



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



# EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE INUNDACIÓN POR LAHARES EN LOS VOLCANES CALLAQUI, LLAIMA, LONQUIMAY, MOCHO-CHOSHUENCO, TOLHUACA Y VILLARRICA, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

**Nicolás Gabriel Álvarez Valenzuela**

**Profesor Patrocinante:** Dr. José Luis Palma Lizana

**Profesores Comisión:** Dra. María Verónica Pineda Mascayano

Dr. Jorge Andrés Quezada Flory

Concepción, 2020

*A mi familia*



# ÍNDICE

	Página
<b>RESUMEN</b> .....	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Formulación del Proyecto</b> .....	1
<b>1.2. Ubicación y Accesos</b> .....	4
<b>1.3. Objetivos</b> .....	6
1.3.1. Objetivos Generales.....	6
1.3.2. Objetivos Específicos.....	6
<b>1.4. Metodología de Trabajo</b> .....	6
1.4.1. Etapa Gabinete 1.....	6
1.4.2. Etapa Terreno.....	7
1.4.3. Etapa Gabinete 2.....	7
<b>1.5. Marco Teórico</b> .....	8
1.5.1. Caracterización de los lahares.....	8
1.5.2. Modelamiento de Lahares mediante “LaharZ”.....	13
<b>1.6. Agradecimientos</b> .....	19
<b>2. MARCO GEOLÓGICO Y VOLCANOLÓGICO</b> .....	21
<b>2.1. Volcán Callaqui</b> .....	21
2.1.1. Generalidades.....	21
2.1.2. Rocas del Basamento e Intrusivas.....	21
2.1.3. Rocas y Depósitos Volcánicos.....	22
2.1.4. Actividad Eruptiva Histórica.....	26
<b>2.2. Volcán Llaima</b> .....	27
2.2.1. Generalidades.....	27
2.2.2. Rocas del Basamento e Intrusivas.....	27
2.2.3. Rocas y Depósitos Volcánicos.....	29
2.2.4. Actividad Eruptiva Histórica.....	36
<b>2.3. Volcán Lonquimay</b> .....	45
2.3.1. Generalidades.....	45
2.3.2. Rocas del Basamento e Intrusivas.....	45
2.3.3. Rocas y Depósitos Volcánicos.....	47
2.3.4. Actividad Eruptiva Histórica.....	48
<b>2.4. Volcán Mocho-Choshuenco</b> .....	50
2.4.1. Rocas del Basamento e Intrusivas.....	50
2.4.2. Rocas y Depósitos Volcánicos.....	50
2.4.3. Actividad Eruptiva Histórica.....	54
<b>2.5. Volcán Tolhuaca</b> .....	56
2.5.1. Generalidades.....	56
2.5.2. Rocas del Basamento e Intrusivas.....	56
2.5.3. Rocas y Depósitos Volcánicos.....	56

2.5.4. Actividad Eruptiva Histórica.....	58
2.6. Volcán Villarrica.....	58
2.6.1. Generalidades.....	58
2.6.2. Rocas del Basamento e Intrusivas.....	60
2.6.3. Rocas y Depósitos Volcánicos.....	60
2.6.4. Actividad Eruptiva Histórica.....	62
3. METODOLOGÍAS DE ZONIFICACIÓN DE PELIGROS.....	69
3.1. Subdivisión de cuencas.....	69
3.2. Subdivisión de glaciares en base a cuencas.....	70
3.3. Cálculo de volumen de agua disponible por emisión de un flujo de lava.....	71
3.4. Cálculo de volumen de agua disponible por generación de CDP.....	72
3.5. Cálculo de volumen por fusión de nieve.....	73
3.6. Modelamiento de flujos laháricos generados por emisión de lavas y CDPs.....	74
3.7. Tolerancia de sección transversal en puentes.....	74
3.8. Zonas de peligro por flujos laháricos.....	75
4. ANÁLISIS DE PELIGROS POR LAHARES.....	76
4.1. Volcán Callaqui.....	76
4.1.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares.....	76
4.1.2. Estimación del volumen de lahares.....	78
4.1.3. Modelado de inundación con LaharZ.....	82
4.1.4. Zonas de peligro por flujos laháricos.....	84
4.2. Volcán Llaima.....	86
4.2.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares.....	86
4.2.2. Estimación del volumen de lahares.....	88
4.2.3. Modelado de inundación con LaharZ.....	91
4.2.4. Zonas de peligro por flujos laháricos.....	94
4.3. Volcán Lonquimay.....	96
4.3.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares.....	96
4.3.2. Estimación del volumen de lahares.....	99
4.3.3. Modelado de inundación con LaharZ.....	102
4.3.4. Zonas de peligro por flujos laháricos.....	105
4.4. Volcán Mocho-Choshuenco.....	107
4.4.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares.....	107
4.4.2. Estimación del volumen de lahares.....	108
4.4.3. Modelado de inundación con LaharZ.....	117
4.4.4. Zonas de peligro por flujos laháricos.....	124
4.5. Volcán Tolhuaca.....	126
4.5.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares.....	126
4.5.2. Estimación del volumen de lahares.....	129
4.5.3. Modelado de inundación con LaharZ.....	132
4.5.4. Zonas de peligro por flujos laháricos.....	133



<b>4.6. Volcán Villarrica</b> .....	135
4.6.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares.....	135
4.6.2. Estimación del volumen de lahares.....	137
4.6.3. Modelado de inundación con LaharZ.....	142
4.6.4. Zonas de peligro por flujos laháricos.....	146
<b>5. INTEGRACIÓN DE PELIGROS</b> .....	149
<b>5.1. Introducción</b> .....	149
<b>5.2. Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs</b> .....	149
5.2.1. Volcán Callaqui.....	151
5.2.2. Volcán Llaima.....	152
5.2.3. Volcán Lonquimay.....	153
5.2.4. Volcán Mocho - Choshuenco.....	154
5.2.5. Volcán Tolhuaca.....	155
5.2.6. Volcán Villarrica.....	156
5.2.7. Análisis de las matrices de peligro.....	157
<b>5.3. Categorización e integración global de peligros volcánicos por lahares, lavas y CDPs</b> .....	157
5.3.1. Representación gráfica de la integración y categorización de peligros.....	158
5.3.2. Influencia de lahares en el peligro total y en el desarrollo de mapas de peligro integrados.....	169
<b>6. DISCUSIÓN</b> .....	171
6.1. Elección de la constante en la ecuación del área transversal.....	171
6.2. Limitaciones del software LaharZ.....	174
6.3. Variación estacional de los flujos laháricos e incorporación de nieve al modelo.....	175
6.4. Comparación con otros mapas de peligro, el caso del Volcán Villarrica.....	177
6.5. Comparación de los peligros entre volcanes estudiados.....	185
6.5.1. Definición de escenarios eruptivos y uso de volcanes análogos.....	185
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	187
7.1. Determinación de escenarios eruptivos.....	187
7.2. Cálculo de volúmenes de lahares.....	188
7.3. Modelación numérica con LaharZ.....	188
7.4. Ocurrencia de desbordes en puentes.....	188
7.5. Integración y comparación del peligro volcánico.....	189
<b>8. REFERENCIAS</b> .....	190
<b>ANEXOS</b> .....	200

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. 1. Mapa de ubicación de los volcanes a estudiar .....	5
1. 2. Modelo esquemático de un lahar sometido a dilución aguas abajo desde un flujo de detritos hasta un flujo hiperconcentrado .....	11
1. 3. Representación esquemática de los tipos de facies en lahares que sufrieron dilución y transformación en flujos hiperconcentrados .....	12
1. 4. Flujo de lahar idealizado y relaciones geométricas entre H y L, lo cual describe la extensión de la zona de peligro proximal; además de A y B, las que describen la extensión de la zona de peligro distal de inundación por lahar .....	14
1. 5. Mapa de peligro lahárico construido con la aplicación de LaharZ en la región de Mt. Rainier .....	15
1. 6. Gráficos de puntos de la sección transversal (a) y planimétrica (b) inundada en función del volumen del lahar (V) .....	19
2. 1. Mapa Geológico del Volcán Callaqui .....	22
2. 2. Mapa Geológico del Volcán Llaima .....	28
2. 3. Mapa Geológico del Volcán Lonquimay .....	46
2. 4. Mapa Geológico del Volcán Mocho-Choshuenco .....	51
2. 5. Mapa Geológico del Volcán Tolhuaca .....	57
2. 6. Mapa Geológico del Volcán Villarrica .....	59
2. 7. Mapa de la trayectoria de lahares generados en la erupción de 2015 en el volcán Villarrica .....	68
3. 1. Subdivisión de cuencas en el Volcán Llaima utilizando ArcMap .....	70
3. 2. Subdivisión de glaciares en el volcán Llaima utilizando ArcMap .....	71
4. 1. Red hídrica, subdivisión de cuencas y glaciar del volcán Callaqui .....	79
4. 2. Área cubierta por nieve a ser afectada por una erupción ocurrida en la fisura SW del volcán Callaqui .....	82
4. 3. Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Callaqui, en el caso de lahares generados por lavas con un 20% de detritos .....	83
4. 4. Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Callaqui, en el caso de lahares generados por una erupción fisural .....	84
4. 5. Relación entre escenarios y volúmenes determinados .....	85
4. 6. Zonación del peligro volcánico de lahares en el Volcán Callaqui .....	86
4. 7. Subdivisión de cuencas, glaciares y red hídrica del volcán Llaima .....	89
4. 8. Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Llaima, en el caso de lahares generados por lavas con un 20% de detritos .....	92
4. 9. Relación entre escenarios y volúmenes determinados .....	95
4. 10. Zonación del peligro volcánico de lahares en el volcán Llaima .....	96
4. 11. Red hídrica, subdivisión de cuencas y glaciar del volcán Lonquimay .....	100
4. 12. Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Lonquimay, en el caso de lahares generados por lavas con un 20% de detritos .....	103
4. 13. Vista frontal del Puente Corralco .....	105
4. 14. Relación entre escenarios y volúmenes determinados .....	105
4. 15. Zonación del peligro volcánico de lahares en el volcán Lonquimay .....	106

4.	16.	Red hídrica, subdivisión de cuencas y glaciar del volcán Mocho-Choshuenco .....	108
4.	17.	Detalle de cuencas Punahue 1, 2 y 3 .....	109
4.	18.	Resultados del modelado con LaharZ para lahares que se forman a partir de flujos de lava .....	118
4.	19.	Resultados del modelado con LaharZ para lahares que se forman por flujos de lava, en parte inferior de las cuencas Punahue y Blanco W .....	119
4.	20.	Resultados del modelado con LaharZ para lahares que se forman por acción de corrientes de densidad piroclástica .....	121
4.	21.	Resultados del modelado con LaharZ para lahares que se forman por corrientes de densidad piroclástica, en la parte inferior de las cuencas Blanco W, Punahue y Triful .....	122
4.	22.	Relación entre escenarios y volúmenes determinados .....	124
4.	23.	Zonas de peligro por flujos laháricos en el volcán Mocho-Choshuenco ..	125
4.	24.	Red hídrica, subdivisión de cuencas y glaciar del volcán Tolhuaca .....	129
4.	25.	Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Tolhuaca, en el caso de lahares generados por lavas con un 20% de detritos .....	133
4.	26.	Relación entre escenarios y volúmenes determinados .....	134
4.	27.	Zonación del peligro volcánico de lahares en el Volcán Tolhuaca .....	135
4.	28.	Red hídrica, subdivisión de cuencas y glaciar del volcán Villarrica .....	138
4.	29.	Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Villarrica, en el caso de lahares generados por lavas con un 20% de detritos .....	143
4.	30.	Lugares donde se realizan perfiles transversales (líneas rojas). La ciudad de Pucón se destaca en color naranja .....	144
4.	31.	Perfiles y áreas transversales calculadas .....	145
4.	32.	Resultados de la modelación en detalle con respecto a la ciudad de Pucón .....	146
4.	33.	Relación entre escenarios y volúmenes determinados .....	147
4.	34.	Zonación del peligro volcánico de lahares en el volcán Villarrica .....	148
5.	1.	Matriz de peligros para el volcán Callaqui .....	151
5.	2.	Matriz de peligros para el volcán Llaima .....	152
5.	3.	Matriz de peligros para el volcán Lonquimay .....	153
5.	4.	Matriz de peligros para el volcán Mocho-Choshuenco .....	154
5.	5.	Matriz de peligros para el volcán Tolhuaca .....	155
5.	6.	Matriz de peligros para el volcán Villarrica .....	156
5.	7.	Curva de peligro para el volcán Callaqui.....	159
5.	8.	Curva de peligro para el volcán Llaima .....	160
5.	9.	Curva de peligro para el volcán Lonquimay .....	160
5.	10.	Curva de peligro para el volcán Mocho-Choshuenco .....	161
5.	11.	Curva de peligro para el volcán Tolhuaca .....	161
5.	12.	Curva de peligro para el volcán Villarrica .....	162
5.	13.	Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Callaqui .....	163
5.	14.	Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Llaima .....	164
5.	15.	Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Lonquimay .....	165

5.	16.	Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Mocho-Choshuenco .....	166
5.	17.	Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Tolhuaca .....	167
5.	18.	Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el Volcán Villarrica .....	168
6.	1.	Resultados de la modelación de lahares para el volcán Villarrica con una constante en la ecuación del área transversal de 0.05 .....	172
6.	2.	Resultados de la modelación de lahares para el volcán Villarrica con una constante en la ecuación del área transversal de 0.02 .....	173
6.	3.	Resultados de la modelación de lahares para el volcán Villarrica con una constante en la ecuación del área transversal de 0.013 .....	173
6.	4.	Comparación de los resultados obtenidos en este estudio, en color negro, con la memoria de título de Bono (2014), en color amarillo, azul, rojo y verde .....	179
6.	5.	Comparación de los resultados obtenido en este estudio, en color negro, con la memoria de título de Flores (2014), en colores amarillos y rojizos .....	180
6.	6.	Modelación de lahares con respecto a la ciudad de Pucón, los puntos verdes representan los puntos de inicio de los flujos .....	181
6.	7.	Comparación de los resultados obtenidos en este estudio, en color negro, con el mapa de peligros de Sernageomin, en colores amarillos y rojizos .....	183
6.	8.	Comparación de los resultados obtenidos en este estudio, en color negro, con el estudio del Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas (2015), en colores verdes y azules .....	184

## ÍNDICE DE TABLAS

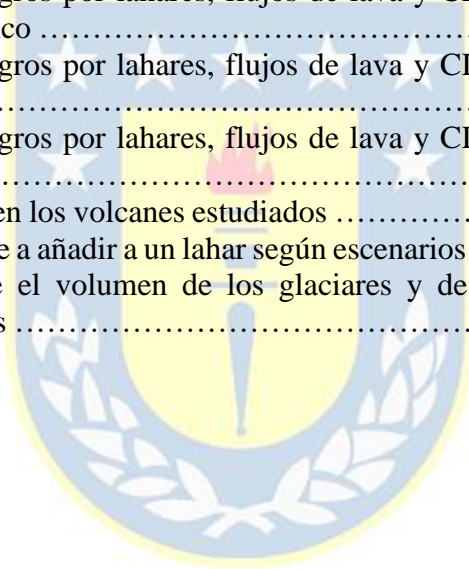
<b>Tabla</b>	<b>Página</b>	
1. 1.	Síntesis de las características de los volcanes estudiados .....	4
2. 1.	Cuadro resumen de la actividad del volcán Callaqui (Extraída de Moreno y Lahsen, 1984) .....	26
2. 2.	Cronología eruptiva documentada del volcán Llaima .....	36
2. 3.	Resumen de la cronología eruptiva histórica del Vn. Lonquimay .....	49
2. 4.	Cronología eruptiva documentada del volcán Villarrica .....	64
4. 1.	Cuadro comparativo entre volcanes Callaqui, Mt. Adams y Tongariro .....	77
4. 2.	Síntesis de las características de los escenarios definidos .....	78
4. 3.	Volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas .....	78
4. 4.	Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Callaqui por lavas ...	80
4. 5.	Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de lava con el glaciar Callaqui .....	80
4. 6.	Volúmenes de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Callaqui .....	81
4. 7.	Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Callaqui .....	81

4.	8.	Volúmenes de nieve calculados en el flanco suroccidental del volcán Callaqui .....	82
4.	9.	Síntesis de las características de los escenarios definidos .....	88
4.	10.	Volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas .....	89
4.	11.	Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Llaima por lavas .....	90
4.	12.	Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de lava con el glaciar Llaima .....	90
4.	13.	Volúmenes de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Llaima .....	91
4.	14.	Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Llaima .....	91
4.	15.	Área transversal de los principales puentes en vías de evacuación .....	93
4.	16.	Evaluación de las áreas transversales que alcanzarían los flujos laháricos	93
4.	17.	Tabla comparativa entre el Vn. Lonquimay y volcanes similares .....	98
4.	18.	Síntesis de las características de los escenarios definidos .....	99
4.	19.	Volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas .....	99
4.	20.	Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Lonquimay por lavas	101
4.	21.	Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de lava con el glaciar Lonquimay .....	101
4.	22.	Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Lonquimay por CDP	102
4.	23.	Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Lonquimay .....	102
4.	24.	Área transversal de los principales puentes en vías de evacuación .....	104
4.	25.	Evaluación de las áreas transversales que alcanzarían los flujos laháricos	104
4.	26.	Volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas (Inventario de Glaciares DGA, 2015) .....	110
4.	27.	Mínimo: espesor de lava igual a 5 m, factor igual a 2, ancho igual a 70 m; Intermedio: espesor de lava igual a 7,5 m, factor igual a 3,5, ancho igual a 135 m; Máximo: espesor de lava igual a 10 m, factor igual a 5, ancho igual a 200 m. Extraído de EULA (2017) .....	111
4.	28.	Volumen de lahares que pueden generarse por emisión de lava supraglacial. Para el 20% de detritos, el factor es: 1,25; Para el 60% de detritos: el factor: 2,5. Extraído de EULA (2017) .....	112
4.	29.	Mínimo: espesor de 2 m y ancho de 10 m; Intermedio: espesor de 3 m y ancho de 55 m; Máximo: espesor de 4 m y ancho de 100 m. Extraído de EULA (2017) .....	113
4.	30.	Volumen de lahares que puede generarse producto del contacto de CDP con el glaciar. Para el 60% de detritos, el factor es: 2,5; Para el 75% de detritos: el factor: 4. Extraído de EULA (2017) .....	113
4.	31.	Datos DGA de caudal medio mensual en m <sup>3</sup> /s. Extraído de EULA (2017)	114
4.	32.	Mínimo: caudal igual a 0,12 m <sup>3</sup> /s y velocidad igual a 5 m/s; Mediana: caudal igual a 26,33 m <sup>3</sup> /s y velocidad igual a 10 m/s; Máximo: caudal igual a 65,65 m <sup>3</sup> /s y velocidad igual a 10 m/s. Extraído de EULA (2017)	115



