destacan los resultados obtenidos del parámetro de espesor de las lavas históricas del volcán Llaima. Esto se logró mediante salidas de campo y trabajo de gabinete que conllevó el uso del modelo de elevación digital de 2,5 m de resolución con tal de generar perfiles topográficos que permitiesen realizar la medición de espesor. Lo anterior permitió, por ejemplo, calcular el espesor representativo de la lava de 1640 del volcán Llaima, dato que previamente no se encontraba en la bibliografía existente.

El cálculo de áreas y volúmenes también permitió generar un aporte debido a la carencia de estos datos en estudios previos. Este fue el caso de las lavas de 1787, 1921, 1948-1949, 1964 y 1984-1985 del volcán Villarrica, y de la totalidad de las erupciones históricas efusivas del volcán Llaima, de las cuales se obtuvo el área total asociada al depósito. En cuanto al parámetro de volumen se destaca su obtención para los depósitos de lava asociados a las erupciones de 1640, 1751-1752, 1780, 1945 del volcán Llaima junto con el aporte bibliográfico de este dato para la mitad de las erupciones estudiadas del Villarrica.

De igual forma se obtuvieron resultados de importancia científica mediante las simulaciones realizadas en Q-LavHA. Las simulaciones de los flujos de lava emitidos desde el cráter principal del volcán Villarrica mostraron una alta probabilidad de invasión hacia el SO y E del cráter. En ambos sectores actualmente no se encuentran emplazados depósitos de lava históricos sin embargo se considera relevante considerarlo en caso de futuras erupciones

efusivas del volcán. Algo similar ocurre con el volcán Llaima, cuyas simulaciones mostraron una alta probabilidad de invasión hacia el SO, cercano al pequeño depósito de la lava del año 1994 y al SE del cráter principal.

Se concluye que las lavas históricas de los volcanes Villarrica y Llaima no presentan similitudes en los parámetros estimados y recabados de estudios previos. Los flujos lávicos asociados al volcán Llaima en promedio poseen mayor longitud máxima, ancho máximo y espesor, destacando además la gran diferencia existente en los valores de área y volumen calculados.

VII Anexo

7.1 Marco geológico del volcán Villarrica

Moreno & Clavero (2006) describen el contexto geológico del volcán Villarrica en el apartado “Geología del volcán Villarrica” de la carta geológica de Chile. A continuación, se presenta una descripción simplificada basada en el trabajo de los autores.

7.1.1 *Basamento del volcán.*

7.1.1.1 *Rocas estratificadas.*

Complejo Metamórfico Trafún Devónico–Carbonífero
(Campos et al., 1998)

Son afloramientos de escasa distribución areal que han sido reconocidos al suroeste del área de estudio extendiéndose hasta unos 7 km al noroeste de Licán Ray, donde están parcialmente cubiertos por depósitos glaciares y/o piroclásticos provenientes del volcán Villarrica. Corresponden a filitas, cuarcitas y gneises que presentan fuerte deformación local.

Formación Panguipulli Triásico Superior
(Aguirre & Levi, 1964)

Son afloramientos restringidos ubicados al suroeste del área de estudio, en las cercanías de Licán Ray. Corresponde a una secuencia sedimentaria, localmente rítmica, finamente laminada y formada por capas de lutitas de espesor entre 5 y 30 cm, alternadas con capas de areniscas cuarcíferas finas a gruesas de espesor variable entre 7 y 40 cm. Presenta algunas intercalaciones de ortoconglomerados cuarcíferos que alcanzan los 110 cm de espesor. Esta secuencia posee disposición homoclinal, rumbo de 5–20°W y manteo 50°E.

Estratos de Pino Huacho Oligoceno–Mioceno

Es una Unidad Informal que corresponde a una secuencia volcanoclástica estratificada que aflora principalmente al oeste del volcán Villarrica, entre las ciudades de Villarrica y Licán Ray, y en los flancos norte y sur del macizo. La secuencia incluye lavas, tobas brechosas y de lapilli, las cuales presentan composición andesítica y capas de 3 a 5 m de espesor. Se suelen

presentar alteradas a clorita y epidota, y localmente afectadas por metamorfismo de contacto debido a la intrusión de cuerpos plutónicos del Mioceno Superior. La secuencia además considera numerosos cuerpos subvolcánicos asociados, como diques y filones de la misma composición.

Estratos de Península Pucón Mioceno Medio a Superior

Unidad informal que corresponde a una secuencia volcanoclástica que aflora en la Península de Pucón, inmediatamente al oeste de tal localidad. Posee disposición subhorizontal a suavemente plegada y está cubierta parcialmente por depósitos piroclásticos y laháricos del volcán. En general las capas presentan rumbo NNE y manteos variables entre 5 a 30° al oeste. La secuencia está constituida por lavas amigdaloidales, brechas piroclásticas y tobas líticas de lapilli, todas estas poseen composición andesítica y conforman capas de espesor variable entre 5 y 8 m. Presenta minerales de alteración como calcita, arcilla y óxidos de hierro, y está cortada por numerosos diques y filones manto también de composición andesítica, de textura afanítica y con espesores de entre 1 y 6 m.

Estratos de Huincacara Plioceno Superior–Pleistoceno

Unidad informal asociada a una secuencia volcanoclástica que se dispone en discordancia angular sobre los Estratos de Pino Guacho ubicada entre las localidades de Villarrica y Licán Ray. Está formada por brechas piroclásticas, areniscas y conglomerados epiclásticos, principalmente con fragmentos de lava de composición andesítica. Corresponden a facies medias a distales de antiguos centros volcánicos, erosionados y/o cubiertos por productos del volcán Villarrica.

7.1.1.2 Rocas plutónicas.

Intrusivos del Paleozoico Carbonífero Superior–Pérmico

Conjunto de cuerpos plutónicos que afloran al suroeste de la zona de estudio, cercano a Licán Ray. Corresponden esencialmente a granitos, granodioritas y tonalitas de grano grueso.

No existen datos geocronológicos en el área de estudio, sin embargo, Munizaga et al. (1988) reportaron edades de K-Ar 282 ± 4 Ma y 294 ± 6 Ma en rocas de petrología similar ubicadas hacia el sur, entre los lagos Riñihue y Panguipulli.

Intrusivos del Cretácico

Principalmente corresponden a cuerpos plutónicos ubicados al sureste del área de estudio. Existe predominio de las fases tonalíticas, con cuerpos subordinados de granodioritas y dioritas cuarcíferas, y localmente presentan foliación magmática débil y numerosos enclaves máficos. Corresponderían a miembros de la franja de granitoides cretácicos reconocida hacia el este y sureste de la zona de Liquiñe (Lara & Moreno, 2004).

Intrusivos del Mioceno

Corresponden a un conjunto de cuerpos plutónicos ubicados principalmente al este del área de estudio, al norte y sur del volcán Villarrica, que forman parte del sector este del basamento. Mayormente corresponden a dioritas, tonalitas y granodioritas que localmente presentan estructuras de “roof-pendants” de rocas cenozoicas y texturas migmatíticas.

Estos cuerpos en conjunto representarían la extensión septentrional de la franja de granitoides miocenos ubicada al oeste de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, denominada como Granitoides Pellaifa-Neltume por Lara y Moreno (2004).

7.1.2 Geología del volcán.

De acuerdo con Moreno & Clavero (2006) los productos del volcán Villarrica se agrupan en tres unidades según criterios estratigráficos, geomorfológicos, estructurales y geocronológicos. Las unidades se describen a continuación.

Unidad Villarrica 1 Pleistoceno Medio a Superior; Pleistoceno medio-13850 AP (Modificado de Moreno, 1993; Clavero & Moreno, 2004)

Los productos asociados a esta unidad han sido emitidos durante dos etapas que fueron separadas por un evento de mayor magnitud que generó el colapso parcial del edificio construido durante la primera. A continuación, se describen las etapas.

La primera etapa se basó en la construcción inicial del edificio volcánico mediante la emisión de productos como lavas andesíticas y andesíticas basálticas, brechas piroclásticas (de caída y flujo) y depósitos laháricos. Las lavas son principalmente del tipo "aa" y Pahoehoe, con espesores que varían entre 1 y 15 m, llegando localmente a 100 m de espesor en el flanco sur, y tienen texturas porfíricas con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno y olivino, inmersos en masas vítreas con distintos grados de vesicularidad y microcristalinidad. Las brechas piroclásticas poseen distintos grados de soldamiento y consolidación, incluyendo algunos niveles de aglomerados de salpicaduras. Los depósitos laháricos se presentan intercalados entre capas de lavas, poseen espesores de 2 a 5 m y corresponden a brechas mono a polimícticas con fragmentos subredondeados a subangulosos que alcanzan 1,5 m de diámetro y se encuentran inmersos en una matriz arenosa sin mayores estructuras. Los depósitos de esta etapa afloran en la parte baja de los flancos del volcán y se ven altamente afectados por erosión glaciar y el colapso del edificio ancestral que generó la Caldera 1 (de unos 6,5 a 4,2 km de diámetro).

Por otro lado, la segunda etapa de construcción del edificio ancestral comenzó de forma posterior a la Caldera 1. Esta etapa inició con la formación de domos exógenos y endógenos superficiales de composición dacítica y la inyección de filones y diques de la misma composición que no superan los 3 m de espesor. Los domos son de pequeño tamaño, con bases subcirculares de 200 m aproximados de diámetro y altura hasta los 80 m, y se observan en el flanco este del volcán, emplazándose cercanos a las fracturas anulares generadas por la formación de la Caldera 1. Se disponen sobre lavas y rocas piroclásticas de la secuencia pre-Caldera 1.

Unidad Villarrica 2 Pleistoceno Superior –Holoceno, 13850–3700 AP
(Modificado de Moreno, 1993; Clavero & Moreno, 2004)

Corresponde a una secuencia de lavas andesítico-basálticas, depósitos piroclásticos (de flujo oleada y caída) de composiciones andesítico-basáltica a dacítica, y depósitos laháricos distribuidos hacia todos los flancos del volcán. Forma el edificio volcánico en el borde noroeste de la Caldera 1, el cual a su vez fue parcialmente truncado por un colapso ocurrido en su cima hace ca. 3.700 AP. Las lavas y depósitos piroclásticos asociados a la Unidad Villarrica 2 se disponen en discordancia de erosión (mayormente por acción glaciaria) sobre depósitos de lava y piroclastos de la Unidad Villarrica 1 y sobre depósitos glaciares de la Glaciación Llanquihue. La base y el techo de esta unidad corresponden a dos depósitos de flujo piroclásticos voluminosos asociados a la historia eruptiva post glaciaria del volcán, denominados Ignimbritas Licán y Pucón, que se describen de forma separada.