4.	33.	Mínimo: caudal igual a 2,24 m <sup>3</sup> /s y velocidad igual a 5 m/s; Mediana: caudal igual a 93,52 m <sup>3</sup> /s y velocidad igual a 10 m/s; Máximo: caudal igual a 185,59 m <sup>3</sup> /s y velocidad igual a 10 m/s. Extraído de EULA (2017)	115
4.	34.	Nuevos volúmenes por aporte del caudal del río Fui, bajo escenario de emisión de lavas. Extraído de EULA (2017)	116
4.	35.	Nuevos volúmenes por aporte del caudal del río Fui, bajo escenario de generación de CDP. Extraído de EULA (2017)	116
4.	36.	Mínimo: espesor de lava igual a 5 m, factor igual a 2, ancho igual a 70 m, 20% detritos; Intermedio: espesor de lava igual a 10 m, factor igual a 5, ancho igual a 200 m, 20% detritos; Máximo: espesor de lava igual a 10 m, factor igual a 5, ancho igual a 200 m, 60% detritos. Extraído de EULA (2017)	117
4.	37.	Mínimo: espesor de lava igual a 5 m, factor igual a 2, ancho igual a 70 m, 20% detritos; Intermedio: espesor de lava igual a 10 m, factor igual a 5, ancho igual a 200 m, 20% detritos; Máximo: espesor de lava igual a 10 m, factor igual a 5, ancho igual a 200 m, 60% detritos. Extraído de EULA (2017)	119
4.	38.	Volúmenes generados por CDP. Mínimo: espesor de 2 m y ancho de 10 m, 60% detritos; Intermedio: espesor de 3 m y ancho de 55 m, 75% detritos; Máximo: espesor de 4 m y ancho de 100 m, 75% detritos. Extraído de EULA (2017)	120
4.	39.	Mínimo: espesor de 2 m y ancho de 10 m, 60% detritos; Intermedio: espesor de 3 m y ancho de 55 m, 75% detritos; Máximo: espesor de 4 m y ancho de 100 m, 75% detritos. Extraído de EULA (2017)	121
4.	40.	Área transversal de los principales puentes en vías de evacuación. Extraído de EULA (2017)	123
4.	41.	Evaluación de las áreas transversales que alcanzarían los flujos laháricos	123
4.	42.	Tabla comparativa entre el Vn. Tolhuaca, Mt. Rainier, Mt. Adams y Mt. Shasta	126
4.	43.	Síntesis de las características de los escenarios definidos	128
4.	44.	Área y nolumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas	130
4.	45.	Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Tolhuaca por lavas	130
4.	46.	Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de lava con el glaciar Tolhuaca	131
4.	47.	Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Tolhuaca por CDP	131
4.	48.	Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Tolhuaca	132
4.	49.	Síntesis de las características de los escenarios definidos	137
4.	50.	Volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas	139
4.	51.	Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Villarrica por lavas	140
4.	52.	Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de lava con el glaciar Villarrica	140

4.	53.	Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Villarrica por CDP .	141
4.	54.	Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Villarrica .....	142
4.	55.	Áreas transversales de flujos laháticos y valles aledaños a la ciudad de Pucón .....	145
5.	1.	Matriz de evaluación de peligro volcánico (Modificada de “Estudio de identificación de riesgos en la comuna de Curacautín” (inédito; EULA, 2018) .....	150
5.	2.	Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Callaqui .....	151
5.	3.	Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Llaima .....	152
5.	4.	Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Lonquimay .....	153
5.	5.	Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Mocho – Choshuenco .....	154
5.	6.	Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Tolhuaca .....	155
5.	7.	Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Villarrica .....	156
6.	1.	Volumen de nieve en los volcanes estudiados .....	176
6.	2.	Volúmenes de nieve a añadir a un lahar según escenarios definidos .....	176
6.	3.	Comparación entre el volumen de los glaciares y de la nieve en los volcanes estudiados .....	177



## RESUMEN

El presente trabajo desarrolla una evaluación del peligro de flujos laháricos en los volcanes Callaqui, Llaima, Lonquimay, Mocho-Choshuenco, Tolhuaca y Villarrica, ubicados en las regiones del Biobío, Araucanía y Los Ríos. Los lahares son considerados uno de los peligros volcánicos más destructivos y frecuentes en las erupciones registradas en los volcanes en estudio, dada la cobertura glacial permanente y la nieve que los cubre en las estaciones de invierno y primavera. Sumado a esto, la existencia de centros poblados cercanos a los volcanes, principalmente en los que se ubican en la Región de la Araucanía, hacen necesario realizar este tipo de estudios, para aportar en el desarrollo de la planificación territorial ante emergencias volcánicas.

La metodología empleada para el análisis consta, en primera instancia, de una revisión bibliográfica de los antecedentes geológicos y volcanológicos disponibles, el estudio de la actividad histórica y observaciones sobre las características de los depósitos laháricos y morfología de los valles por los que estos avanzan, para así definir los posibles escenarios eruptivos y las condiciones de generación de lahares en los diferentes volcanes. Luego, para obtener las zonas de inundación, se utilizó la herramienta “LaharZ”, la cual utiliza una modelación numérica basada en una correlación empírica entre el volumen de un evento lahárico y las áreas inundadas en secciones planimétricas y transversales (Iverson *et al.*, 1988; Schilling, 1988).

Los resultados obtenidos dan cuenta de la gran capacidad que tienen las erupciones de desarrollar lahares en los volcanes estudiados, aún bajo condiciones eruptivas de baja explosividad, además del poco volumen de flujo necesario para cubrir grandes extensiones. En muchos casos hay asentamientos humanos ubicados en las zonas de inundación, como es el caso de los poblados de Melipeuco y Cherquenco, en las cercanías del Volcán Llaima. En el caso de los volcanes que presentan menor actividad histórica, el análisis del comportamiento de los flujos se vuelve menos confiable, debido a la poca información disponible sobre el tipo de erupciones que estos puedan presentar, y las características y condiciones de generación de lahares.

Finalmente, se realiza una integración semi – cuantitativa de los peligros en los volcanes en estudio, la cual depende de la recurrencia, alcance y potencial de impacto de cada peligro, en los distintos escenarios eruptivos probables. De esta forma, se confeccionan mapas integrados semi – cuantitativos para cada volcán, identificando diferentes zonas con distinto grado de peligro, para así contribuir a la generación y mejoramiento de planes de emergencias en caso de erupción en alguno de los volcanes en estudio.

Los resultados de esta integración muestran que los volcanes con mayor peligro son, en orden decreciente, Mocho-Choshuenco, Villarrica, Llaima y Lonquimay. Las zonas pobladas más propensas a ser afectadas por lahares son: Melipeuco y Cherquenco (Volcán Llaima); Malalcahuello y Manzanar (Volcán Lonquimay); Pucón y Coñaripe (Volcán Villarrica).



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Formulación del Proyecto

Chile posee ~90 volcanes activos a lo largo de su territorio (Sernageomin, 2015), los cuales han generado una amplia actividad eruptiva que ha afectado a los asentamientos humanos que se encuentran en las cercanías de estos. En las regiones del Biobío, Araucanía y Los Ríos, destacan la presencia de volcanes cercanos a zonas pobladas, tales como el Callaqui, Llaima, Lonquimay, Mocho-Choshuenco, Tolhuaca y Villarrica. Dentro de estos, el volcán Villarrica ocupa el primer lugar en el ranking de los volcanes más activos de Chile, el volcán Llaima el segundo puesto, y el volcán Lonquimay el octavo lugar (Sernageomin, 2015), por lo que conocer el posible comportamiento de sus productos eruptivos cobra una gran relevancia en cuanto a la planificación territorial, determinación de zonas de seguridad y vías de evacuación, ante posibles procesos eruptivos.

El término “lahar” consiste en una masa compuesta por agua y sedimentos en proporciones similares, que bajan por altas pendientes incorporando otros detritos en su avance (Vallance y Iverson, 2015). Moreno y Naranjo (2003) indican que flujos laháricos del Volcán Llaima han llegado a tan solo 4 km de la capital comunal (Curacautín), en diferentes eventos eruptivos, cortando vías de acceso y de evacuación.

El Volcán Callaqui (Tabla 1.1) es un estratovolcán activo desde el Pleistoceno medio (Naranjo *et al.*, 1999 en Polanco y Naranjo, 2008). Ha presentado, al menos, 5 erupciones en los últimos 260 años (Simkin y Siebert, 1994; Petit-Breuilh, 2004), donde la actividad explosiva más reciente fue una pequeña erupción freática en 1980, mientras que en enero de 2009 emanó una pequeña pluma de ceniza sobre este (GVP, 2013). Sólo se ha reportado una avalancha de hielo en su actividad entre 1966 – 1978 (Moreno *et al.*, 1984). Actualmente presenta persistente actividad fumarólica y un glaciar de ~11 km<sup>2</sup> en su cima (Polanco y Naranjo, 2008), lo cual sumado a la cobertura de nieve que posee en invierno, lo hace propenso a generar flujos laháricos. Se ubica en el lugar 48 en el ranking de peligrosidad volcánica de Chile (Sernageomin, 2015).

El Volcán Llaima (Tabla 1.1) consiste en un edificio volcánico mixto compuesto por un estratovolcán erigido sobre un volcán escudo. Este cuenta con más de 50 erupciones registradas desde el año 1640, de las cuales aproximadamente 10 fueron acompañadas por lahares (Naranjo y

Moreno, 2005), lo cual lo convierte en uno de los volcanes más activos de Sudamérica, y el segundo en el ranking de peligrosidad volcánica en Chile (Sernageomin, 2015). Las últimas 5 erupciones acompañadas de lahares fueron en 1956, 1957, 1979, 1994 y 2007 – 2009, y se emplazan, principalmente, en los valles de los ríos Captrén, Lanlán, Calbuco y Trifultruful (Dzierma y Wehrmann, 2010; Moreno y Naranjo, 2003).

El Volcán Lonquimay (Tabla 1.1) corresponde a un estratovolcán activo de edad Pleistocena Superior – Holocena (Moreno y Gardeweg, 1989). Su actividad eruptiva ha sido efusiva a explosiva, de tipo estromboliano a pliniano con índices de explosividad volcánica probable de 2 – 4 (Moreno y Gardeweg, 1989). Históricamente, se han registrado 5 erupciones en los últimos dos siglos, destacando la última erupción entre los años 1988 y 1989 (Moreno y Gardeweg, 1989). Existe escasa evidencia sobre la generación de lahares, salvo en el flanco N y NE del edificio, con depósitos de pequeña envergadura asociadas a coladas de lava (Polanco, 2000). Sin embargo, existe una cubierta glaciaria permanente y nieve estacional durante invierno y primavera, lo que propiciaría la formación de lahares. En el ranking de peligrosidad volcánica elaborado por Sernageomin (2015) ocupa el lugar 8.

El Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco (CVMCH; Tabla 1.1) está integrado por un estratovolcán ancestral (Mocho) y un edificio adyacente (Choshuenco), en donde sólo el primero se considera activo. El CVMCH registra 5 erupciones históricas: la primera en 1759 y la última, y más violenta, en 1864 (Moreno y Lara, 2007). Estas han sido de tipo estrombolianas a subplinianas, con registro de la generación de flujos piroclásticos (Petit-Breuilh, 2004). Por otra parte, la presencia de hielo en la caldera y un extenso manto de nieve que cubre el volcán por sobre la cota 1000 m en temporada invernal, constituye una fuente para la generación de lahares, en caso de que flujos piroclásticos o lavas provoquen una rápida descarga de agua (Moreno y Lara, 2007). Evidencia de lo anterior es el evento eruptivo de 1864, la cual es la principal erupción histórica registrada en este volcán, donde han sido reconocidos depósitos de origen lahárico asociados a esta erupción en los sectores de Enco, Río Enco y Estero Punahue (Moreno y Lara, 2007). En el ranking de peligrosidad volcánica elaborado por Sernageomin (2015) ocupa el lugar 18.

El Volcán Tolhuaca (Tabla 1.1) es un estratovolcán cuya actividad explosiva holocena está representada por, a lo menos, tres depósitos piroclásticos de edades entre 7750 y 6590 A.P. (Polanco, 1998; Polanco *et al.*, 2000). Actualmente, la única anomalía que ha presentado ha sido

actividad fumarólica débil en la cima (Polanco *et al.*, 2000). El volcán posee un área de  $\sim 3.6 \text{ km}^2$  cubierta de glaciares (MYMA, 2012), lo cual sumado a la nieve que lo cubre en temporada invernal, lo hace propenso a generar lahares en caso de erupción. Se ubica en el lugar 32 del ranking de peligrosidad volcánica de Chile (Sernageomin, 2015).

El Volcán Villarrica (Tabla 1.1) es un complejo volcánico que se eleva 2847 m s.n.m. El registro histórico señala alrededor de 60 erupciones documentadas, siendo la última de estas el año 2015, convirtiéndolo en el volcán más activo de los Andes (Moreno y Clavero, 2006; Sernageomin, 2017) y ocupando el primer lugar en el ranking de peligrosidad volcánica de Chile (Sernageomin, 2015). La generación de lahares en este volcán es frecuente, siendo reportados en las erupciones de 1904, 1948, 1963-64, 1971 y 2015 (Petit-Breuilh y Lobato, 1994; Bertin *et al.*, 2015).

El presente trabajo busca determinar y evaluar el peligro de inundación por lahares en los 6 volcanes antes mencionados, mediante la modelación numérica de los posibles flujos laháricos provenientes de estos, bajo distintas condiciones eruptivas, utilizando el *software* “LaharZ” y el análisis geológico y volcanológico de la actividad de estos. “LaharZ” es un programa que permite delimitar de manera “rápida, reproducible y objetiva” las zonas de inundación por lahares que se originan en un volcán (Iverson *et al.*, 1998). El programa está basado en una correlación empírica entre el volumen de un evento lahárico y las áreas inundadas en secciones planimétrica y transversal. Para su funcionamiento, requiere de un modelo digital de elevación (DEM) y los volúmenes de los lahares, previamente definidos, para delimitar zonas potenciales de inundación, de manera automatizada y rápida. De esta manera es posible elaborar mapas de inundación por lahares para el área de interés (Iverson *et al.*, 1998; Schilling, 1998). Los resultados esperados están enfocados a ser un aporte para la planificación ante emergencias volcánicas, para así evitar catástrofes mayores en eventos eruptivos.

Actualmente, los mapas de peligros oficiales en Chile no permiten evaluar el comportamiento de todos los productos eruptivos de un volcán en conjunto ni comparar la peligrosidad entre volcanes, debido a que no utilizan una metodología común que los integre. Por esto, mediante una metodología novedosa ya utilizada en los peligros de lavas y CDPs (Jorquera, 2019) se busca integrar la zonificación de todos los peligros y realizar una evaluación cuantitativa del nivel de peligro, a través de la asignación de puntajes definidos según criterios de recurrencia, alcance y

potencial de impacto por tipo de peligro, lo cual sí permite la comparación de peligros del mismo volcán y entre volcanes.

Tabla 1.1 Síntesis de las características de los volcanes estudiados.

Volcán	Ranking de Peligrosidad	Altura (m s.n.m.)	Lahares históricos	Cubierta glacial
Callaqui	48	3164	Si	Si
Llaima	2	3125	Si	Si
Lonquimay	8	2865	Si	Si
Mocho-Choshuenco	18	2422	Si	Si
Tolhuaca	32	2806	No	Si
Villarrica	1	2847	Si	Si

## 1.2. Ubicación y Accesos:

Los volcanes estudiados se ubican en las regiones del Biobío (Callaqui), Araucanía (Llaima, Lonquimay, Tolhuaca y Villarrica) y Los Ríos (Mocho-Choshuenco), Chile. En el área comprendida entre las latitudes 37°55'S y 39°55'S (Figura 1.1).

El acceso terrestre al volcán Callaqui se realiza desde la Ruta 5 Sur a través de las ciudades de Los Ángeles y Mulchén, las cuales están conectadas por caminos pavimentados con la ciudad de Santa Bárbara. Desde esta última se puede acceder al volcán por medio de un camino pavimentado hasta cierto punto, donde se vuelve de ripio.

El acceso terrestre a los volcanes Llaima, Lonquimay y Tolhuaca se realiza desde la Ruta 5 Sur a través de las ciudades de Victoria por el NW, mientras que por el SW por las ciudades de Lautaro y Vilcún. Las cuáles están conectadas por caminos pavimentados con la ciudad de Curacautín. Desde esta última se puede acceder a estos volcanes por medio de caminos pavimentados o en ocasiones de ripio, los que se encuentran en buen estado por lo general. Dentro del área de los volcanes existen numerosos caminos pavimentados y de ripio.

El acceso terrestre al volcán Villarrica se realiza desde la Ruta 5 Sur, donde luego se accede a una carretera pavimentada y asfaltada entre las localidades de Freire y Villarrica. Otro camino asfaltado une las localidades de Loncoche y Villarrica. Desde Villarrica se debe ir en dirección a Pucón y tomar el camino que guía al Centro de Skí Pucón, el cual es un camino pavimentado hasta la entrada del Parque Nacional Villarrica, donde se torna de ripio. Existen numerosos caminos de ripio por los que se puede circular en el área del volcán.

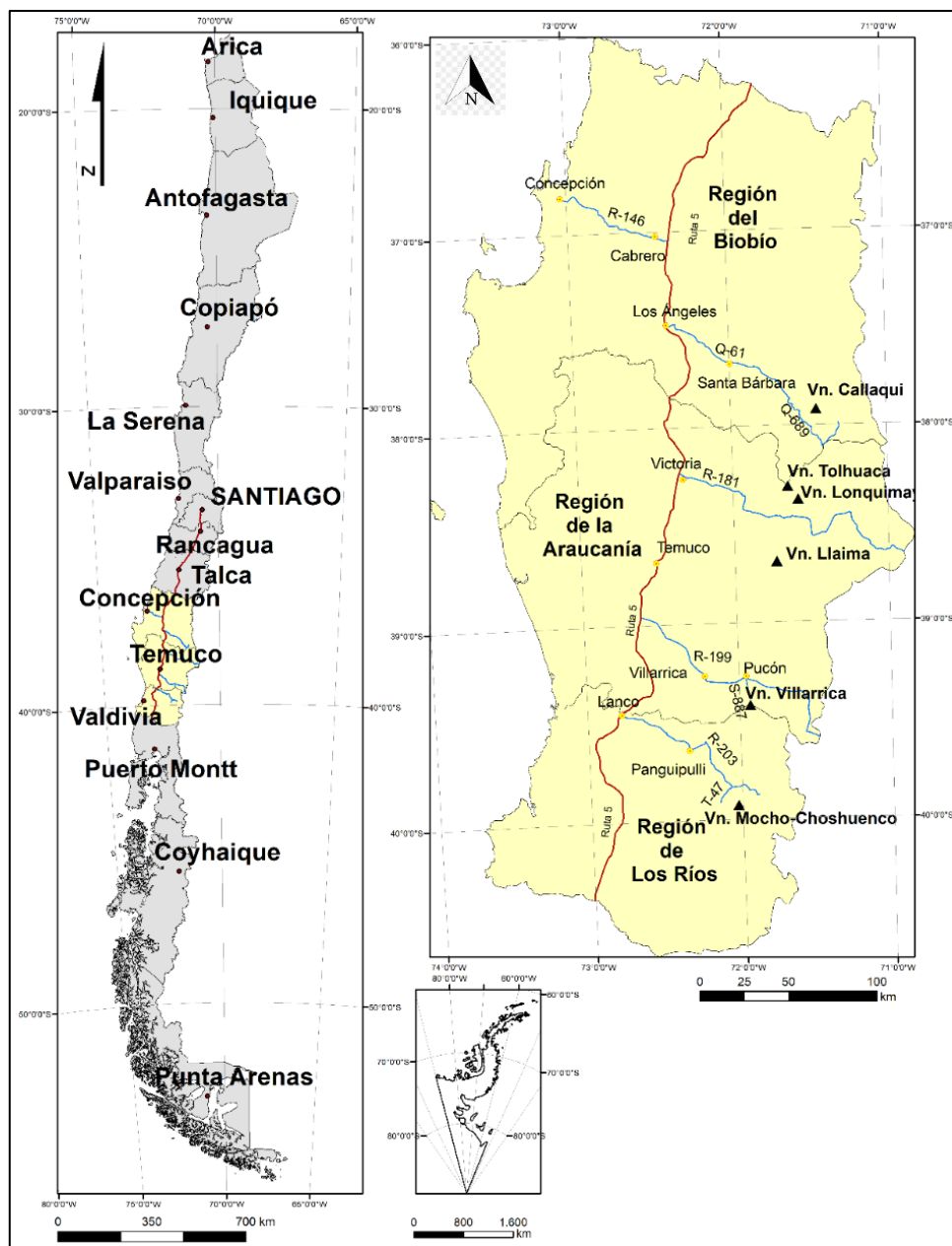


Figura 1.1 Mapa de ubicación de los volcanes a estudiar.

El acceso terrestre al volcán Mocho-Choshuenco se realiza a través de dos caminos de ripio: uno por el sector oeste que accede al Refugio de la Universidad Austral de Valdivia y otro por el flanco nororiental dentro de la Reserva Huilo - Huilo. Para acceder a estos caminos se debe utilizar la Ruta 5 Sur hasta la ciudad de Lanco, donde luego se procede hasta la localidad de Panguipulli, en un camino pavimentado. Luego de esto se debe tomar el camino que va en dirección a Neltume – Puerto Fuy, y acceder en las rutas antes mencionadas.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivos Generales:

1. Evaluar y comparar el peligro de inundación por lahares en los volcanes Callaqui, Llaima, Lonquimay, Mocho-Choshuenco, Tolhuaca y Villarrica, mediante el análisis de escenarios eruptivos y modelación numérica.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

1. Determinar los posibles escenarios eruptivos que pueda desarrollar cada uno de los volcanes estudiados.
2. Identificar las cuencas hidrográficas que correspondan a los valles de las laderas de los volcanes, por donde pueden bajar lahares, y el área glaciaria que las alimentan.
3. Obtener una estimación de los volúmenes de agua mínimos, intermedios y máximos generados por el derretimiento de nieve y hielo causado por flujos de lava o corrientes de densidad piroclástica, con base en el registro geológico y observaciones de la actividad histórica de los volcanes.
4. Determinar las zonas de inundación según distintos escenarios eruptivos y modelación numérica (LAHARZ).
5. Identificar si pueden ocurrir desbordes en puentes o cortes en las vías de evacuación en cada volcán, debido a la acción de flujos laháricos.
6. Comparar las zonas de peligro por flujos laháricos entre cada volcán, en pos de desarrollar metodologías para la evaluación de este peligro.

### 1.4. Metodología de Trabajo

Para el desarrollo se pueden determinar las siguientes etapas de trabajo:

#### 1.4.1. Etapa Gabinete 1

- Revisar la bibliografía de los antecedentes geológicos y volcanológicos de los volcanes Callaqui, Llaima, Lonquimay, Mocho-Choshuenco, Tolhuaca y Villarrica, además de los flujos y depósitos laháricos que estos han generado.



- Identificar las cuencas hidrográficas de los volcanes mediante el análisis computacional de Modelos de Elevación Digital (DEM) en el software ArcMap.
- Definir los escenarios eruptivos probables y extremos para los 3 volcanes, además de los volúmenes de flujos laháricos esperados en cada uno de estos.
- Revisar las imágenes satelitales y modelos de elevación digital para la planificación previa del terreno.
- Realizar una modelación numérica previa de las posibles áreas de inundación para estos volcanes, utilizando el *software* “LaharZ”, con la información disponible, con el objetivo de determinar los parámetros a calibrar, y el posible comportamiento de flujos laháricos.

#### 1.4.2. Etapa Terreno

- Desarrollar una campaña de terreno en los diferentes volcanes dentro del área de estudio, con el fin de recabar información importante, como evidencias de flujos laháricos pasados, dimensiones de valles por donde pueden bajar lahares, intersecciones de estos valles con vías de evacuación (caminos, puentes, etc.), mediciones de secciones transversales en puentes para evaluar posibles desbordes, entre otras, con el objetivo de establecer zonas de inundación y comprobar los modelamientos realizados, para de esta forma ajustar de mejor manera el modelo, y así obtener resultados más verídicos.

#### 1.4.3. Etapa Gabinete 2

- Definir los parámetros a utilizar y calibración del modelo LAHARZ para su aplicación.
- Modelar los flujos laháricos definitivos para cada volcán, para así tener una primera aproximación a la zonificación del peligro de lahares para estos.
- Calcular las áreas transversales presentes en puentes y puntos críticos para evaluar la posibilidad de desbordamiento de flujos laháricos hacia otros cauces.
- Integrar la información obtenida en la Etapa de Terreno con la modelación numérica realizada en “LaharZ”, con el objetivo de obtener una zonificación verídica del peligro de inundación por flujos laháricos en los distintos volcanes del área de estudio.
- Generar mapas de peligro de lahares en los volcanes estudiados.

- Analizar los resultados obtenidos y compararlos entre los distintos volcanes y peligros.

## 1.5. Marco Teórico

### 1.5.1 Caracterización de los lahares

Los lahares se producen durante erupciones volcánicas, u otros procesos que ocurren en las inmediaciones de volcanes, cuando grandes masas de agua mezcladas con sedimentos se desplazan aguas abajo por la pendiente de un volcán, las que comúnmente incorporan agua y sedimentos adicionales. Los fragmentos de roca contenidos en los lahares los hacen especialmente destructivos; el abundante líquido contenido en estos les permite fluir sobre pendientes suaves e inundar áreas lejanas a su origen. Pueden comprender uno o más tipos de flujos, los que incluyen ‘flujos de detritos’ y ‘flujos hiperconcentrados’ o ‘transicionales’. Las transiciones entre los tipos de flujos son definidos en base a la fracción de sólidos que poseen; sin embargo, estas transiciones son gradacionales y dependen de otros factores, como el tamaño de los sedimentos, mineralogía de arcillas, agitación de las partículas y la energía del flujo (Vallance e Iverson, 2015).

Smith y Fritz (1989) los definen como flujos rápidos conducidos por gravedad, que se componen de una mezcla de fragmentos de roca y agua desde un volcán; mientras que Vallance (2000) se refiere al término lahar como flujos gravitacionales que ocurren durante erupciones volcánicas, o menos predeciblemente, debido a otros procesos comunes en terrenos volcánicos empinados, como lluvias intensas o movimientos sísmicos, en donde grandes masas de sedimentos, principalmente volcánicos, y agua, descienden a través de las laderas del volcán. Los grandes fragmentos de roca acarreados por los lahares, así como también el abundante contenido de agua que ellos poseen, que les permite inundar grandes extensiones de terrenos alejados a la fuente y de pendientes más suaves, hacen de éstos un fenómeno altamente destructivo (Vallance, 2000).

#### 1.5.1.1. Génesis

Los lahares pueden ser primarios (sin-eruptivos) o secundarios (post-eruptivos o no relacionados a erupciones). La génesis de estos flujos requiere (1) una fuente de agua adecuada; (2) detritos no consolidados abundantes, como depósitos de flujos piroclásticos y de ceniza, derrubios glaciares, coluvios y suelo; (3) pendientes pronunciadas (comúnmente  $> 25^\circ$ ) y un alto relieve en la fuente de sedimentos; y (4) un mecanismo de generación. Las fuentes de agua provienen de origen



hidrotermal, la rápida fusión de hielo y nieve, agua subglacial atrapada, agua contenida en cráteres u otros lagos, y agua de lluvia (Vallance e Iverson, 2015).

Los lahares causados por la liberación súbita de grandes cantidades de agua pueden ocurrir por 4 mecanismos según Vallance e Iverson (2015):

- a) Avalanchas de roca caliente, flujos piroclásticos, y oleadas mezcladas con hielo y nieve derretida súbitamente. El flujo avanza sobre el hielo o la nieve, incorporándola continuamente para formar lahares que usualmente contienen lodos de hielo o nieve. A medida que se mueven aguas abajo, estos pueden continuar incorporando detritos volcánicos, material glacial, aluvios y coluvios por lo que se transforman tempranamente en flujos de detritos.
- b) Las erupciones volcánicas pueden desplazar grandes cantidades de agua proveniente de lagos ubicados en los cráteres de un volcán, formando lahares corrientes abajo. Este tipo de lagos pueden colapsar incluso meses después de una erupción, cuando los niveles de agua suben a un punto crítico.
- c) Erupciones subglaciales pueden formar lagos subglaciales que eventualmente colapsan cuando una sección de la capa de hielo comienza a derretirse o se fractura, lo cual libera el agua contenida. Grandes masas de agua desde un glaciar pueden ser liberadas por una erupción, generando inundaciones con alta carga de sedimentos llamas “jökulhlaups”.
- d) Lluvias intensas posteriores a erupciones pueden movilizar los depósitos recientes, generando pequeños lahares. El tamaño y frecuencia de este fenómeno puede incrementar en los meses o años posteriores a una erupción, luego esta posibilidad disminuye exponencialmente a medida que las redes de drenaje y la vegetación se restablecen.

### 1.5.1.2. Tipos

#### 1.5.1.2.1. Flujos de detritos

Los flujos de detritos son una mezcla saturada de detritos, que tienen una gran carga de sedimentos y se mueven pendiente abajo por la influencia de la gravedad (Pierson y Costa, 1987). Una de las principales características de este tipo de flujo es que presentan una mezcla uniforme a lo largo de un perfil vertical, lo cual los distingue de los flujos hiperconcentrados, y poseen más de un 50-60% de sedimentos (Vallance, 2000).

El movimiento de este tipo de flujo es manejado por las fuerzas de inercia que inducen la fricción y colisión entre granos, y la viscosidad del fluido (Iverson, 1997). Los sedimentos son soportados dentro del flujo por la fuerza de la matriz, flotabilidad y la presión de dispersión entre los granos (Lowe, 1979; Smith, 1986).

Los flujos de detritos se separan en dos grupos: los cohesivos (> 5% de arcillas en la matriz) y los no cohesivos (< 5% de arcillas en la matriz). Los flujos de detritos cohesivos tienden a permanecer como flujos de detritos a lo largo de todo el curso; usualmente estos se forman por el colapso de un sector del edificio volcánico, lo cual es generado por la alteración hidrotermal de una parte de este, o un deslizamiento. Los flujos de detritos no cohesivos generalmente se forman cuando un flujo de oleada erosiona e incorpora los sedimentos. Los flujos de detritos no cohesivos comúnmente se transforman corriente abajo, progresando de una etapa de flujo hiperconcentrado a un flujo cargado de sedimentos a medida que se mezclan con el agua del cauce en su camino (Pierson y Scott, 1985; Scott et al., 1995).

#### 1.5.1.2.2. Flujos Hiperconcentrados

Los flujos hiperconcentrados son conducidos por la gravedad y corresponden a la mezcla no uniforme de detritos y agua, los cuales tienen un mayor contenido de agua que un flujo de detritos y una carga sólida que fluctúa entre un 20% a un 50-60%. Este tipo de flujos posee características de flujos fluviales, sin embargo, transporta una alta carga de sedimentos (Vallance, 2000).

Los flujos hiperconcentrados han sido definidos por varias características. Smith (1986) definió un flujo hiperconcentrado de inundación basado en las características de sus depósitos, e infirió que en este tipo de flujo los sedimentos son soportados por fuerzas de dispersión entre granos, turbulencia y flotabilidad. Generalmente, la estratificación o algún otro tipo de depósito masivo característico de este tipo de flujo, se emplaza por medio de la sedimentación grano por grano y tracción en la base del flujo (Smith, 1986; Smith y Lowe, 1991).

#### 1.5.1.2.3 Transporte y emplazamiento

Debido a los procesos de erosión, incorporación, dilución, transformación y emplazamiento, los lahares sufren transformaciones a medida que descienden por el volcán, lo cual determina como es su transporte y depositación (Figura 1.2; Vallance, 2000).

Una vez que el lahar sale de la pendiente del volcán comienza a encausarse en valles de ríos que contienen volúmenes importantes de agua. Estos, que comúnmente se mueven más rápido que los ríos comunes, empujan el agua y gradualmente comienzan a mezclarse con ella. A medida que el flujo se carga en agua pierde la capacidad de transportar grandes partículas, las que van quedando atrás del frente del flujo. Con el tiempo el frente diluido del lahar avanza a la zona media y eventualmente todo el flujo se vuelve más diluido (Figura 1.3.; Vallance e Iverson, 2015).

Los lahares causan erosión a medida que avanzan por sus cauces, debido al socavamiento que estos generan. La erosión es mayor en pendientes elevadas y menor en pendientes más moderadas o que posean una roca subyacente más resistente. En general, los flujos hiperconcentrados son más erosivos que los flujos de detritos (Figura 1.2), pero la erosión local ocurre independiente del tipo de flujo. Las etapas iniciales del lahar coinciden con una erosión mayor y abultamiento, mientras que las fases finales son menos erosivas y comúnmente ocurre erosión en los depósitos frescos de lahar a medida que el flujo se vuelve más rico en agua (Vallance e Iverson, 2015).

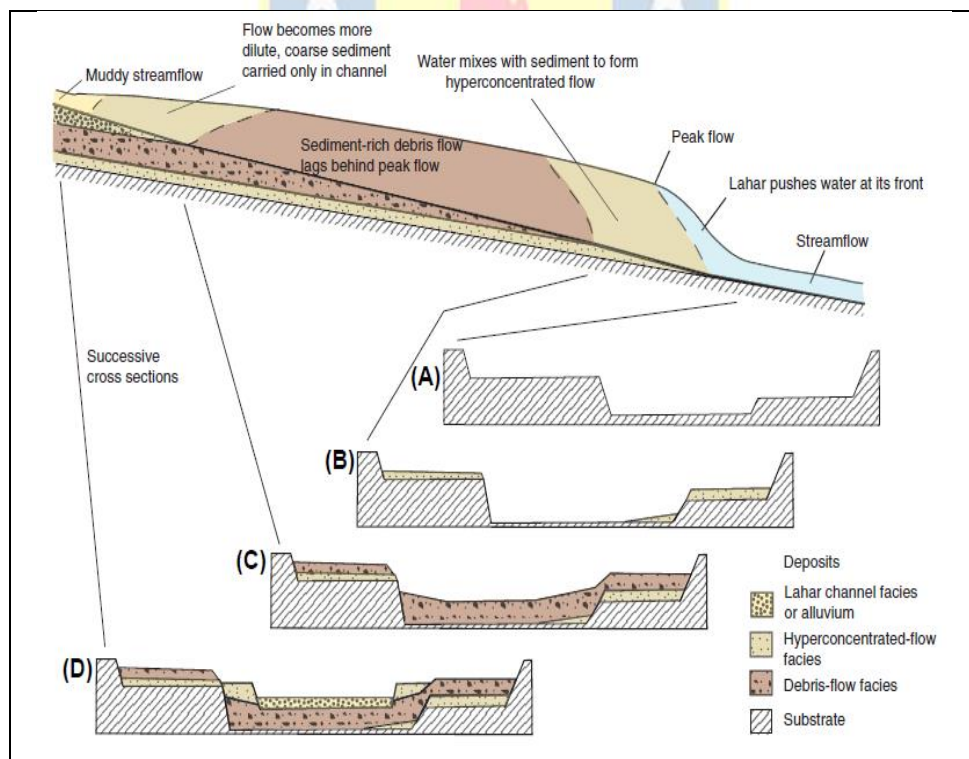


Figura 1.2 Modelo esquemático de un lahar sometido a dilución aguas abajo desde un flujo de detritos hasta un flujo hiperconcentrado. El modelo muestra las secuencias esperadas de los depósitos de estos flujos (A – D). Extraído de Vallance e Iverson (2015).