Las lavas de esta unidad se distribuyen hacia todos los flancos del volcán, poseen composición andesítico-basáltica y presentan morfologías superficiales primarias tipo Pahoehoe a "aa" generalmente bien conservadas, aunque suavizadas localmente por erosión lahárica y fluvial. Su textura es porfídica, con fenocristales (5-20% vol.) de plagioclasa y olivino principalmente, inmersos en masas fundamentales afaníticas con diferentes grados de vesicularidad y localmente fluidales. Poseen espesores variables entre 1 y 10 m, y extensiones de hasta 18 km, llegando algunas hasta los lagos Villarrica y Calafquén.

La secuencia piroclástica aflora en todos los flancos del volcán, llegando a tener un espesor de 25 m en las zonas que aflora por completo. La secuencia está formada por alrededor de 11 depósitos de flujo y oleada piroclástica, con numerosas intercalaciones de depósitos de caída. Los depósitos de flujo, a excepción de las Ignimbritas Licán y Pucón, poseen volúmenes variables entre 0,1 y 1 km³, y han sido reconocidos hasta a unos 25 km del volcán Villarrica, con extensiones areales de hasta 1000 km² alrededor de este. Se constituyen principalmente de fragmentos juveniles escoriáceos de composición andesítico-basáltica, y algunos niveles presentan fragmentos juveniles pumíceos similares a algunos depósitos de la Unidad Villarrica 1. Los depósitos de oleada cubren áreas más restringidas y se disponen generalmente hacia los flancos norte y este, a menos de 15 km del volcán. Los depósitos de

caída piroclástica se distribuyen hacia el flanco este del volcán y están constituidos por fragmentos juveniles escoriáceos de composición andesítico-basáltica.

Ignimbrita Licán Pleistoceno Superior; 13.850 años AP
(Modificado de Clavero & Moreno, 1994, 2004; Clavero 1996)

Corresponden a extensos depósitos piroclásticos de caída, flujo y oleada, ubicados en todos los flancos del volcán. Fueron originados por un evento de gran magnitud ocurrido hace ca. 13.850 años AP que habría generado un colapso caldérico (Caldera 2) anidado en la caldera más antigua (Caldera 1). Estos depósitos se estiman en un volumen de ca. 10 km³ y cubren una superficie mayor a 100 km². Los afloramientos más distales se encuentran a más de 40 km hacia el oeste y sur del volcán, mientras que los más proximales están ubicados por debajo de los 1.000 m s.n.m.

Se han reconocido por lo menos tres unidades de flujo y diversos niveles asociados a depósitos de oleada piroclástica. La secuencia comienza con un nivel de depósitos de caída escoriáceos que alcanzan un espesor de 15 cm, seguidos de unidades de flujo macizas que contienen bombas de hasta 60 cm de diámetro. En la base se encuentran niveles de depósitos de oleadas piroclásticas.

Ignimbrita Pucón Holoceno tardío; 3.700 años AP
(Modificado de Clavero & Moreno, 1994, 2004; Clavero, 1996)

Corresponde a una serie de depósitos piroclásticos principalmente de flujo y oleada, y en menor proporción de caída. Están ubicados en todos los flancos del volcán debido a un gran evento eruptivo ocurrido hace ca. 3.700 años AP que habría generado el colapso de la parte alta del cono edificado desde los 13.800 años, y generado una caldera de 2 km de diámetro (Caldera 3). El volumen de los depósitos es de ca. 5 km³ y cubren una superficie superior a 500 km². Los afloramientos más distales se encuentran a unos 25 km al noreste del volcán.

El depósito está constituido por una serie de unidades de flujo con regímenes de transporte independiente y que presentan variadas facies. La base del depósito está constituida por un nivel piroclástico de caída de hasta 15 cm de espesor.

Unidad Villarrica 3 Holoceno tardío

(Modificado de Moreno, 1993; Clavero & Moreno, 2004)

Secuencia de lavas de composición basáltica a andesítico basáltica, depósitos piroclásticos de caída, flujo y oleada de la misma composición, y depósitos laháricos distribuidos hacia todos los flancos del volcán. Esta unidad incluye los productos asociados a las erupciones históricas del volcán Villarrica, vale decir, las ocurridas entre 1558 y 1984. Forma la parte más alta del cono actual que posee 450 m de altura y fue construido dentro de la depresión que se generó al colapsar la cima del cono durante la erupción de la Ignimbrita Pucón. Los productos asociados a esta unidad se encuentran rellenando la depresión mencionada, llegando a sobrepasarla, y se distribuyen flancos abajo, cubriendo parcialmente los productos de las Unidades Villarrica 1 y 2, y rocas del basamento. Las lavas prehistóricas de esta unidad suelen estar cubiertas parcial o totalmente por depósitos laháricos.

Los productos de esta unidad se dividen en dos subunidades: Pre-Histórica (erupciones ocurridas desde 3.700 años AP hasta erupciones históricas anteriores al 1787 DC) e Histórica (erupciones históricas ocurridas entre 1787 y 1984 DC). A continuación, se describen las subunidades mencionadas.