### 1.5.1.3. Depósitos

Vallance e Iverson (2015) indican que los depósitos de flujos de detritos e hiperconcentrados presentan una agradación progresiva, lo cual se evidencia claramente en la estratificación de los depósitos transicionales o hiperconcentrados. Incluso en grandes depósitos laháricos es posible encontrar evidencia sólida de agradación progresiva.

Los depósitos formados por flujos de detritos son masivos y muy mal seleccionados a extremadamente mal seleccionados. La distribución de granos frecuentemente es bimodal y pueden poseer gradación normal o inversa. Son extremadamente compactos y sus partículas son generalmente heterolitológicas, aunque también pueden ser monolitológicas, estas pueden ser redondeadas a angulosas, pero usualmente son subangulosas a angulosas. Su espesor varía de decenas de centímetros a decenas de metros (Vallance e Iverson, 2015).

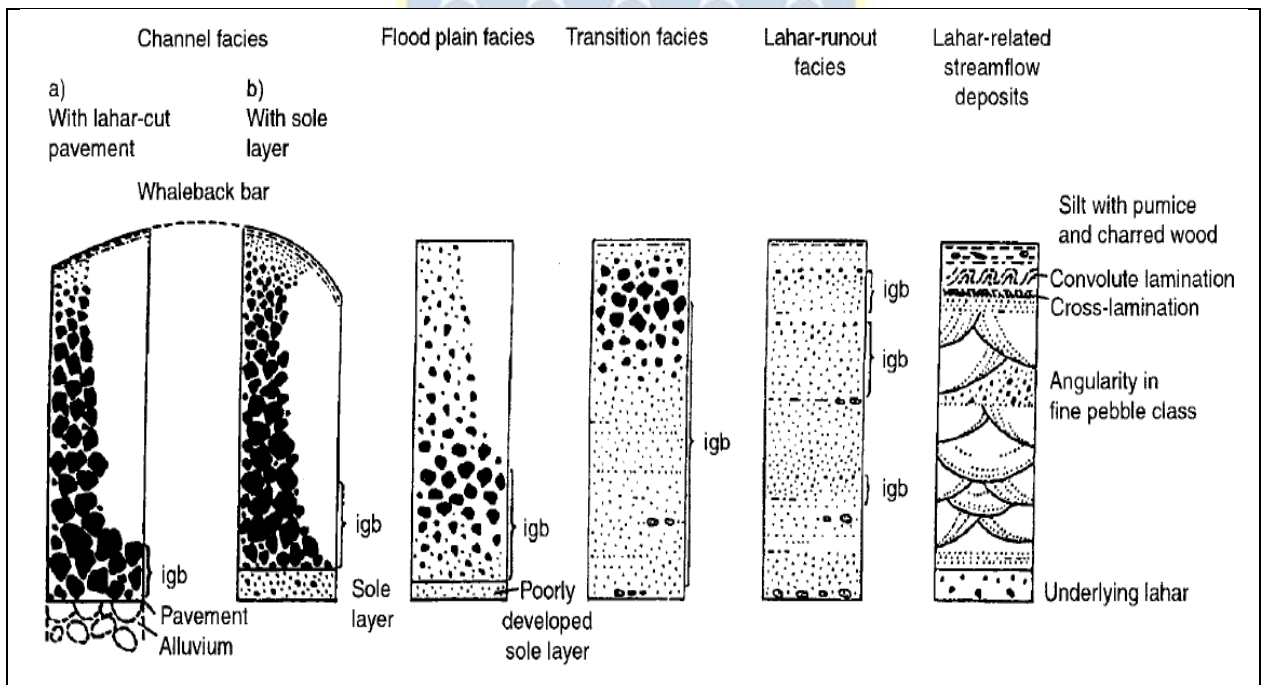


Figura 1.3 Representación esquemática de los tipos de facies en lahares que sufrieron dilución y transformación en flujos hiperconcentrados. Igb = gradación inversa (Scott, 1988).

Los depósitos de flujos hiperconcentrados tienen características intermedias entre flujos de detritos y flujos aluviales. Poseen comúnmente débil estratificación definida por capas horizontales delgadas y capas de estratificación cruzada de muy bajo ángulo. Son clastosoportados y presentan

una fuerte bimodalidad en sus clastos. Su espesor varía entre unos pocos centímetros a unos cuantos metros (Vallance e Iverson, 2015).

## 1.5.2. Modelamiento de Lahares Mediante “LaharZ”

### 1.5.2.1. Generalidades

LaharZ es un modelo numérico, semi-empírico, desarrollado en el Servicio Geológico de Estados Unidos (Schilling, 1998; Iverson *et al.*, 1998), el cual combina un análisis dimensional y estadístico para determinar las posibles áreas de inundación por un flujo lahárico. Este programa se utiliza como un ‘toolbox’ dentro de la interfaz del *software* ArcGIS y su licencia es de acceso libre (Iverson *et al.*, 1998).

Las variables de entrada que utiliza el programa son un modelo de elevación digital (DEM) y el volumen del lahar. Además, requiere ser calibrado con la selección del cauce de descarga del flujo y la definición de la zona de peligro proximal (H/L) o el punto de inicio de la descarga (Figura 1.4). La zona de peligro proximal es el área más peligrosa y destructiva alrededor de un volcán debido a que ella abarca zonas de flujos piroclásticos, caída de bombas y tefra, flujos de lava y avalanchas volcánicas. Es un área de elevada pendiente y muy próxima al cráter principal, y para la modelación, el lahar puede iniciarse en cualquier lugar al interior de ella. El límite de la zona de peligro proximal define donde el volumen del flujo lahárico es máximo, por lo que marca una transición desde una zona proximal donde el flujo va aumentando su volumen producto de la erosión, a una zona donde el flujo decae en su volumen producto del comienzo de la depositación. Además, este límite marca un cambio desde pendientes empinadas a pendientes más moderadas (Iverson *et al.*, 1998).

El resultado que entrega la modelación es un área de inundación transversal (A), y una planimétrica (B), ambas en función del volumen del lahar, y determinadas a partir de las siguientes relaciones (Iverson *et al.*, 1998):

$$A = 0.05 V^{2/3} \quad (1)$$

$$B = 200 V^{2/3} \quad (2)$$

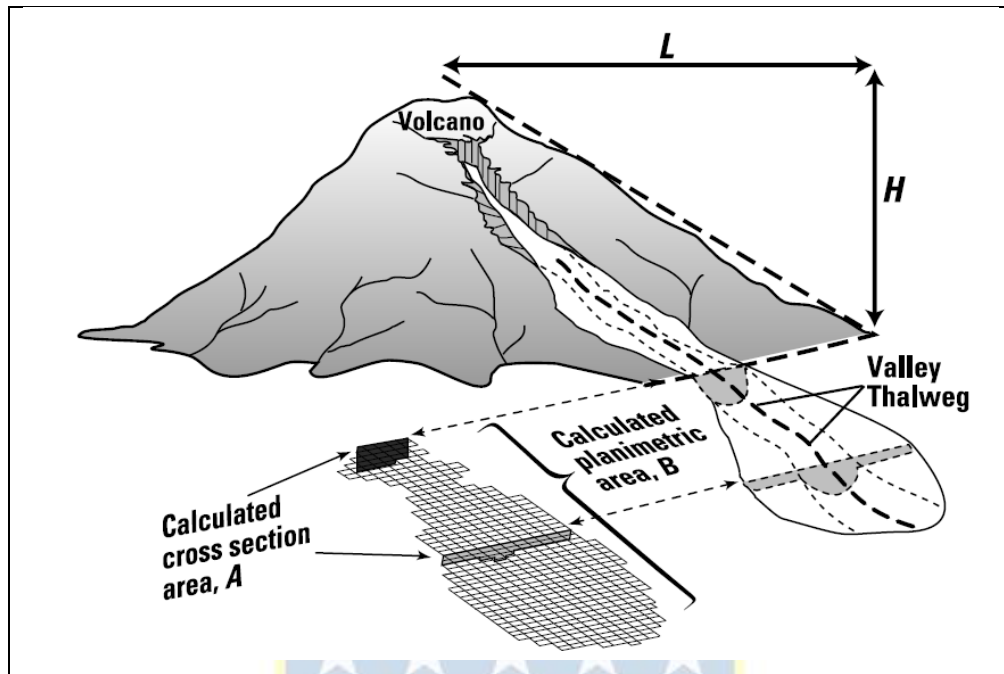


Figura 1.4

Flujo de lahar idealizado y relaciones geométricas entre H y L, lo cual describe la extensión de la zona de peligro proximal; además de A y B, las que describen la extensión de la zona de peligro distal de inundación por lahar. Extraído de Iverson *et al* (1998).

Estas ecuaciones fueron obtenidas mediante métodos estadísticos que se detallarán a continuación en base a datos de 27 eventos laháricos holocenos en una serie de volcanes, la mayoría ubicados en Estados Unidos, y otros tres volcanes de Canadá, México y Colombia; y otros datos obtenidos de experimentos de flujos a escala. Con respecto a la ecuación (1), Castruccio y Clavero (2015) realizan una calibración a la constante de esta fórmula, por medio del análisis de los depósitos de erupciones pasadas en los volcanes Villarrica y Calbuco, además de erupciones de volúmenes similares recopiladas de Iverson *et al* (1998), con el objetivo de simular lahares con una reología más similar a los ocurridos en la Zona Volcánica Sur (ZVS); de esta forma, la nueva constante determinada es 0.02, lo cual se traduce en la ecuación (3):

$$A = 0.02 V^{2/3} \quad (3)$$

Finalmente, como resultado del modelo se obtienen polígonos que representan la inundación de los lahares simulados, la red hidrográfica de la zona evaluada y el área proximal desde donde se realizó la simulación (Figura 1.5). Los polígonos obtenidos no están suavizados y tienen bordes angulosos,



por lo que para la generación de un mapa de peligros se utilizan como base para la creación de nuevos polígonos que representen los flujos laháricos de mejor manera.

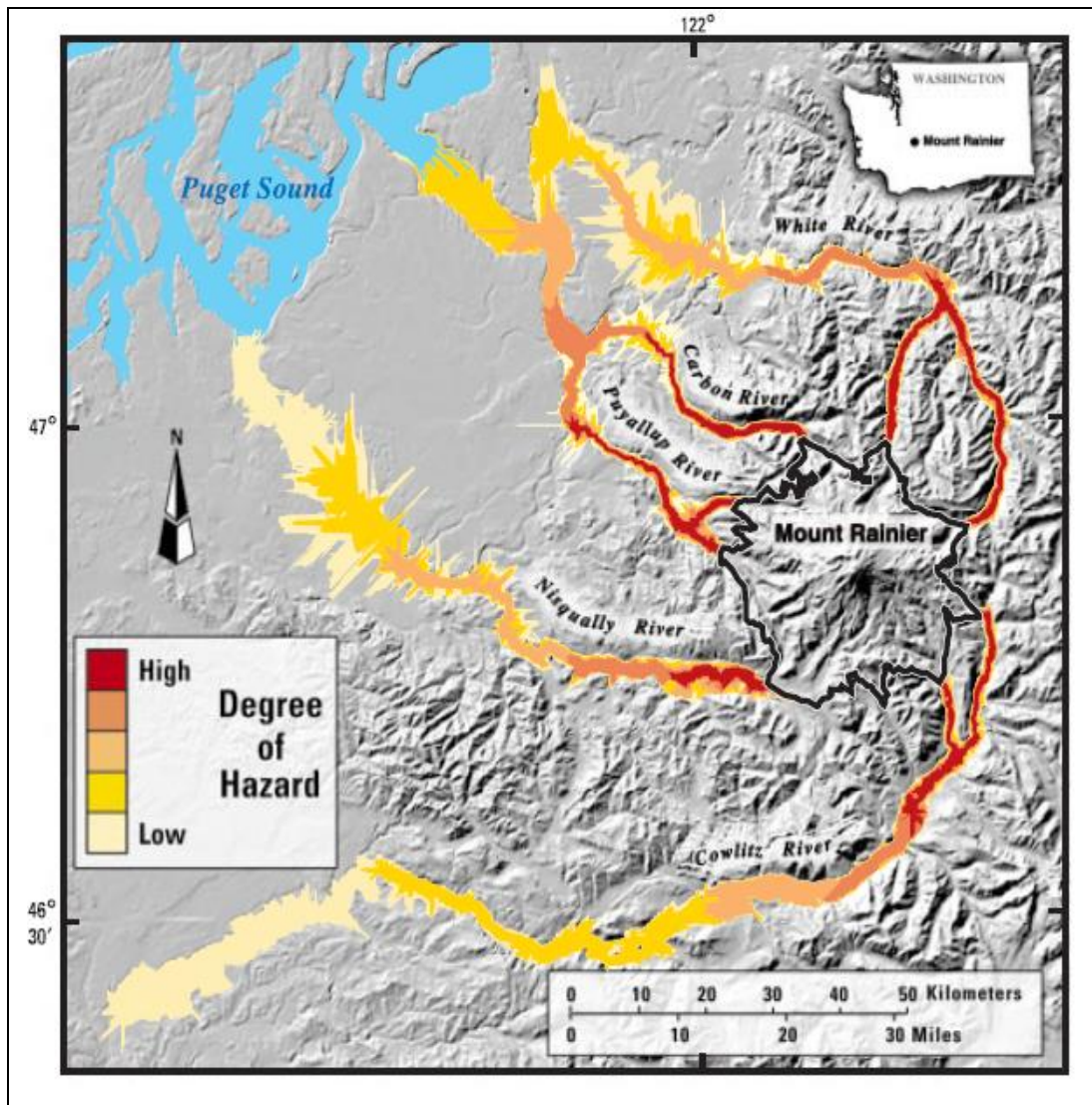


Figura 1.5

Mapa de peligro lahárico construido con la aplicación de LaharZ en la región de Mt. Rainier. La topografía se observa como relieves sombreados. La zona proximal de peligro representada por la línea negra alrededor del volcán está sujeta a diversos peligros, incluyendo lahares. Extraído de Iverson *et al* (1998).

Este modelo presenta diversas ventajas, entre las que se cuenta el bajo costo para su aplicación, la facilidad para operar el programa, y escasa cantidad de datos necesarios para su funcionamiento, lo cual permite obtener resultados en poco tiempo y trabajar en zonas de difícil acceso o que no han sido estudiadas previamente. Sin embargo, también presenta desventajas, entre las que

destacan las simplificaciones que utiliza el modelo como asumir un volumen constante de lahar, la definición arbitraria de punto de inicio de los flujos y considerar un lahar como un fenómeno con un único pulso. Sumado a esto, la calibración de las constantes de las ecuaciones se realizó en volcanes de Norteamérica, los cuales pueden tener un comportamiento distinto a los volcanes estudiados, y aunque la constante haya sido calibrada por Castruccio y Clavero (2015) para adaptarla al contexto de los volcanes del sur de Chile, no existen los datos necesarios para asegurar la fidelidad de la nueva constante al comportamiento de estos. Finalmente, el hecho de que sea un modelo semi-empírico significa que la dinámica del flujo y sus propiedades reológicas no están incorporadas dentro del modelo.

### 1.5.2.2. Base física

Para determinar la ecuación que regirá el programa, Iverson *et al.*, (1998) obtuvieron dos ecuaciones que relacionan el volumen del lahar con la sección transversal (A) y planimétrica (B) inundada:

#### 1.5.2.2.1. Sección transversal (A)

Para determinar la relación entre el volumen (V) y el área transversal (A) inundada se utiliza la ecuación de conservación de masa de un lahar (4), lo cual implica que existe una conservación de volumen.

$$V = \int (t) dt = K Q_{max} T \quad (4)$$

Donde V es el volumen total de un lahar, Q(t) es la descarga volumétrica en la sección transversal, t es el tiempo, T es el tiempo total que se requiere para que el lahar pase por dicha sección transversal, y por último K es un parámetro adimensional que determina la forma del hidrógrafo del lahar (Iverson, 1997 en Iverson *et al.*, 1998). Asumiendo que la descarga máxima del lahar ( $Q_{max}$ ) producirá la inundación máxima en la sección transversal del valle ( $A_{max}$ ), entonces la relación de ambos parámetros se define en la siguiente ecuación (5):

$$Q_{max} = A_{max} U \quad (5)$$

Dónde: U es la velocidad promedio del lahar y  $U \sim \sqrt{gR}$ ; donde R es el radio hidráulico del valle de inundación, y se puede expresar como  $R = A/P$ ; A es la sección transversal del valle; y, P es el perímetro del valle inundado por el lahar. Basado en lo anterior la ecuación se define como  $Q_{max} \sim A_{max} \sqrt{gR}$ , obteniendo finalmente la ecuación (6):



$$Q_{max}^* = \frac{Q_{max}}{A_{max}\sqrt{gR}} \quad (6)$$

El resultado de la escala de tiempo característica resulta del cociente entre  $\sqrt{A_{max}}$  y  $\sqrt{gR}$ , por lo que la ecuación (7) define la duración del lahar en la sección transversal:

$$T^* = \frac{T}{\sqrt{A_{max}} / \sqrt{gR}} \quad (7)$$

La relación entre  $A_{max}$  y el volumen de lahar resulta de la unión de las ecuaciones (5), (6) y (7), con lo que se obtiene la ecuación (8):

$$V^* = \frac{V}{A_{max}^{3/2}} = K Q_{max}^* T^* \quad (8)$$

Considerando  $C = (K Q_{max}^* T^*)^{-2/3}$ , la ecuación (8) se puede expresar como se muestra en la ecuación (9):

$$A = C V^{2/3} \quad (9)$$

Si se asume que C es constante, es similar a asumir que los hidrógrafos del lahar tienen formas constantes, entonces  $A \sim V^{2/3}$ .