(1) Subunidad Pre-Histórica 3.700 años AP - 1787 DC

Las lavas de esta subunidad (Hv3) poseen composición andesítico-basáltica y morfologías Pahoehoe y "aa" bien conservadas. Presentan texturas porfíricas y contenidos variables de fenocristales (correspondientes a plagioclasa, olivino y clinopiroxeno) inmersos en masas fundamentales, ocasionalmente vesiculares, con texturas variables entre afanítica, traquítica e intersertal. Alcanzan extensiones promedio de 12-13 km desde el volcán y máximas de 18 km, mientras que los espesores son variables entre 1 y 15 m.

La secuencia piroclástica alcanza hasta 15 m de espesor y aflora en todos los flancos del volcán. Estos depósitos habitualmente son intercalados con lavas de la misma subunidad. La base de la secuencia comienza con los depósitos de Chaimilla, considerados los más importantes del registro geológico, que alcanzan hasta 1,7 m de espesor. Luego se encuentran

cerca de 6 depósitos piroclásticos de flujo y oleada, intercalados con depósitos piroclásticos de caída y lavas.

(2) Subunidad Histórica 1787 - 1984 DC

Esta subunidad incluye los productos emitidos en las últimas erupciones históricas del volcán Villarrica ente 1787 y 1984 DC. Los productos corresponden a lavas y depósitos piroclásticos de caída que poseen composiciones andesítico-basáltica, y depósitos laháricos.

Las lavas históricas poseen morfologías Pahoehoe y/o “aa” bien desarrolladas y preservadas, con lóbulos frontales y albardones (“levées”). Tienen texturas porfíricas y contenidos variables de fenocristales (correspondientes a plagioclasa, olivino y clinopiroxeno) inmersos en masas fundamentales, ocasionalmente vesiculares, con texturas variables entre afanítica, traquítica e intersertal. Presentan espesores variables entre 1 y 8 m y extensiones máximas de 16,5 km como es el caso de la lava Chaillupén del año 1971.

Los depósitos piroclásticos de caída están distribuidos principalmente hacia el flanco este del edificio volcánico, alcanzando un espesor máximo de 15 cm y constituidos por fragmentos escoriáceos de tamaño ceniza a lapilli grueso.

Los depósitos laháricos están distribuidos en todos los flancos del volcán alcanzando extensiones mayores a 30 km en algunos casos (rio Voipir, 1948) e incluso llegando a los lagos Calafquén y Villarrica. Presentan espesores variables entre algunos centímetros en facies distales y más de 6 m en facies proximales.

Centros volcánicos adventicios Holoceno tardío

Corresponde a dos grupos de conos de piroclastos y lavas andesítico-basálticas denominados Grupo Los Nevados y Grupo Chaillupén. Los conos del Grupo los Nevados están ubicados en el flanco noreste del volcán, al noreste de la Caldera 1. La mayoría están alineados a lo largo de tres estructuras de orientación N60°E. El material piroclástico juvenil y lava tienen composición andesítico-basáltico. Por otro lado, el Grupo Chaillupén corresponde al conjunto

de conos ubicados en el flanco S-SO del volcán que se encuentran alineados en dirección N-S y N35°E. Cubren un área aproximada de 15 km².

Depósitos sedimentarios y volcanoclásticos

Corresponden a depósitos que se encuentran en el área de estudio y se asocian a distintos eventos. A continuación, se describe brevemente cada uno de ellos.

❖ Depósitos de Glaciación Santa María Pleistoceno Medio a Superior

Corresponden a cordones morrénicos, principalmente laterales, ubicados las zonas bajas del flanco oeste del volcán. Se asocian a los avances y retrocesos de los glaciares asociados a la Glaciación Santa María (260–130 ka). Son polimícticos, mal seleccionados, con fragmentos redondeados a subredondeados que alcanzan los 2 m de diámetro y se encuentran inmersos en una matriz fina.

❖ Depósitos de Glaciación Llanquihue Pleistoceno Superior

Corresponden a cordones y arcos morrénicos ubicados en el flanco oeste del volcán Villarrica. Están asociados a los avances y retrocesos glaciares durante la Glaciación Llanquihue. Los depósitos son polimícticos, mal seleccionados, con fragmentos redondeados a subredondeados de hasta 3 m de diámetro que están inmersos en una matriz de tamaño limo. Existe predominio de bloques lávicos y de granitoides. También se incluyen depósitos fluvioglaciares y glaciolacustres ubicados en los alrededores de los lagos Villarrica y Calafquén.

❖ Depósitos Coluviales Holoceno

Corresponden a depósitos de media a mala selección, constituidos por fragmentos angulosos, que alcanzan decenas de centímetros de diámetro, y poseen casi nula matriz fina. Localmente forman conos de deyección que presentan una extensión de algunas centenas de metros.

❖ Depósitos Poligénicos Holoceno

Corresponde a una secuencia de hasta 10 m de espesor que posee superficie aterrizada y se ubica en los valles de los ríos Pucón, Liucura, Trancura y Llancahue–

Pellaifa. Se constituye principalmente de depósitos fluviales y laháricos, con intercalaciones de depósitos de flujo piroclástico y de aluviones. Presentan espesores que no superan los 1,5 m.

❖ Depósitos de remociones en masa Holoceno

Se ubican en los pies de cerros que poseen alta pendiente y presentan morfología superficial de cerrillos. Están constituidos por bloques subangulosos a subredondeados que alcanzan 1 m de diámetro y se encuentran inmersos en una matriz gruesa con mala selección.

❖ Depósitos glaciares recientes Holoceno tardío

Corresponden a morrenas frontales y laterales que poseen escaso volumen y se ubican en la parte alta del edificio volcánico. Están asociados al casquete glaciar reciente del volcán. Cubren parcialmente coladas de lavas correspondientes a las unidades Villarrica 2 y 3. Son depósitos polimícticos de mala selección, formados por bloques subredondeados de hasta 2 m de diámetro inmersos en una matriz fina.

❖ Depósitos de litoral lacustre Holoceno tardío

Depósitos litorales ubicados en las riberas de los lagos Villarrica y Calafquén. Poseen buena selección y están constituidos por fragmentos de origen volcánico, principalmente laháricos, de forma rodondeada a subredondeada y de tamaño arena media a grava.

❖ Depósitos deltaicos Holoceno tardío

Corresponden a depósitos de grano fino, con laminación paralela y, en algunos sectores, cruzada, con espesor variable entre algunos centímetros hasta varias decenas. Se ubican en el extremo este del lago Villarrica y en la desembocadura del río Llancahue en los lagos Calafquén y Pellaifa.

❖ Depósitos aluviales Holoceno tardío

Corresponden a depósitos mal seleccionados con bloques de hasta 1 m de diámetro, inmersos en una matriz de arena fina a media. Se reconocen principalmente

en el valle del río Palguín y su origen se asocia a numerosas obstrucciones que ha sufrido el cauce del río debido a los procesos de remoción en masa que lo han afectado.

❖ Depósitos fluviales Holoceno tardío

Corresponden a depósitos bien seleccionados que presenta capas de algunas decenas de centímetros de espesor. Están conformados por fragmentos redondeados a subredondeados, tamaño grava media a gruesa con intercalaciones tamaño arena media a gruesa. Los depósitos son considerados escasos, pero han sido reconocidos en los cauces de los ríos Liucura, Trancura, Pellaifa y Chesque.

7.2 Marco geológico local del volcán Llaima

La carta geológica de Chile en el apartado “Geología del volcán Llaima” (Naranjo & Moreno, 2005) cubre 1800 km² de área, comprendiendo el edificio volcánico principal, los centros eruptivos adventicios y los productos emitidos en un radio de 30 km desde la cima. A continuación, se presentan las principales unidades formadoras del volcán y geográficamente cercanas a este.

7.2.1 *Basamento del volcán.*

El basamento del volcán Llaima posee tres unidades principales que fluctúan en edades entre el Mioceno y Pleistoceno: Grupo Plutónico Melipeuco del Mioceno, Formación Malleco del Plioceno–Pleistoceno Inferior y Complejo Volcánico Sierra Nevada del Pleistoceno Medio a Superior. Además, hay una zona considerada como una rama del Sistema de Fallas Liquiñe–Ofqui.

Grupo Plutónico Melipeuco Mioceno (Suárez & Emparán, 1997)

Corresponde a rocas graníticas que subyacen con discordancia de erosión a las rocas de la Formación Malleco. Alrededor del volcán Llaima estas rocas se distribuyen como afloramientos discontinuos al norte, oeste y este del volcán, siendo estos dos últimos los más extensos. Las litologías reconocidas de este grupo corresponden a monzogranitos, granodioritas de grano grueso, y en menor cantidad dioritas cuarcíferas de hornblenda.

Formación Malleco Plioceno–Pleistoceno Inferior (Suárez & Emparán, 1997)

Corresponde a una sucesión volcánica continental que sobreyace con discordancia angular a unidades estratificadas de la Formación Cura–Mallín, y de erosión a los granitoides del Grupo Plutónico Melipeuco, además está parcialmente cubierta por el Conjunto de Volcanes de la Cordillera Principal.

La secuencia se distribuye al oeste del volcán y corresponde a una sucesión alternante de lavas andesítico-basálticas a andesíticas con niveles volcanoclásticos. Estos estratos muestran espesores de 5 a 10 m y una inclinación leve hacia el este.

Complejo Volcánico Sierra Nevada Pleistoceno medio a superior

Estructura volcánica compleja formada por un estratovolcán principal extinto y un cordón volcánico fisural de rumbo N65°E, ubicados al NNE del volcán Llaima. Su base se estima de alrededor de 30 km de diámetro, de acuerdo con Suárez & Emparán (1997) su altura es de 2.554 m s.n.m., quienes también estiman que sus materiales cubren con discordancia a rocas estratificadas y plutónicas del Mioceno.

Las laderas glaciadas del flanco occidental del complejo revelan alternancias de 3 a 15 m de espesor de basaltos de olivino y andesitas que poseen formas de coladas de lava macizas y brechozas.

Zona de Falla Liquiñe-Ofqui

Al este del volcán y a lo largo del río Trifultriful está presente una de las ramas de la zona de Falla Liquiñe-Ofqui, siendo la orientación del lineamiento NNE (Hervé, 1976,1984; Hervé et al., 1979). Este rasgo estructural es considerado el principal del basamento y perdura por más de 1000 km de longitud. En la zona existe cizalle dúctil y fallas frágiles con tendencia N-S (López et al., 1995 b).

Según Lavenu & Cembrano (1999), la reactivación pleistocena de esta estructura pudo haber controlado el emplazamiento de edificios volcánicos neógenos tardíos como el volcán Llaima.