#### 1.5.2.2.2. Sección planimétrica (B)

Para la obtención de una ecuación que relacione el volumen de un lahar con las áreas de inundación de este, se asume que el volumen del lahar se mantiene constante, a pesar de que los lahares pierdan o ganen sedimentos o agua. Estos generalmente crecen en las partes más pronunciadas, y no dejan muchos depósitos hasta que llegan a las llanuras de los valles, por lo que es una buena aproximación considerar el volumen constante. Entonces si se asume que el volumen es constante, se puede relacionar con la geometría del patrón de inundación, como se muestra en la ecuación (10):

$$V = \int_B h d\beta = \bar{h}B \quad (10)$$

Dónde:  $\beta$  son los elementos infinitesimales del patrón de inundación planimétricos del lahar, B es el área total de inundación planimétrica del lahar, y h es el espesor del lahar.

De esta ecuación se puede simplificar  $\bar{h} \sim B^{1/2}$ , que se puede aplicar a cualquier tipo de patrón de inundación del lahar, sin importar el tamaño o la forma. Usualmente, se tiene que  $\bar{h}/\sqrt{B} \ll 1$ , esto significa que el patrón de inundación y sus depósitos son principalmente tabulares, por eso se puede adoptar que  $\varepsilon = \bar{h}/\sqrt{B}$ , y asumir que  $\varepsilon$  es una constante pequeña. De este modo si se substituye  $\bar{h} = \varepsilon\sqrt{B}$  en la ecuación (10), esta ecuación se puede reescribir como se muestra en la ecuación (11):

$$B = cV^{2/3} \quad (11)$$

Donde  $c = \varepsilon^2/3$  es una constante hipotética, en la que se cumple que  $c \gg 1$ . Finalmente, se obtiene la ecuación esperada donde se relaciona el volumen de un lahar con el área planimétrica de inundación de esta.

### 1.5.2.3. Base estadística

Para calibrar las ecuaciones (9) y (11) obtenidas anteriormente, Iverson *et al.* (1998) analizan patrones en inundaciones producidas por lahares en diferentes volcanes, para obtener los valores de  $c$  y  $C$  que mejor se adapten al comportamiento de estos.

Las ecuaciones se transforman a logarítmicas, para minimizar la desviación estándar y el error, resultando la ecuación (9) en la ecuación (12):

$$\log A = \log C + \frac{2}{3} \log V \quad (12)$$

Donde  $2/3$  corresponde a la pendiente y  $\log C$  es la intercepción de  $A$  en un gráfico log-log con  $A$  en función de  $V$ . De igual forma la ecuación (11) se transforma en (13):

$$\log B = \log c + \frac{2}{3} \log V \quad (13)$$

Donde  $2/3$  es la pendiente y  $\log c$  es la intercepción de  $B$  versus  $V$  en un gráfico log-log.

Finalmente, mediante los gráficos  $A$  vs  $V$  y  $B$  vs  $V$  para las secciones transversales y planimétricas (Figura 1.6) se obtienen las constantes  $C$  y  $c$ , utilizando la información conocida de 27 lahares en volcanes principalmente estadounidenses. Cabe destacar que las líneas segmentadas que se observan en el gráfico son las que mejor se ajustan a la regresión de los datos utilizados para desarrollar las ecuaciones, con un 95% de confianza. El tamaño y la forma del intervalo de confianza (95%) delimitado por las líneas reflejan la incertidumbre y el error asociado a la ecuación, donde para determinados volúmenes pueden haber diferencias de un orden de magnitud

o más en las áreas calculadas. Las líneas punteadas delimitan el área donde el conocer el valor de  $\log V$  permite la predicción de los valores de  $\log A$  y  $B$  con un 95% de confianza, graficando así el error asociado a la ecuación.

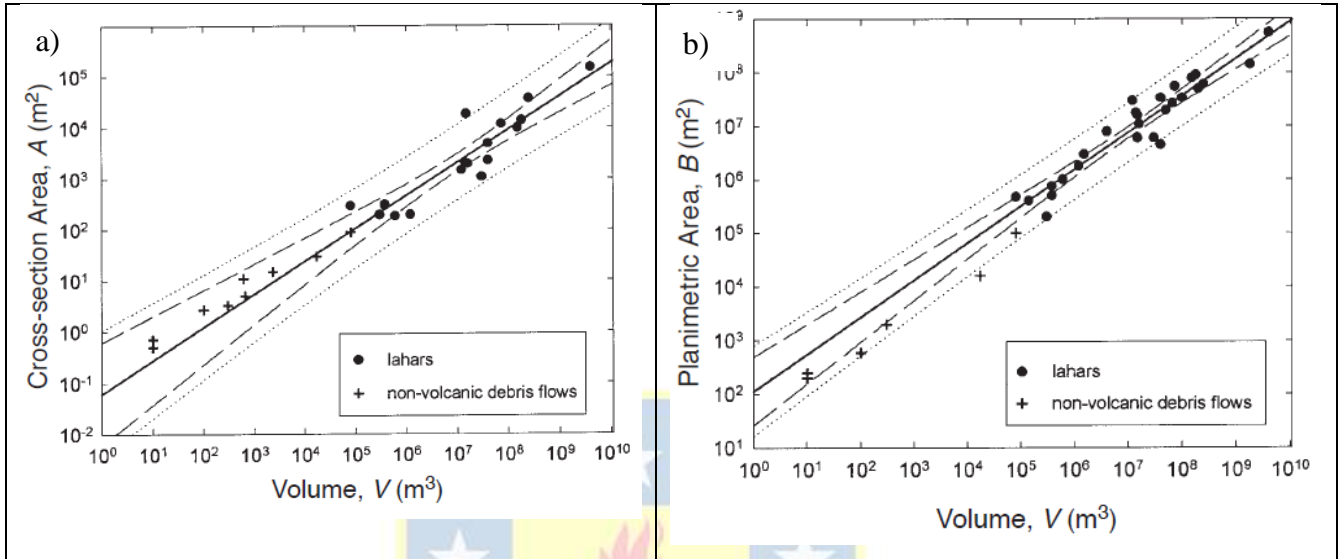


Figura 1.6 Gráficos de puntos de la sección transversal (a) y planimétrica (b) inundada en función del volumen del lahar ( $V$ ). Se observan las líneas de regresión que mejor ajustadas y los intervalos de confianza del 95% para la regresión (líneas segmentadas) y predicción (líneas punteadas). Extraído de Iverson *et al* (1998).

## 1.6. Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi profesor guía Dr. José Luis Palma por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto y en volcanes de mi región, La Araucanía. Además, por su constante apoyo y disposición en el desarrollo de mi memoria, aportando conocimientos, ideas y críticas que permitieron que esto sea posible y resulte de la mejor manera.

A los y las funcionari@s del Departamento Ciencias de la Tierra, Carolina Rojas, Luis Vásquez, Lucy Henríquez, Raúl Núñez, por diversos factores, que van desde recibarnos todos los días amablemente, ayudar todo lo posible con los trámites y gestiones en el Departamento, enseñarme a utilizar las herramientas computacionales que requirió el desarrollo de mi memoria, sin lo cual el trabajo se me habría dificultado enormemente, y proveer material bibliográfico.

Doy las gracias también a mi compañero Diego Arias y compañera Constanza Jorquera, los cuales trabajaron paralelamente dentro del mismo proyecto, aportando información valiosa en el análisis e integración de los distintos peligros que comprende esta memoria, además de generar un ambiente

de trabajo agradable y lleno de compañerismo. Junto a ellos, también agradezco a Belén Cartes, Yael Hernández, Valeria Martínez y Josefa Velásquez, por su ayuda en el desarrollo del Marco Geológico y en el caso de Josefa, también su apoyo en terreno.

De forma muy especial quiero agradecer a mi familia, principalmente a mis padres, que estuvieron para mí todos estos años, dándome la posibilidad de estar lo más cómodo posible en una ciudad extraña, confiando en mí y dándome todo su apoyo. A mis hermanos por siempre (o casi siempre) recibirme con alegría y un abrazo cuando visitaba mis tierras. A Catalina, mi compañera de vida, que siempre ha sido apoyo y alegría en mi vida, ayudándome a que todo este proceso fuese mucho más agradable y llenándome de cariño.

Finalmente, a mis amigos que estuvieron ahí presentes para todo, la Maldita Banda G4, Dieguez, Tato, Tomy, Chava, Garza y Juano, con los que compartí las necesarias distracciones de la Universidad y por lo que todo este proceso no fue tan agotador y estresante.



## 2. MARCO GEOLÓGICO Y VOLCANOLÓGICO

### 2.1. Volcán Callaqui

#### 2.1.1. Generalidades

El Vn. Callaqui corresponde a una estructura combinada de cono y fisura, con una base elíptica de orientación NE (Moreno y Lahsen, 1986). La composición de los productos volcánicos emitidos desde este, tales como lavas y piroclastos, es basáltica y andesítica (Moreno *et al.*, 1985). Aunque sólo hay antecedentes vagos de actividad volcánica en tiempos históricos, presenta dos áreas con fumarolas de gran actividad, ubicadas en el flanco oriental y en el borde sur de la cima. En este último lugar se observa abundante depositación de azufre y emanaciones de gases sulfurosos (Moreno y Lahsen, 1986). En la cima presenta numerosas lenguas glaciares alimentadas por un casquete mayor con un área de 11.07 km<sup>2</sup>, lo cual se traduce en un volumen de hielo del orden de 0.42 km<sup>3</sup> (Moreno y Lahsen, 1986).

Antecedentes no confirmados de su cronología eruptiva, indican, a lo menos, cuatro eventos históricos para el Vn. Callaqui, donde los últimos de estos tuvieron lugar en los años 1937 y 1980 (Groeber, 1928; Petit-Breuilh, 2004). Este último evento se trató de una pequeña erupción de cenizas, donde la nieve se cubrió de un “manto negro” (cenizas y lapilli) (Moreno *et al.*, 1985). Con respecto a su actividad holocena, esta se ve representada por, a lo menos, seis depósitos piroclásticos de edades comprendidas entre 9.950 y 320 A.P. (Polanco, 1998; Polanco *et al.*, 2000 en Naranjo *et al.*, 2000), donde su etapa de mayor explosividad habría ocurrido entre los 2.630 y 2.280 A.P., alcanzando un IEV igual o menor que 4 (Polanco, 1998 en Polanco *et al.*, 2000). Actualmente, el volcán presenta actividad fumarólica en la cima (Naranjo *et al.*, 2000).

#### 2.1.2. Rocas del Basamento e Intrusivas

El volcán Callaqui se dispone en discordancia sobre secuencias volcánicas más antiguas de disposición horizontal, asignadas a la Formación Cola de Zorro (Niemeyer y Muñoz, 1983). Estos estratos se encuentran intensamente afectados por la erosión glacial, y corresponden a lavas, aglomerados y brechas de composición basáltica y andesítica. El basamento sobre el cual se edificó el Volcán Callaqui consiste en estratos plegados terciarios de las formaciones Curamallín y Trapatrapa, además de cuerpos graníticos que las intruyen (Moreno *et al.*, 1985).



### 2.1.3. Rocas y Depósitos Volcánicos

Según criterios morfoestructurales se definen cuatro unidades principales dentro de Volcán Callaqui, denominadas Unidad Callaqui 1, 2, 3 y 4 (Figura 2.1), en orden decreciente de edad. Estas rocas consisten en secuencias de lavas basálticas a andesíticas, brechas y aglomerados de origen lahárico (Moreno *et al.*, 1984).



Figura 2.1 Mapa Geológico del Volcán Callaqui. Modificado de Cecioni y otros (2000), en Sielfeld (2008). Leyenda en página siguiente

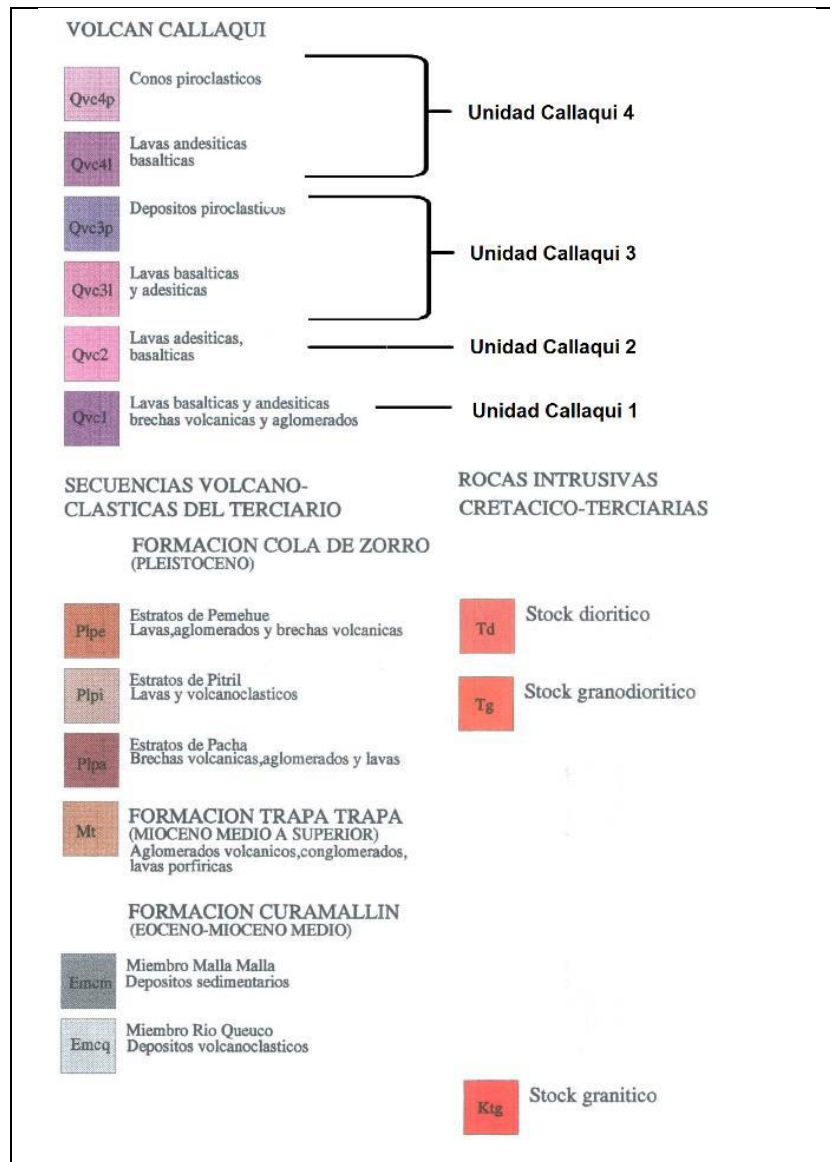


Figura 2.1 Leyenda de la  
Contiene las unidades geológicas más relevantes junto a una correlación aproximada entre las unidades descritas para el Volcán Callaqui en el Mapa Geológico y las unidades descritas por Moreno *et al* (2008). Modificado de Cecioni y otros (2000), en Sielfeld (2008).

### 2.1.3.1. Unidad Callaqui 1

Corresponde a las primeras emisiones del volcán Callaqui, y se caracterizan por una secuencia de lavas basálticas y andesíticas basálticas con intercalaciones de brechas y aglomerados de probable origen lahárico y conglomerados aluviales, que se apoyan en discordancia de erosión sobre las unidades del basamento y subyace, también en discordancia de erosión, a la Unidad Callaqui 2 (Moreno *et al.*, 1984).



La secuencia está compuesta de lavas masivas, ocasionalmente columnares, de 5 a 40 m de espesor, con intercalaciones de brechas y aglomerados y mantos lenticulares de sedimentos aluviales. En el valle glacial Ñireco, las abruptas paredes muestran una sucesión de basaltos y andesitas basálticas bien estratificadas de colores grises y negros, en coladas de 5 a 20 m de potencia, con intercalaciones menores de brechas volcánicas medias, de color gris oscuro. En conjunto alcanzan una potencia total cercana a los 700 m. En este sector, la Unidad Callaqui 1 está atravesada por un sistema de filones andesíticos y dacíticos de rumbos N60° - 70°E (predominante) y N10°W (subordinado) de 2 a 4 m de potencia. Comúnmente, las coladas de lava de esta unidad presentan en su base una zona brechosa debido al flujo y al enfriamiento brusco debido al contacto con la superficie del sustrato rocoso. Considerando la distribución de los afloramientos de la Unidad Callaqui 1, se puede inferir que las efusiones fueron emitidas desde un sistema fisural que se habría extendido desde las cabeceras del estero Ñireco hacia el noroeste, una longitud de 6 km. Petrográficamente las lavas corresponden a basaltos de olivino y andesitas basálticas de clinopiroxeno (augita) y olivino (Moreno *et al.*, 1984).

#### 2.1.3.2. Unidad Callaqui 2

Representada por las emisiones volcánicas que se depositaron en los valles glaciales excavados en la Unidad Callaqui 1. Infrayacen a las lavas de la Unidad Callaqui 3, las cuales la recubren parcialmente. Se distribuye preferentemente en los flancos noroccidental (río Pangué), occidental (río Biobío) y sur (río Malla) del edificio principal del volcán Callaqui. Gran parte de la cumbre de la estructura ha sido asignada a esta unidad y sus afloramientos están bien expuestos en la pared norte debido a la intensa erosión de los glaciares en la ladera. La cima está recubierta por flujos más recientes de la Unidad Callaqui 3. La secuencia consiste esencialmente en brechas volcánicas bien estratificadas de origen lahárico, en bancos de 2 a 8 m de espesor, con algunas intercalaciones de coladas basálticas y andesíticas basálticas de 5 a 10 m de espesor y niveles de ceniza y lapilli de color amarillo-ocre (Moreno *et al.*, 1984). En total esta secuencia alcanza aproximadamente 300 m de potencia.

En el valle del río Malla, la Unidad Callaqui 2 consiste esencialmente en mantos de brechas y aglomerados de origen lahárico, con intercalaciones de lavas basálticas y andesíticas basálticas que se hacen más abundantes hacia la parte superior. Los centros de emisión de los productos volcánicos de la Unidad Callaqui 2 habrían estado ubicados en el mismo sistema fisural de la



unidad anterior, pero en una extensión mayor, probablemente de 11 km. Los cráteres no son observables en la actualidad puesto que fueron destruidos parcialmente por la acción del hielo y recubiertos parcialmente por los productos efusivos más modernos. Petrográficamente, las lavas corresponden a basaltos de olivino y piroxeno, además de andesitas basálticas de piroxeno y olivino (Moreno *et al.*, 1984).

#### 2.1.3.3. Unidad Callaqui 3

Conjunto de coladas basálticas y andesíticas depositadas en cauces glaciales y fluviales excavados en la Unidad Callaqui 2. Los flujos de esta unidad fueron emitidos a través de numerosos cráteres controlados por tres fisuras paralelas y adyacentes, orientadas en una dirección N50° - 60°E. Desde estas fisuras las coladas se distribuyen principalmente hacia el sureste y noroeste y, en menor proporción, hacia el oriente y hacia el occidente. Las coladas más características asignadas a esta unidad, son las que descienden hacia el sur y se encauzan aguas abajo en el valle del río Biobío. En este sector, el río Biobío ha excavado un profundo cauce en esos flujos de lava y ha dejado expuestas 2 coladas de 15 a 20 m de espesor, separadas por un depósito lahárico de 5 a 8 m de potencia. Las lavas son generalmente de tipo “aa” con desarrollo incipiente de bloques. Las superficies muestran un aspecto escoriáceo muy fresco y las bases son brechosas. El espesor de las coladas disminuye con la cercanía al centro eruptivo, desde 20 a 30 m en los extremos hasta unos 3 a 5 m en el punto de emisión. Cabe señalar que, a pesar del aspecto fresco y reciente de los flujos de lava en las partes bajas de los flancos del edificio volcánico, en los sectores elevados muestran estrías y canaletas provocadas por el escurrimiento de glaciares. Es posible observar, además, depósitos morrénicos recubriendo las lavas entre las cotas 1500 - 2250 m en la ladera sur y 1900 - 2500 m en la ladera noroccidental (Moreno *et al.*, 1984).

#### 2.1.3.4. Unidad Callaqui 4

Erupciones aisladas en diversos puntos del sistema fisural, dieron lugar a emisiones de piroclásticos y lavas agrupados en la Unidad Callaqui 4. Los centros eruptivos de esta unidad y sus productos no muestran erosión glacial o ella es incipiente. Por otra parte, la cubierta boscosa desarrollada sobre la lava del volcán, representada esencialmente por coihues y araucarias, sugiere una antigüedad de, al menos, 1.000 años para esta lava. En síntesis, la Unidad Callaqui 4 habría sido emitida entre los 2500 y 1000 años A.P. En la actualidad, en la cima del volcán y en el flanco oriental, hay fumarolas activas. Históricamente no hay registro de erupciones, sin embargo, algunos

observadores mencionan la presencia de una “luminosidad rojiza” en el lugar de la fumarola principal en el año 1977 o 1978 y una corta emisión de cenizas que “ennegreció la nieve de los alrededores de la fumarola” en el mes de octubre de 1980. Esto significa que la actividad magmática está aun latente en el complejo volcánico (Moreno *et al.*, 1984).

#### 2.1.4. Actividad Eruptiva Histórica

La actividad explosiva holocena está representada por, a lo menos, seis depósitos piroclásticos de edades entre 9.950 y 320 AP (Polanco, 1998; Polanco y otros, 2000). El registro de erupciones históricas es impreciso, pero se indicarían cuatro eventos históricos, el último ocurrido en 1937 (Groeber, 1928; Petit-Breuilh en Moreno, 1992 en Naranjo, 2000). Actualmente, presenta solo actividad fumarólica en su cima (Naranjo *et al.*, 2000). Adicionalmente, una recopilación de antecedentes (ENDESA, 1996 en PLADECO, 2006) permite identificar al menos cuatro erupciones desde 1751: el 31 de diciembre de 1751, octubre de 1864, 18 de septiembre de 1937 y octubre de 1980. Durante el siglo XX sólo hay registros ocasionales de presencia de fumarolas y algunas pequeñas explosiones freatomagmáticas como la reportada en 1980 por el geólogo Rolando Barozzi. Por tanto, el período mínimo sin actividad del volcán es de 43 años, mientras que el período máximo ~~sin esta~~ es de 113 años. Moreno y Lahsen (1984) realiza un cuadro resumen de la actividad del volcán Callaqui, el cual se observa en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Cuadro resumen de la actividad del volcán Callaqui. Símbolo “(?)” corresponde a “erupción no confirmada”. Extraída de Moreno y Lahsen (1984).

Fecha	Tipo de Actividad	Observaciones
Presente	Fumarólica con emanaciones sulfurosas en dos lugares.	Se observaron impactos de rocas en el hielo que rodea la fumarola principal.
1980/Octubre (?)	Pequeña erupción de cenizas.	Desde la fumarola principal; la nieve se cubrió de un "manto negro" (cenizas y lapilli). Fuente: lugareños.
1966-1978	"Resplandor rojizo" en la fumarola principal, avalanchas de hielo.	Actividad magmática vigente. Fuente: R. Barozzi y lugareños.
1974-1978	Fumarólica.	

Tabla 2.1. Cuadro resumen de la actividad del volcán Callaqui. Símbolo “(?)” corresponde a “erupción no confirmada”. Extraída de Moreno y Lahsen (1984).

Fecha	Tipo de Actividad	Observaciones
1974-1978	Fumarólica.	
1000 (?) A.P.-1974	No habría registro.	Erupción del volcán Lloguel en 1872 (Risopatron, 1924) podría corresponder al volcán Callaqui.
2.500 (?) A.P.-1000 (?) A.P.	Eruptiva efusiva, algo explosiva.	Unidad Callaqui 4; Volcanes Epún; Ñireco, Pichimalla, Quillaicahue y cumbre Callaqui.
9.500 (?) A.P.-2.500 (?) A.P.	Eruptiva efusiva, algo explosiva.	Unidad Callaqui 3 y lahares asociados.
90.000 (?) A.P.-11.000 (?) A.P.	Eruptiva efusiva, algo explosiva.	Unidad Callaqui 2; lavas y lahares en la base.
200.000 (?) A.P.-90.000 (?) A.P.	Eruptiva efusiva, algo explosiva.	Unidad Callaqui 1; lavas, lahares y sedimentos aluviales en la base.

## 2.2. Volcán Llaima

### 2.2.1. Generalidades

La actividad eruptiva histórica a partir de 1640 ha sido principalmente efusiva a explosiva de baja intensidad, generando coladas y piroclastos escoriáceos de composición basáltica y andesítico-basáltica (51,78 a 55,73% SiO<sub>2</sub>) (Naranjo y Moreno, 2005). La actividad de este volcán es, principalmente, de tipo estromboliano y hawaiano, con actividad subpliniana intermitente. Durante los últimos cuatro siglos, en general, ha seguido un modelo fisural y de flanco, con centros de emisión ubicados entre los 2000 y 2250 m s.n.m., en los flancos norte y sur del volcán, los que están alineados según una orientación NNE (Naranjo y Moreno, 2005). Además de lo anterior, en el último ciclo eruptivo (2007 – 2009) su actividad se concentró en el cráter principal, con la formación de 3 conos de escoria dentro de este, y en centros de emisión menores en su flanco oriental (Figura 2.2; Moreno *et al.*, 2009).

### 2.2.2. Rocas del Basamento e Intrusivas

Se edifica sobre rocas cuyas edades fluctúan entre el Mioceno y el Pleistoceno. La unidad más antigua corresponde al Grupo Plutónico Melipeuco de edad Mioceno. Sobre esta unidad existen cadenas volcánicas del Plioceno – Pleistoceno, propias de la Formación Malleco, además de





LEYENDA		
<b>Hf</b> Depósitos Fluviales Actuales	<b>Lice</b> Depósitos Indiferenciados De Caída De Escoria	<b>Plsp</b> Volcán Peñón
<b>Hca</b> Depósitos Coluviales y Abanicos Aluviales	<b>Llst</b> Secuencia Trifultriful	<b>La1</b> Llaima Ancestral 1
<b>Htp</b> Depósitos Aterrazados Poligénicos	<b>Llcp</b> Llaima Cono Principal	<b>La2</b> Llaima Ancestral 2
<b>Llh</b> Depósitos Laháricos Indiferenciados	<b>Lf1</b> Llaima Fisural 1	<b>Pmsn</b> Complejo Volcánico Sierra Nevada
<b>Hm</b> Depósitos Morrénicos Recientes Indiferenciados	<b>Lf2</b> Llaima Fisural 2	<b>PPlim</b> Formación Malleco
	<b>Lf3</b> Llaima Fisural 3	<b>Mm</b> Grupo Plutónico Melipeuco
	<b>Lilc</b> Ignimbrita Curacautín	<b>---</b> SFLO

Leyenda de la Figura 2.2

### 2.2.3. Rocas y Depósitos Volcánicos

El Volcán Llaima se compone de dos unidades basales, denominadas Llaima Ancestral 1 y 2; tres unidades fisurales, definidas como Llaima Fisural 1, 2 y 3; las unidades generadas a partir del cráter principal (Llaima Cono Principal y Erupciones Históricas); y las secuencias piroclásticas (Ignimbrita Curacautín y Secuencia Trifultriful). Además, se reconocen unidades actuales de origen fluvial, aluvial, lahárico, morrénico y de caída de escorias (Figura 2.2). Las edades de estos depósitos se definen entre el Pleistoceno y el Reciente (Naranjo y Moreno, 2005).

#### 2.2.3.1. Llaima Ancestral 1 y 2

Corresponden a secuencias de lavas basálticas a andesíticas macizas, con intercalaciones brechosas e intrusiones de lacolitos. Se interpretan como relictos de una estructura volcánica primitiva y más extensa que el actual volcán Llaima, con lavas distribuidas en torno al volcán mostrando un manteo radial. Se distingue un nivel más elevado y potente, cuyo espesor máximo alcanza unos 600 m (Llaima Ancestral 1), al cual se adosa un nivel topográficamente más bajo y joven (Llaima Ancestral 2), de hasta 300 m de espesor. Estas lavas yacen en inconformidad sobre el Grupo Plutónico Melipeuco, en los cerros Los Paraguas, Pangueco y Negro, y también cubren concordantemente a la Formación Malleco (Naranjo y Moreno, 2005).

Ambas secuencias estratificadas se distribuyen principalmente al S del volcán, formando las paredes del vale del río Allipén. Las unidades ancestrales muestran una fuerte erosión glacial,

exhibiendo marcados valles en forma de “U” en torno al volcán y espolones remanentes con paredes abruptas. En los ríos Calbuco y Captrén, se identifican con superficie tipo ‘aa’ sin patrón de erosión posterior, aunque cubiertas por depósitos piroclásticos. La disposición morfoestratigráfica de la unidad Llaima Ancestral 2 indicaría, por lo tanto, un emplazamiento bajo grandes lenguas glaciales, que labraron valles en la unidad Llaima Ancestral 1 (Naranjo y Moreno, 2005).

Dataciones K-Ar en estas lavas, entregan valores que fluctúan entre 68 y 60 ka, indicando una edad Pleistoceno Superior (Naranjo y Moreno, 2005).

### 2.2.3.2. Ignimbrita Curacautín

Naranjo y Moreno (1991) definen así a un depósito de flujo piroclástico, tipo escoria y ceniza, dispuesto al fondo de valles de forma radial a los alrededores del volcán Llaima, constituyendo el suelo de fundación de la ciudad Curacautín. Estos depósitos sobreyacen a las unidades ancestrales y al basamento del volcán, y a su vez, infrayacen a las unidades fisurales y del cono principal. Se distribuye principalmente al W del Llaima, cubriendo un área por sobre 2200 km<sup>2</sup>, alcanzando la ciudad de Temuco (100 km al W).

Martínez (2019) define dos unidades que conforman la ignimbrita: Curacautín 1 (C1, parte inferior) y Curacautín 2 (C2, parte superior). C1 posee un color gris oscuro y no presenta gradación en el tamaño de grano, es de fábrica matriz-soportada y presenta entre un 85% y 90% de matriz tamaño ceniza, compuesta principalmente de fragmentos juveniles y escasos líticos. Los fragmentos mayores son en su mayoría de tamaño lapilli medio a grueso, con moda lapilli grueso y con algunos escasos tamaño bloque. C2 tiene una coloración parduzca y es parcialmente consolidado, es decir, los sedimentos han sido compactados y cementados hasta el punto de convertirse en un depósito relativamente sólido. Es matriz soportado con ceniza gruesa a lapilli medio, de pobre selección y disgregable. Sus piroclastos son irregulares y finamente vesiculados, con un mayor grado de esfericidad y redondez. Sus partículas son más livianas y presentan un alto porcentaje de vesículas a simple vista, por lo tanto, son menos densos que los depósitos de C1. La presencia de bloques es más recurrente y tiene una mayor concentración de líticos hacia techo.



Curacautín 1 tiene un espesor de 12 m y se encuentra ampliamente distribuida alrededor del volcán. A este depósito le sobreyace un depósito de oleada piroclástica, y sobre este sobreyace Curacautín 2, el cual posee un espesor máximo visto en terreno de 6 m (Martínez, 2019).

Dataciones  $^{14}\text{C}$  en madera carbonizada dentro de la ignimbrita, otorgan edades que fluctúan entre 13460 y 12760 A.P., por lo tanto, esta unidad fue eyectada a comienzos del postglacial, a través de una erupción con posible vinculación al origen de la caldera entre 6 a 8 km de diámetro, la que actualmente, estaría cubierta en su totalidad por el cono principal del volcán Llaima (Naranjo y Moreno, 1991).

Según Naranjo y Moreno (2005), los productos de la Ignimbrita Curacautín sellaron la morfología glacial preexistente. La eyección de unos 24 km<sup>3</sup> de material piroclástico, tuvo un efecto importante morfológico - estructural, produciendo el colapso parcial del cono tardi - postglacial de las unidades Llaima Ancestral 1 y 2.

#### 2.2.3.3. Llaima Fisural 1, 2 y 3

Se disponen en el flanco nororiental, y en toda la falda occidental del volcán, conformada por conos piroclásticos de escorias, en parte erosionados, y coladas de lava de tipo 'aa', de composición andesítica a andesítica basáltica, con textura afanítica a porfídica. Según Rodríguez (2015), los centros de emisión se encuentran distribuidos formando lineamientos con tendencia NE - SW a E - W, por tanto, las lavas han descendido hacia los sectores nororiental, noroccidental y suroccidental del volcán Llaima, alcanzando distancias de hasta 20 km, y son las responsables de haber embalsado las lagunas Conguillío, Verde y Arcoíris. Se observa que yacen concordantes sobre la Ignimbrita Curacautín y la Secuencia Trifultruful.

Las unidades Llaima Fisural 1 y 2 están formadas por conos piroclásticos de escorias y coladas de lava tipo 'aa'. Individualmente, los conos piroclásticos de escoria de la unidad Fisural 2 muestran formas basales circulares y también alargadas en la dirección de la fisura, las que pueden alcanzar desde 1,5 hasta 2,5 km de largo. En general, las lavas de esta unidad se ubican en un intervalo composicional relativamente restringido entre andesitas basálticas y andesitas (~54,6 - 56,5% SiO<sub>2</sub>); casi el mismo que la unidad Fisural 1. Por su parte, la unidad Llaima Fisural 3 se sobrepone a los conos de las unidades Llaima Fisural 1 y 2 y corresponde a un rosario de pequeños conos y

cráteres alineados a lo largo de una fisura de 1 km de longitud, entre lineamientos paralelos de la unidad Fisural y con orientación ENE (Naranjo y Moreno, 2005).

Dataciones de  $^{14}\text{C}$  obtenidas en madera carbonizada entregan edades entre 3440 y 2949 AP para Llaima Fisural 1, 2.949 y 770 AP para la unidad Llaima Fisural 2, y de 320 AP para la unidad Llaima Fisural 3 (Naranjo y Moreno, 2005).

#### 2.2.3.4. Llaima Cono Principal

Esta unidad incluye las rocas volcánicas que han construido la estructura cónica del edificio volcánico del Llaima, siendo emitidas tanto desde los cráteres de cimas, como de las fisuras radiales en los flancos altos del volcán. Sus lavas más antiguas sobreyacen a la unidad Llaima Fisural 2, y las más jóvenes han sido emitidas durante las Erupciones Históricas. Estas lavas tipo 'aa' han fluido radialmente alrededor del volcán, alcanzando distancias que sobrepasan los 27 km desde el centro de emisión. Son rocas en su mayoría porfíricas, con fenocristales de olivino, clinopiroxeno y plagioclasa, en diversas proporciones, y corresponden a basaltos y andesitas basálticas (Naranjo y Moreno, 2005).

Dataciones  $^{14}\text{C}$  en restos de carbón bajo las coladas entregan edades de 1160 a 410 A.P., pero al ser obtenidas en productos superficiales, y ya que no existen dataciones de las coladas más antiguas, se infiere que la edad máxima de la unidad se extiende hasta el límite superior de la unidad Llaima Fisural 2, a la cual sobreyacen, es decir, a 2940 A.P. (Naranjo y Moreno, 2005).

Dentro de la unidad Llaima Cono Principal se han identificado seis subunidades correspondientes a las Erupciones Históricas, en orden cronológico de más antigua a más moderna; la erupción de 1640, que fue emitida a través de dos fisuras, una en el flanco NW, y la otra en la ladera SW del volcán, y según antecedentes documentados es la erupción de mayor magnitud del volcán Llaima. La erupción de 1751, cuyas lavas se originaron en la cima S del volcán, y descendieron por el valle del Trifultruful hacia Melipeuco, con espesores de hasta 6 m en el extremo distal a 23 km de la fuente. La erupción de 1780, durante la cual las lavas emergieron a través de fisuras ubicadas en el flanco N y S del Llaima, que llegaron solo a 4,5 km de la actual localidad de Melipeuco (escoriales de Pangueco). El centro de emisión está cubierto por campos de lavas *pahoehoe* con estructuras tipo túmulos, cordones trenzados y formas ovoidales parecidas a lavas en almohadilla en superficie. La erupción de 1945, cuyas lavas fueron expulsadas desde el cráter principal, bajo el hielo hacia el

este, con una potencia de 13 m en su frente, encauzada en una quebrada y alcanzando 40 km de largo. La erupción de 1957, en la cual las lavas fueron emitidas desde el flanco N y la parte oriental de la cima S del volcán, siendo del tipo ‘aa’, aunque localmente, desde una abertura de túnel de lava, se emitieron flujos con rasgos *pahoehoe* (lavas cordadas). Los frentes alcanzaron espesores de hasta 8 m. La erupción de 1994, donde las lavas fueron extruídas desde el cráter principal, y fluyeron bajo el hielo generando un lahar/crecida hacia el río Calbuco (Moreno y Fuentealba, 1994). Pese a que no aflora, es posible trazar su trayectoria bajo el casquete según los rasgos de evaporación reflejados en este. Y finalmente, la erupción de 2008, con lavas expulsadas desde el cráter principal del Llaima (Maisonneuve *et al.*, 2012b).