7.2.2 Geología del volcán.

7.2.2.1 Estructura y estratigrafía volcánica.

Considerando criterios morfoestructurales, estratigráficos, geoquímicos y litológicos, en el volcán Llaima se ha definido la existencia de dos unidades antiguas (Llaima Ancestral 1 y 2), tres unidades fisurales (Llaima Fisural 1, 2 y 3), las unidades generadas a partir del cono principal (Llaima Cono Principal y lavas históricas) y sucesiones de depósitos piroclásticos (Ignimbrita Curacautín y Secuencia Trifultruful). A continuación, se describen las unidades.

Llaima Ancestral Pleistoceno Medio – Superior

Corresponden a secuencias formadas predominantemente por lavas basálticas a andesíticas macizas, con intercalaciones brechosas e intrusiones de lacolitos. Corresponden a los restos de una estructura volcánica primitiva y más extensa que el actual volcán Llaima.

Los remanentes de esta unidad están distribuidos alrededor del volcán, mostrando sus capas un manto radial y generalmente relieves sobresalientes. La unidad Llaima Ancestral 1 corresponde al nivel más elevado y potente, cuyo espesor máximo alcanza 600 m, mientras que la unidad Llaima Ancestral 2 es el nivel topográficamente más bajo, y tiene un espesor de hasta 300 m. Estas unidades estratificadas se distribuyen principalmente al sur del volcán, mientras que en otros sectores se encuentran escasos afloramientos debido a que se encuentra cubierta de productos volcánicos posteriores.

Las secuencias se encuentran en discordancia sobre granitoides en el sector Los Paraguas–Lago Quepe, por el oeste, y los cerros Pangueco y Negro, por el este. Hacia el noroeste la unidad Llaima Ancestral 1 se adosa y recubre rocas de la Formación Malleco.

De acuerdo con Naranjo & Moreno (2005) las lavas de la unidad Llaima Ancestral 1 poseen edades de entre 68 ± 12 ka y 60 ± 100 ka, lo cual es concordante con la posición morfoestratigráfica de la unidad Llaima Ancestral 2, que se habría emplazado durante el Pleistoceno tardío.

Volcán Peñón Pleistoceno Superior

Es una estructura remanente de chimenea volcánica que se encuentra fuertemente erosionada por la acción glaciaria y que aflora al este del río Trifultruful y a 3,5 km al sureste del lago Verde (al oriente del volcán Llaima). La estructura posee un área de 1 km² que incluye depósitos de bombas escoriáceas que alcanzan 1,5 m de diámetro. Sobresale alrededor de 200 m por encima de granitoides del Complejo Plutónico Melipeuco y se encuentra parcialmente cubierta por escorias de caída acumuladas durante las erupciones históricas del volcán Llaima.

Las rocas corresponden a basaltos levemente porfíricos de olivino y plagioclasa de 51,9 % de SiO₂, ricos en MgO (8,3%) (Naranjo & Moreno, 2005).

Ignimbrita Curacautín Pleistoceno Superior

Depósitos de flujo piroclástico, tipo escoria y ceniza que se encuentran sobre el fondo de los valles radialmente distribuidos alrededor del volcán Llaima. Los depósitos sobreyacen o están lateralmente adosados a lavas de las unidades Llaima Ancestral 1 y 2, y a las unidades del basamento que se encuentran rodeando el volcán. A su vez, la Ignimbrita Curacautín subyace a las lavas de las unidades fisurales y del cono principal, y a la sucesión de depósitos piroclásticos de la Secuencia Trifultruful. Su espesor medio alcanza los 25 m en las facies proximales y disminuye hasta 0.5 m en las zonas más distantes.

Naranjo & Moreno (2005) estiman que la edad de esta unidad varía entre 13460 ± 400 y 12760 ± 130 .

Llaima Fisural 1 Holoceno

Unidad formada por conos piroclásticos de escorias en parte erosionados, y coladas de lava "aa", que se encuentran localmente cubiertos por depósitos morrénicos recientes en el sector Las Paraguas. Al oeste las coladas se emplazan sobre depósitos de la Ignimbrita Curacautín y al noreste del volcán sobre parte de la Secuencia Trifultruful. Además, están cubiertos por las coladas y piroclastos de los centros adventicios de la unidad Llaima Fisural 2.

Los conos de esta unidad se alinean y forman un arco que hacia el norte se curva al oriente y hacia el suroeste del volcán presenta una orientación N45°E. La litología de la unidad corresponde a andesitas basálticas y andesitas (54 y 58,6 % de SiO₂), son rocas de textura porfírica con fenocristales de plagioclasa + clinopiroxeno y olivino (20% vol. total).

No existen dataciones de esta unidad, pero su posición estratigráfica sugiere que se encuentra entre 3440 y 2940 años AP (Naranjo y Moreno, 2005).

Llaima Fisural 2 Holoceno

Representa conos piroclásticos adventicios bien conservados y coladas de lava “aa” asociadas. Se encuentran ubicados sobre el mismo lineamiento en arco que controla la disposición de los conos adventicios de la unidad Llaima Fisural 1.

La composición de las lavas asociadas a esta unidad representa un intervalo restringido entre andesitas basálticas y andesitas (~54,6–56,5% SiO₂), siendo prácticamente la misma composición que la unidad Llaima Fisural 1. Poseen textura afanítica con escasos cristales de plagioclasa en una masa fundamental hialopíltica, con escaso clinopiroxeno y olivino.

Dataciones de los depósitos han revelado que las edades de estos se estiman entre 2940±60 A y 770±70 (Naranjo & Moreno, 2005).