Las coladas emitidas en las erupciones históricas son mayoritariamente de tipo “aa”, aunque se han registrado en algunos casos lavas con morfología tipo *pahoehoe* (erupciones de 1780 y 1957). Composicionalmente estas rocas corresponden a andesitas basálticas y basaltos con textura porfídica (Naranjo y Moreno, 2005).

#### 2.2.3.5. Secuencia Trifultriful

Naranjo y Moreno (1991, 2005) la describen como una sucesión estratificada holocena compuesta por depósitos piroclásticos de flujo, caída y oleada, propias de erupciones explosivas del volcán Llaima. Esta unidad sobreyace a la Ignimbrita Curacautín, al Grupo Plutónico Melipeuco y a las unidades ancestrales del Llaima.

La Secuencia Trifultriful se dispone principalmente al E y SE del volcán, debido a la dispersión producida por los vientos prevalecientes del NW y W. A lo largo del valle del río Trifultriful y sus tributarios, se encuentran los mejores afloramientos donde la sucesión muestra un registro que alcanza una potencia máxima de 35 m, en el que alternan cerca de 70 niveles de caída de piroclastos y flujos, con delgados horizontes de paleosuelos. Naranjo y Moreno (2005) distinguen 40 niveles de caída de escorias, 2 niveles de caída de pómez y 25 niveles de flujos u oleadas piroclásticas.

La base de la secuencia está compuesta por una sucesión de tefras de 3 m de espesor, y la sobreyace un depósito de caída de piroclastos de pómez dacíticas, bien seleccionado, alcanzando 4 m de potencia. Hacia el techo de la unidad, aparecen dos depósitos de oleada piroclástica, localmente separados entre sí por una discordancia de erosión; el basal de 4 m de espesor que alcanza una distancia de 12 km de la cima del volcán, tiene una distribución restringida a la desembocadura de

los valles ubicados al E y S del volcán, es mal seleccionado y presenta estratificación cruzada y laminación paralela; el superior que aflora solo parcialmente en el corte oriental del río Trifultriful, 9 km al ESE de la cima del volcán, y que corresponde a una sucesión interestratificada de lapilli y ceniza gruesa, que además exhibe bandas con gradación normal, alcanzando un espesor de 5 m (Naranjo y Moreno, 2005).

Determinaciones radiométricas  $^{14}\text{C}$  en restos de madera carbonizada, obtenidos directamente de los niveles de flujo y oleada, indican una edad entre 10530 y 280 A.P. Los niveles de caída más jóvenes han sido asociados a las contrapartes efusivas descritas en la unidad Llaima Cono Principal correspondientes a lavas de erupciones históricas. Por su parte, los depósitos de caída sugieren un predominio de erupciones estrombolianas a subplinianas durante el desarrollo de esta unidad (Naranjo y Moreno, 2005).

#### 2.2.3.6. Depósitos Indiferenciados de Caída de Escoria

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

Esta unidad cubre el flanco oriental del Llaima, en los alrededores de las unidades Llaima Fisural 2 y 3, así como sobre rocas graníticas del Grupo Plutónico Melipeuco, alejándose hasta 12 km al E, producto del viento. Se infiere que estos depósitos son producto de las principales erupciones históricas del volcán Llaima (Naranjo y Moreno, 2005).

#### 2.2.3.7. Depósitos Morrénicos Recientes Indiferenciados

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

#### 2.2.3.8. Depósitos Laháricos Indiferenciados

Según Naranjo y Moreno (2005), esta unidad corresponde a depósitos de flujo de detritos no consolidados, de origen lahárico, empobrecidos en arcilla y con abundantes fragmentos tamaño grava, con mala selección y ricos en matriz arenosa. Constituyen rellenos de casi todos los valles que drenan radialmente el volcán (Quinteros, 1991 en Naranjo y Moreno, 2005). Sus espesores pueden alcanzar los 10 m, y son principalmente monolitológicos, con baja proporción de fragmentos de rocas del basamento y fragmentos de troncos como constituyentes comunes (Naranjo y Moreno, 2005).

Las *facies* de estos depósitos se caracterizan por ser macizas sin gradación o parcialmente gradadas, de forma inversa a base y normal hacia techo. Las *facies* distales presentan características intermedias entre flujos de detritos y aluviales, con estratificación débil; mientras que las *facies* de canal son generalmente clastosoportadas con clastos de grava y bolones rodeados por una matriz limoarenosa (Naranjo y Moreno, 2005).

El material constituyente de los Depósitos Laháricos proviene de los Depósitos Morrénicos que fueron removidos en sectores de alta pendiente y también de los productos generados durante la erupción que los causa. Los lahares en el volcán Llaima se generan por la rápida fusión de nieve o hielo durante las etapas álgidas de una erupción, propiciando una súbita descarga de agua subglacial (Naranjo y Moreno, 2005).

#### 2.2.3.9. Depósitos Coluviales y Abanicos Aluviales

Naranjo y Moreno (2005) definen esta unidad constituida por gravas y bloques clastosoportados, con mala selección, generados por el colapso gravitacional de taludes afectados por lluvias torrenciales. Se distribuyen sobre los faldeos del volcán Llaima, en un área reducida en forma de abanicos, formados por la remoción de depósitos piroclásticos y morrénicos y, en ocasiones, mezclados con taludes del basamento rocoso.

#### 2.2.3.10. Depósitos Fluviales Actuales

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





Tabla 2.2 Cronología eruptiva documentada del volcán Llaima. Modificado de Petit-Brueilh y Lobato (1994).  
(continuación)

32	1938/12		-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	?
33	1941/06/23		-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	?
34	1942/06/09	1942/11	X	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-	2
35	1944		-	-	?	?	?	X	-	-	-	-	3-4	2
36	1945/03/31	1945/04/03	-	-	X	X	X		?	X	-	-		2
37	1946/07/23	1947	-	-	X	X	X	X	-	X	X	X		?
38	1949/09		-	-	X	X	X	X	-	-	-	-		1-2
39	1955/10/22	1955/10/22	-	-	X	X	X	X	-	-	-	-		2
40	1956/01/18	1956/10/11	X	X	X	X	X	X	-	X	X	-	3	1-2
41	1957/01/14	1957/11	X	X	X	X	X	X	-	X	X	-	12	2-3
42	1964		-	-	X	X	X	X	-	-	-	-		1-2
43	1971/11	1972/03/12	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	1,5	2
44	1979/10/15	1979/11/28	X	X	X	X	X	X	-	X	-	-	1-2	2
45	1984/04/20	1984/11/26	-	-	X	X	X	-	?	-	-	-	6	1-2
46	1990/02/25	1990/11/25	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	1	1-2
47	1994/05/17	1994/05/19	X	X	X	X	X	X	-	X	X	-	4	2
48	1994/08/25	1994/08/30	X	-	X	X	X	-	-	-	-	-	3,7	1-2
49	2007	2009	-	X	X	X	-	X	-	X	X	-		3

Desde la mayor erupción registrada de este volcán (1640), la actividad ha mantenido un carácter primariamente efusivo a explosivo de baja intensidad, cuyo estilo eruptivo ha seguido un modelo fisural y de flanco, con centros de emisión en cráteres adventicios ubicados entre los 2.000 y 2.250 m s.n.m. (Naranjo y Moreno, 2005).

Naranjo y Moreno (2005) destacan las erupciones de los años 1640, 1751, 1875, 1903, 1927, 1944-1946, 1955-1957, debido a la magnitud de estas y de sus impactos, ya sean humanos como ambientales. En los últimos 50 años, el volcán Llaima ha presentado erupciones aproximadamente cada 7 a 10 años, la información disponible difiere entre una erupción y otra en cantidad y calidad. La actividad volcánica registrada en el año 1994, si bien presentó dos erupciones importantes, es bastante diferente de la presentada durante el período 2007-2009, ciclo en el cual se reconocen al menos 9 erupciones.

#### 2.2.4.1. Erupción de 1640

Erupción histórica más grande conocida, que presentó actividad precursora (ruidos subterráneos y explosiones fuertes). Además, mostró eyección de piroclastos (produjo incendios forestales en las cercanías del volcán), gases sulfurosos y lahares calientes, que descendieron por el Trifultrful, perturbando los ríos Allipén y Toltén, provocando mortandad de gran cantidad de peces. Adicionalmente, se produjeron derrumbes en los cerros cercanos e inundaciones por el

embalsamiento de algunos ríos por los flujos laháricos (Ovalle, 1646; Rosales, 1877, en Navarrete, 2017).

#### 2.2.4.2. Erupción de 1751

Los dos cráteres del volcán presentaron actividad. El cráter principal produjo emisión de piroclastos y formación de una columna eruptiva, mientras que en el sector S presentó emisión de lava por una fisura hacia Melipeuco por el valle Trifultriful, actual sector de Pangueco (Havestadt, 1777; Moreno y Naranjo, 1991, en Navarrete, 2017).

#### 2.2.4.3. Erupción de 1875

Erupción violenta. Inició con una actividad eruptiva menor a fines de 1874 en el cráter principal, mientras que a fines de 1875 e inicios de 1876, dio cabida para la etapa paroxismal de la erupción. Presentó columna de gases y ceniza, pluma que afectó ~138 km a la redonda, flujos de lava, lahares y derrumbes del cono hacia el N. Al parecer se produjo una modificación significativa del edificio volcánico, adquiriendo una hendidura en su cima (Fonck, 1888; Subercaseaux, 1889; Martin, 1901, en Navarrete, 2017).

#### 2.2.4.4. Erupción de 1903

Registro de esta erupción se encuentran en el flanco S del volcán, la cual presentó explosiones, eyección de piroclastos y una columna de gases y ceniza. Se formaron coladas de lava observables desde Temuco. Esta erupción también modificó parte del edificio volcánico, con la aparición de un nuevo cráter en el flanco S, cerca del Pichi Llaima (Martin, 1923; Jaggar, 1925, en Navarrete, 2017).

#### 2.2.4.5. Erupción de 1927

Erupción en dos etapas, donde presentó actividad en ambos cráteres. La primera etapa comprende del 5 al 8 de octubre de 1927, mostrando actividad explosiva, acompañada de fuertes y numerosos temblores, con ruidos sordos. La segunda etapa, comprende la erupción paroxismal del volcán, el día 29 de noviembre de dicho año. Según declaraciones, se observó poca caída de ceniza. En el cráter principal, se formó una densa columna de gases y piroclastos de varios km de altura. Se depositó una cubierta de ~20 cm de espesor sobre el hielo del glaciar en el lado S con una escoria negra (vítrea) tamaño ceniza a lapilli, la cual se puede apreciar en el sector de Lago Verde.

Conjuntamente cayeron en el lado N del volcán, a 6-7 km de la cumbre. La actividad en el cráter S, si bien fue el más activo durante la segunda etapa de la erupción, se caracterizó por la formación de una colada de lava (Boletín Del Servicio Sismológico de la Universidad De Chile, 1929; Diario El Correo de Valdivia, 1927; Sapper, 1927; Valderrama, 1927; Jaggar, 1929; Stone e Ingerson, 1934; Stone; 1935, en Navarrete, 2017).

#### 2.2.4.6. Erupción de 1944 - 1946

1944: Erupción violenta. Formación de una columna eruptiva de piroclastos y vapor de agua de aprox. 3 a 4 mil metros sobre el cono.

1945: Entre el 31 de marzo hasta el 3 de abril. Presentó explosiones, eyección de piroclastos, flujos piroclásticos de poco alcance, lahares (bajaron por el río Manzano) que generaron pérdidas de ganado. El 2 de abril se produjo una gran explosión, formando una columna densa de piroclastos. Producto de la actividad volcánica, el nuevo puente sobre el río Trifultruful fue destruido en parte (Diario El Correo de Valdivia, 1945; Diario La Nación, 1945 en Navarrete, 2017).

1946: Comprende desde el 23 de julio hasta 1947. Erupción acotada al cráter principal, desde donde se produjo un flujo de lava, sumado a las precipitaciones de ese momento, formaron lahares y derrumbe en el cerro S del Lago Colico. Estos lahares provocaron que la localidad de Santa María de Llaima quedara aislada (El Diario Austral, 1946, en Navarrete, 2017).

#### 2.2.4.7. Erupción de 1955 - 1957

1955: Entre el 22 de octubre hasta el 13 de noviembre de 1955, con actividad en ambos cráteres del volcán. Inició con una fase explosiva, la que dio paso al derretimiento de nieve. Producto del viento puelche, el eje de la pluma estaba orientado hacia Cherquenco. En el cráter principal se formó una colada de lava, apareciendo desde el cráter y otra más debajo de éste. Alcanzó una extensión de ~1200 m, de 200 a 250 m de ancho aproximadamente. Adicionalmente se produjeron grietas de 15 a 20 m por donde pasó la lava. En cuanto al cráter S, presentó actividad fumarólica intensa. La actividad cesó con ambos cráteres tapados, emitiendo fumarolas (Diario Austral de Temuco, 1955; Hantke 1959; Casertano, 1963 en Navarrete, 2017).

1956: Desde el 18 de enero hasta noviembre de 1956, erupción con 3 etapas. La primera, comprende el 18 y 19 de enero, en el que exhibió actividad precursora (ruidos subterráneos). La erupción presentó explosiones que formaron la columna eruptiva. Existió emisión de lava por

ambos cráteres y se abrió una fisura en el flanco N. Se produjeron lahares hacia el Trifultriful, Calbuco, Captrén y Catril, los cuales destruyeron el puente sobre el Trifultriful y el puente Peuco en Melipeuco, mientras que en Captrén se llevó todos los puentes, dejando aislada esta zona. Hubo un muerto en esta ocasión, atrapado por el lahar. Además, el camino a la laguna Conguillío fue destruido en un tramo por 6 km debido a un lahar, que inundó en un metro toda esta extensión (Diario Austral de Temuco, 1956; Hantke, 1956, en Navarrete, 2017).

La segunda etapa, iniciada el 5 de junio hasta fines de dicho mes, presentó explosiones y una columna eruptiva que alcanzó en momentos hasta 3.000 m s.n.m., con dirección NNE. Producto de la actividad, se agrandó el cráter, dando paso a la generación de dos cráteres pequeños al interior de este. Hacia el 26 de junio se percibieron sismos volcánicos, que derivó en una fuerte explosión y emisión de lava hacia Cherquenco, produciendo un aumento del caudal del río Calbuco (Diario Austral de Temuco, 1956; Hantke, 1956, en Navarrete, 2017).

La tercera etapa comprende octubre de 1956, la cual presentó explosiones rítmicas cada un minuto en el cráter principal. Además, fueron eyectadas bombas tipo spatters, cayendo dentro del cráter (Diario Austral de Temuco, 1956; Hantke, 1956, en Navarrete, 2017).

1957: La actividad se presentó del 14 de enero hasta noviembre de 1957. Existió actividad precursora, tanto de ruidos subterráneos como sismos volcánicos. Presentó fisuras laterales hacia el N, E y SE en la pendiente del volcán, con fuentes de lava a altas tasas y generación de lahares con flujos de lava basáltica voluminosa. Igualmente, se puede describir en tres etapas (Delgado *et al.*, 2015 en Navarrete, 2017):

En la etapa 1, que comprende entre el 14 de enero al 19 de febrero, se produjeron ruidos subterráneos perceptibles hasta Victoria. También se percibieron sismos volcánicos. Se caracterizó por erupciones menores con débil emisión de ceniza (Diario Austral de Temuco, 1957; Hantke, 1959; Casertano, 1963, en Navarrete, 2017).

En la etapa 2, se intensificó la actividad eruptiva entre el 19 y 20 de febrero, registrando salida de lava. El día 21 de febrero se formó un lahar que bajó por el lado de Trifultriful, destruyendo un puente provisorio. Esto provocó que los ríos Trifultriful y Allipén cambiaran de curso generando inundaciones. Adicionalmente se cortaron los puentes entre Cunco - Collahuén, y Peuco - Villa García (Diario Austral de Temuco, 1957; Hantke, 1959; Casertano, 1963, en Navarrete, 2017).



En la etapa 3, el 22 de febrero a las tres de la mañana se reanudó la actividad. En el cráter principal se formó un nuevo cráter al interior de éste, el cual formó una columna eruptiva, la cual depositó una capa de cenizas hasta Temuco. Hubo emisión de vapor de agua y una colada de lava en el flanco N, que avanzó a una velocidad de ~6 km/hr. El día 23 se produjeron lahares que afectaron a Peuco. Finalmente, el día 24 de febrero cesó la actividad eruptiva, manifestando fumarolas en cráteres y fisuras. La caída de ceniza dejó una capa de 2 cm al pie del volcán. Sin embargo, producto de la lava, se produjeron incendios forestales que perduraron hasta fines de abril de 1957 en la zona de Captrén (Diario Austral de Temuco, 1957; Hantke, 1959; Casertano, 1963, en Navarrete, 2017).

#### 2.2.4.8. Erupción de 1994

En 1994, el volcán Llaima presentó un primer episodio eruptivo entre el 17 y 19 de mayo, y un segundo episodio entre el 25 y 30 de agosto (Navarrete, 2017).