Llaima Fisural 3 Histórico

Corresponde a pequeños conos y cráteres alineados a lo largo de una fisura de 1 km de longitud, orientada en dirección ENE, entre lineamientos paralelos de la unidad Llaima Fisural 1. Se ubican sobre el flanco y pie ENE del volcán Llaima y se sobreponen sobre las unidades Llaima Fisural 1 y 2, y a las lavas y depósitos laháricos provenientes del cono principal del volcán.

Las coladas de lava tienen un espesor de aproximadamente 5 m y una longitud de 6 km volcán abajo. Corresponden a andesitas basálticas de textura porfírica, con fenocristales de plagioclasa, olivino y escaso clinopiroxeno (25 % del volumen total).

Dataciones realizadas a los depósitos indican que estos poseen una edad de 320 ± 50 AP (Naranjo & Moreno, 2005).

Llaima Cono Principal Holoceno–Histórico

Comprende las coladas de lava que conforman gran parte de la estructura cónica del edificio volcánico y que han sido emitidas desde los cráteres de la cima y fisuras radiales en los flancos altos del volcán. Las lavas de esta unidad son del tipo “aa” y se distribuyen radialmente alrededor del volcán, extendiéndose preferentemente hacia el norte, este y sur, siendo escasos los derrames hacia el oeste. Estas lavas destacan por poseer mayor longitud que la mayoría de las lavas del Llaima, alcanzando distancias de hasta 27 km desde el centro de emisión y hasta 10 m de espesor en su frente. Composicionalmente predominan las rocas porfíricas, con fenocristales de olivino, clinopiroxeno y plagioclasa, en diversas proporciones, y corresponden a basaltos y andesitas basálticas.

Diversas dataciones de las coladas de lava de esta unidad permitieron estimar una edad máxima de aproximadamente 2940 AP (Naranjo & Moreno, 2005).

Secuencia Trifultriful Holoceno–Histórico

Corresponde a una sucesión estratificada de depósitos piroclásticos de flujo, caída y oleada, que fueron emitidos en erupciones explosivas del volcán Llaima, ocurridas principalmente del Holoceno. Sobreyace a depósitos de la Ignimbrita Curacautín, rocas plutónicas del basamento y las unidades Llaima Ancestral 1 y 2. Cabe mencionar que sobre la Secuencia Trifultriful se desarrolla el suelo actual, y se encuentra localmente erosionada por flujos aluviales.

Los depósitos de esta secuencia fueron acumulados principalmente hacia el este y sureste del volcán debido a la dispersión producida por los vientos prevaecientes del noroeste y oeste.

Dataciones radiométricas en C^{14} indican que la edad de estos depósitos se encuentra en el intervalo de 10530 ± 100 y 280 ± 60 AP (Naranjo & Moreno, 2005).

Depósitos indiferenciados de caída de escorias Histórico

Corresponde a acumulaciones de caída de piroclastos escoriáceos que afloran en forma de manto aislado al este del volcán. Se estima que posee espesores entre 1 y 2 m e incluye fragmentos escoriáceos de tamaño lapilli y escasas bombas finas. Se reconoce sobre el sector oriental, en los alrededores de las unidades Llaima Fisural 2 y 3, y sobre las rocas del Grupo Plutónico Melipeuco, hasta 12 km al este del volcán.

Los depósitos pudieron ser emitidos a partir de centros de emisión del cono principal como también a partir de conos adventicios. Se infiere que son producto de las principales erupciones históricas del volcán Llaima.

Depósitos morrénicos recientes indiferenciados Holoceno

Corresponden a depósitos glaciares y sedimentos removidos por el escurrimiento de aguas fundidas de los glaciares del volcán. Son acumulaciones de detritos matriz soportados, mal seleccionados y formados principalmente por limos, arenas, bloques y bolones de materiales volcánicos. Los depósitos alcanzan espesores entre 10 y 30 m.

Generalmente estos depósitos se encuentran cubriendo lavas de la unidad Llaima Cono Principal, pero han sido removidos por lahares generados en las erupciones históricas, de forma que solo afloran en el flanco oeste y noreste del volcán.

Depósitos laháricos indiferenciados Histórico

Corresponde a depósitos de flujo de detritos, o consolidados de origen lahárico, pobres en arcillas, con abundantes fragmentos tamaño grava, mal seleccionados y ricos en matriz arenosa. Constituyen los rellenos de superficie plana de casi todos los valles que drenan radialmente el volcán (Quinteros, 1991).

Son principalmente monolitológicos, con baja proporción de fragmentos de rocas del basamento. Se caracterizan por poseer diferentes facies de acumulaciones macizas sin gradación o parcialmente gradadas en forma inversa hasta el tercio inferior y normal hacia

arriba, con fábricas débilmente desarrolladas y los clastos tienden a ser subangulares a angulares. Presentan espesores variables desde decenas de centímetros hasta 5–10 m.

Depósitos aterrazados poligénicos Holoceno tardío–Histórico

Esta unidad está formada por depósitos aluviales de arenas, gravas y limos que constituyen el relleno principal y más extendido de los grandes valles. Se reconocen en el norte, en el valle del río Cautín, y en el sur, en las terrazas elevadas del río Allipén. Las terrazas han sido cubiertas por flujos laháricos y aluviales producidos por la remoción de éstos a causa de las lluvias.

Estos depósitos poseen características intermedias, entre depósitos de flujo de detritos y aluviales. Es posible encontrarlos macizos como también estratificados (hasta 1 m de espesor) que se definen por la alternancia de capas de granulometría gruesa (como gravas y bolones) y arenas limosas.

Depósitos coluviales y abanicos aluviales Holoceno

Los depósitos coluviales corresponden a acumulación de gravas y bloques clastosoportados, mal seleccionados que se generaron a partir del colapso gravitacional de taludes. Al generarse precipitaciones intensas, estos se acumulan como depósitos aluviales que incluyen gravas, arenas y barro. Alrededor del volcán Llaima es posible observar pequeños abanicos en sus faldeos formados principalmente de la remoción de depósitos piroclásticos y morrénicos, ocasionalmente mezclado con taludes del basamento rocoso.

Depósitos fluviales actuales Holoceno

Corresponden a depósitos de gravas, bolones y arenas acumulados en las terrazas de inundación de los lechos de ríos y esteros activos, a veces efímeros, entrecruzados. Poseen carácter polilitológico con predominio de rodados volcánicos, especialmente si provienen de afluentes que drenan depósitos laháricos y piroclásticos del volcán Llaima.

VIII Bibliografía

- Becerril, L., Larrea, P., Salinas, S., Mossoux, S., Ferrés, D., Widom, E., Siebe, C., & Martí, J. (2021). The historical case of Paricutin volcano (Michoacán, México): challenges of simulating lava flows on a gentle slope during a long-lasting eruption. *Natural Hazards*, *107*(1), 809–829.
- Bouvet De Maisonneuve, C. (2011). *Petrologic and numerical modeling study of Strombolian eruption dynamics at Volcán Llaima (Chile)* [University of Geneva].
- Casertano, L. (1964). *Actividad del volcán Villarrica en el curso de este siglo*. Ed. Universitaria.
- Castruccio, A., & Contreras, M. A. (2016). The influence of effusion rate and rheology on lava flow dynamics and morphology: A case study from the 1971 and 1988–1990 eruptions at Villarrica and Lonquimay volcanoes, Southern Andes of Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *327*, 469–483.
- De Maisonneuve, C. B., Dungan, M., Bachmann, O., & Burgisser, A. (2012). Insights into shallow magma storage and crystallization at Volcán Llaima (Andean southern volcanic zone, Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *211*, 76–91.
- Dzierma, Y., & Wehrmann, H. (2010). Eruption time series statistically examined: Probabilities of future eruptions at Villarrica and Llaima Volcanoes, Southern Volcanic Zone, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *193*(1–2), 82–92.
- Farías Lisboa, G. E. (2020). Modelamiento termodinámico del Volcán Llaima asociado a la erupción de 1957.
- Feris Riquelme, G. I. (2018). Erupción del volcán Llaima de 1957: Composición del magma pre-eruptivo a través de inclusiones vítreas.
- Global Volcanism Program, 2013. Villarrica (357120) in *Volcanoes of the World*, v. 4.10.2 (24 Aug 2021). Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. Downloaded 06 Oct 2021 (<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357120>).
- <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>

- Global Volcanism Program, 2013. Llaima (357110) in *Volcanoes of the World*, v. 4.10.2 (24 Aug 2021). Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. Downloaded 06 Oct 2021 (<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357110>).
- <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>
- Granados, H. D., Miranda, P. J., Núñez, G. C., Alzate, B. P., Mothes, P., Roa, H. M., Correa, B. E. C., & Ramos, J. C. (2021). Hazards at ice-clad volcanoes: Phenomena, processes, and examples from Mexico, Colombia, Ecuador, and Chile. In *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 597–639). Elsevier.
- Moreno, H. (1993). Volcán Villarrica, Geología y evaluación del riesgo volcánico, Regiones IX y X, 39 25 S. *Informe Final Proyecto FONDECYT, 1247*, 1–112.
- Moreno, H., & Clavero, J. (2006). Geología del volcán Villarrica, Regiones de La Araucanía y Los Ríos. *Carta geológica de Chile*.
- Mossoux, S., Saey, M., Bartolini, S., Poppe, S., Canters, F., & Kervyn, M. (2016). Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. *Computers & Geosciences*, *97*, 98–109.
- Naranjo, J. A., & Moreno, H. (1991). Actividad explosiva postglacial en el volcán Llaima, Andes del Sur (38° 45'S). *Andean Geology*, *18*(1), 69–80.
- Naranjo, J. A., & Moreno, H. (2005). Geología del volcán Llaima, Región de La Araucanía. *Carta geológica de Chile*.
- Petit-Breuilh, M. E. (2004). La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (siglos XVI al XX): el modelo chileno.
- Pizarro, C., Parada, M. A., Contreras, C., & Morgado, E. (2019). Cryptic magma recharge associated with the most voluminous 20th century eruptions (1921, 1948 and 1971) at Villarrica Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *384*, 48–63.
- POVi. (1996). *Proyecto Volcán Villarrica*. <https://povi.cl/>
- Roperch, P., Chauvin, A., Lara, L. E., & Moreno, H. (2015). Secular variation of the Earth's magnetic field and application to paleomagnetic dating of historical lava flows in Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *242*, 65–78.

Van Daele, M., Moernaut, J., Silversmit, G., Schmidt, S., Fontijn, K., Heirman, K., Vandoorne, W., De Clercq, M., Van Acker, J., & Wolff, C. (2014). The 600 yr eruptive history of Villarrica Volcano (Chile) revealed by annually laminated lake sediments. *Bulletin*, 126(3-4), 481-498.