##### 2.2.4.8.1. Erupción de Mayo

El 17 de mayo, alrededor de las 06:00 de la mañana, en el volcán comenzó una erupción estromboliana a subpliniana de IEV 2 (Global Volcanism Program, 1994a), con un fuerte componente freático (Moreno y Fuentealba, 1994).

Según Moreno y Fuentealba (1994), la erupción principal duró alrededor de 8 horas, y se inició por una fisura de rumbo N10°W de 500 m de largo que se abrió en el cráter principal con dirección SSW, presentando por lo menos 4 fuentes de lava. La expulsión de la lava alcanzó unos 200 m de altura y fluyó desde la fisura por debajo del glaciar W con dirección SSW, seguida de numerosas explosiones.

La interacción entre la lava y el glaciar causó un derretimiento violento y una fuerte vaporización, estimando al menos 3 a 4 millones de m<sup>3</sup> de hielo derretido producto del contacto con los flujos de lava. Considerando que el volumen de los flujos de detritos fue de 2,5 millones de m<sup>3</sup>, gran parte del agua liberada (2,4 a 3,2 millones de m<sup>3</sup>) podrían haber sido evaporados.

La columna eruptiva alcanzó los 4.000 m de altura sobre la cima del volcán. La columna principal fue vista a 80 km del volcán, incluso desde el lago Aluminé en Argentina.

Caída de tefra: La pluma de ceniza, tuvo una orientación NE, hacia las localidades de Cruzaco – Paso Icalma (Global Volcanism Program, 1994a; Navarrete, 2017), y a causa de los vientos

predominantes alcanzó una distancia de 300 km, generando depósitos en un área elíptica de 37680 km<sup>2</sup> aprox. (Delpino *et al.*, 1994 en Navarrete, 2017).

Navarrete (2017) señala que la columna eruptiva estuvo compuesta de gases, piroclastos y vapor. Las muestras recolectadas en el sector de Laguna Verde consisten en lapilli grueso y ceniza (53% SiO<sub>2</sub>). Por otro lado, en Cruzaco e Icalma se recolectaron muestras de ceniza, de tamaño fina a gruesa.

Lahares e inundaciones: Moreno y Fuentealba (1994) describen los lahares generados a partir de la actividad volcánica, donde el glaciar W -el más grande del volcán Llaima, de 17,2 km<sup>2</sup> de extensión, y un volumen equivalente en agua de 367x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>- presentó grietas con actividad humeante y explosiones más abajo del sitio de la erupción, indicando que hubo flujos de lava por debajo del hielo con dirección W, hacia los ríos Lanlán y Calbuco, en la comuna de Vilcún. El volumen estimado del lahar fue de 2,5 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

Efectos: 5 puentes y numerosos caminos fueron cortados por el flujo de detritos, actividad que provocó la evacuación de 59 personas y 7 guardaparques. Adicionalmente, el cementerio de Cherquenco fue cubierto parcialmente por los depósitos, y generó remoción de algunos sectores de tumbas (Moreno y Fuentealba, 1994).

#### 2.2.4.8.2. Erupción de Agosto

A ~5,4 km al W de la cumbre (Sector Los Paraguas) entre las 09:00 hr y 09:15 hr del 21 de agosto la población sintió dos terremotos de intensidad II y III (Global Volcanism Program, 1994b). El 25 de agosto se inició la erupción, la que se prolongó hasta la noche del 28 de dicho mes (23:00 hr), variando en intensidad. Navarrete (2017) señala que la erupción tuvo un IEV = 1, iniciada con explosiones menores en el cráter principal con emisiones de ceniza y ruidos subterráneos.

Según el Global Volcanism Program (1994b), el 25 de agosto, desde las 19:30 hacia la noche, la erupción aumentó en intensidad, expulsando gases y tefra incandescente hasta unos 500 m por encima de la cumbre, arrojando piroclastos sobre los flancos exteriores de esta.

El 29 de agosto a las 00:00 hr se produjo una violenta explosión informada por CONAF. Se formaron columnas de 300 a 800 m sobre el cráter las que, producto del viento W, se dispersaron a más de 80 km en dirección SE (Navarrete, 2017). Durante el mediodía, las emisiones piroclásticas

se reactivaron, descargando una columna continua a 1000 m por encima del cráter con explosiones cada 5 segundos ( $IEV = 2$ ) (Global Volcanism Program, 1994b).

Esta actividad fue principalmente magmática. Se comenzó a formar un cono de salpicadura que cubrió el suelo del cráter principal, producto del nuevo cráter, cuyas dimensiones son de 100 m de diámetro en la parte E del cráter principal (Global Volcanism Program, 1994b; Navarrete, 2017).

El día 30 continuó la emisión constante de ceniza fina desde el cráter principal, la columna alcanzó alturas oscilantes entre 2000 y 3700 m sobre el cráter. Entre las 16:03 y las 18:40 horas cesó la emisión constante de piroclastos, apareciendo intermitentemente bocanadas de vapor de agua y ceniza. Luego, a partir de las 21:30 hr hubo un cese de la actividad eruptiva. El cráter principal quedó tapado al igual que el cono de piroclastos que se formó al interior de éste durante la erupción (Navarrete, 2017).

#### 2.2.4.9. Erupción de 2007 – 2009

El ciclo eruptivo de 2007 – 2009 es el más importante registrado en este volcán luego de la erupción de 1955 – 1957 (Moreno *et al.*, 2009 en Franco *et al.*, 2019). Esta erupción presentó estilos eruptivos estrombolianos y hawaianos que generaron flujos de lava basálticos (~51%  $SiO_2$ ) y “spatters” o salpicaduras. Según la energía sísmica liberada los principales eventos dentro de este ciclo fueron los días 1 y 25 de enero de 2008 y el 3 de abril de 2009 (Franco *et al.*, 2019). Estos eventos fueron clasificados como fases paroxismales estrombolianas (Moreno *et al.*, 2009 en Franco *et al.*, 2019) y generaron lahares en los flancos del volcán.

Franco *et al.* (2019) define 10 fases eruptivas basadas principalmente en la energía sísmica de diferentes eventos eruptivos y enfocándose en las principales estructuras involucradas en el proceso, cuyas características se mencionan a continuación:

Fase 0 (2006 – 25 de mayo, 2007) y 1 (26 de mayo – 31 de diciembre, 2007): Actividad precursora caracterizada por un aumento en la sismicidad y explosiones con emisión de cenizas y, en menor medida, bombas.

Fase 2 (1 – 2 de enero, 2008): Corresponde a la fase más energética de todo el período eruptivo, con el desarrollo de una columna eruptiva de 12.500 m s.n.m. Esta fase paroxismal comenzó con una erupción violenta y repentina desde el cráter principal, con eyección de balísticos, gas y cenizas, seguido de efusión de lava y salpicaduras asociadas a fuentes de lava a ~450 m bajo el

cráter. Además, se generaron fracturas alrededor del cráter, principalmente en los flancos SE, SW y NE.

Fase 3 (3 – 21 de enero, 2008): Fase de baja energía post-eruptiva caracterizada por emisiones de ceniza y gas esporádicas con explosiones laterales desde las fracturas desarrolladas en la fase anterior en los flancos SE y SW del edificio. Debido a la intensa actividad estromboliana se generó un cono anidado dentro del cráter principal.

Fase 4 (22 de enero – 12 de febrero, 2008): Fase transicional entre eventos estrombolianos y hawaianos. El comienzo de esta se caracterizó por la reactivación de la actividad a través de explosiones moderadas con eyección de balísticos hasta 150 m sobre el cráter, además del desarrollo de pequeños flujos de lava. El cono generado en la fase anterior creció rápidamente y se formaron 3 nuevos conos de menor tamaño. Adicionalmente, flujos de lava “pahoehoe” fueron extruidos desde dos fisuras con orientación NE-SW. El período más energético de esta fase generó una columna eruptiva de 6.500 m s.n.m. y flujos de lava.

Fase 5 (13 de febrero – 26 de junio, 2008): Durante esta fase la actividad efusiva cesó y la actividad superficial consistió en emisiones de gas y explosiones de cenizas menores dentro del cráter, con alturas que no excedieron los 500 m sobre el cráter.

Fase 6 (27 de junio – 28 de julio, 2008): Este período mostró una reactivación de la actividad transicional estromboliana – hawaiana con 4 diferentes episodios eruptivos. Los eventos mostraron nuevamente la coexistencia de estilos eruptivos, incluyendo flujos y fuentes de lava. También se registraron explosiones y eyección de piroclastos, junto con la emisión de flujos de lava.

Fase 7 (28 de julio, 2008 – 30 de marzo, 2009): Se caracterizó por una actividad de baja energía sísmica continua, con emisiones débiles de gas desde el cono piroclástico. También fueron observadas 3 explosiones menores y emisiones de ceniza esporádicas.

Fase 8 (3 – 7 de abril, 2009): Fase eruptiva con actividad estromboliana – hawaiana. Presentó un segundo paroxismo con una erupción estromboliana con eyecciones de piroclastos a 700 m sobre el cráter y explosiones cada 3 segundos. Adicionalmente, flujos de lava comenzaron a extruir en el sector oeste del cráter y se formó una columna eruptiva de ~7.000 m s.n.m. A diferencia de las fases anterior, esta fue precedida por actividad tectónica local con 2 “clusters” de sismos diferentes: uno con 13 eventos localizados a 18 km al sur del cráter y otro con 12 localizados a 13 km al este.

Fase 9 (7 de abril – diciembre, 2009): Se caracterizó por una disminución de la actividad eruptiva, la cual consistió principalmente en emisiones de gas y de ceniza que alcanzaron alturas de 300 m sobre el cráter, junto a incandescencia esporádica. Esta incandescencia y emisiones de gases decrecieron con el tiempo. Hasta finales del 2009 fueron observadas emisiones de gas continuas en la cumbre y a lo largo de las fracturas de los flancos.

## 2.3. Volcán Lonquimay

### 2.3.1. Generalidades

Las erupciones correspondientes al Complejo Volcánico Lonquimay (CVL) han sido efusivas a explosivas, de magnitudes moderadas a grandes, de tipo estromboliano a pliniano e índices de explosividad volcánica probables de 2 – 4 (Moreno y Gardeweg, 1989). Las lavas correspondientes al cráter principal son principalmente andesitas basálticas, mientras que las rocas pertenecientes a los conos monogénéticos son andesitas basálticas y andesitas (Polanco, 2010).

Moreno y Gardeweg (1989) indican que aun cuando el cono principal es claramente visible desde la Depresión Central, y a pesar de estar rodeado de diversos poblados, existen pocos antecedentes respecto a su actividad histórica.

### 2.3.2. Rocas del Basamento e Intrusivas

Se emplaza sobre una serie de rocas estratificadas e intrusivas, de edades definidas entre el Cretácico al Pleistoceno Inferior. Las más antiguas de estas corresponden a secuencias volcánicas pertenecientes al Complejo Volcánico Vizcacha – Cumilao, de edad Cretácico – Paleógeno. Sobre esta se encuentra la Formación Curamallín, con una edad comprendida entre el Mioceno inferior al Mioceno medio. Seguidamente, se emplaza el Grupo Plutónico Melipeuco, correspondiente a rocas graníticas, de edad Mioceno, e intrusivos hipabisales de edades Mioceno - Plioceno. Finalmente, sobre las rocas anteriormente nombradas, se ubica la Formación Malleco, de edad Plioceno – Pleistoceno inferior (Suárez y Emparán, 1997) (Figura 2.3).



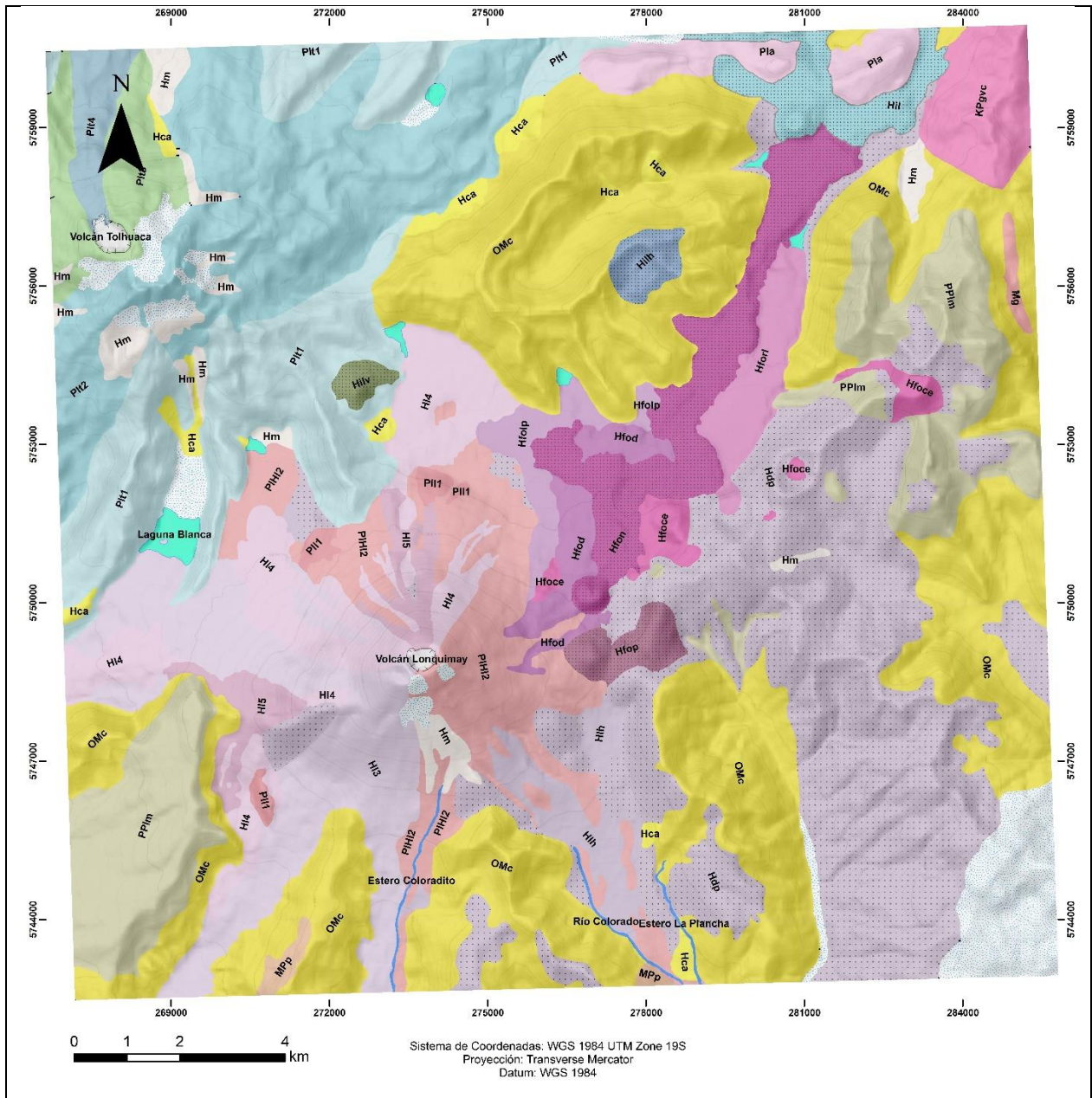


Figura 2.3 Mapa Geológico del Volcán Lonquimay. Digitalizado por Josefa Velásquez en la Asignatura de Tópicos Avanzados de Geología (2017) con base en el mapa geológico del Volcán Lonquimay (Moreno *et al.*, 2012). Leyenda en la página siguiente.



Leyenda de la Figura 2.3

### 2.3.3. Rocas y Depósitos Volcánicos

Está conformado por el estratovolcán Lonquimay o cono principal, y una cadena de centros adventicios de menor tamaño ubicados hacia el oriente a lo largo de una fisura noreste-suroeste denominada “Cordón Fisural Oriental”. Según criterios morfológicos y estratigráficos se distinguen 5 unidades cronoestratigráficas, denominadas en orden decreciente de edad como Lonquimay 1 – 5 (Figura 2.3). La composición de estas es basáltica a andesítica (Moreno y Gardeweg, 1989).

#### 2.3.3.1. Unidad Lonquimay 1 (Pleistoceno Superior)

Corresponde a lavas andesíticas y basálticas que afloran discontinuamente el pie sureste y noroeste del cono principal, y a una secuencia volcánica estratificada subhorizontal de 400 m de espesor,

que forma parte del cordón fisural. Los escasos afloramientos de esta unidad son producto de la intensa erosión glaciaria (Moreno y Gardeweg, 1989).

#### 2.3.3.2. Unidad Lonquimay 2 (Pleistoceno Superior – Holoceno temprano)

Corresponde a emisiones post-glaciales de lavas y piroclastos andesítico-basálticos, con morfología “aa”. Forma gran parte de la ladera oriental y del cráter del cono principal, además incluye pequeños afloramientos de lavas andesítico-silíceas en la ladera noroeste del cordón fisural. Subyace a depósitos morrénicos neoglaciales y a la unidad Lonquimay 3 (Moreno y Gardeweg, 1989).

#### 2.3.3.3. Unidad Lonquimay 3 (Holoceno Temprano)

Representada por flujos de lava andesíticos, emitidos desde el cráter central y cráteres secundarios hacia los flancos noreste y sur del cono principal. Las coladas son de tipo “aa” y de bloques, se encuentran bien conservadas, con erosión glaciaria incipiente sólo en la cima. Esta unidad se encuentra parcialmente cubierta por la Unidad Lonquimay 4 (Moreno y Gardeweg, 1989).

#### 2.3.3.4. Unidad Lonquimay 4 (Holoceno)

Coladas de lava muy bien conservadas, emitidas desde el cráter principal hacia los flancos oeste y norte. También forma parte de esta unidad una colada menor generada desde una cadena de cráteres menores en el flanco oeste. Los espesores de estas lavas alcanzan hasta 8 km en su frente (Moreno y Gardeweg, 1989).

#### 2.3.3.5. Unidad Lonquimay 5

Representada por coladas “aa” y de bloques de las erupciones históricas de 1853 y 1887 - 1889. Las lavas fueron emitidas del cráter principal como de una fisura ubicada en el flanco occidental del volcán, son de composición (Moreno y Gardeweg, 1989).

#### 2.3.4. Actividad Eruptiva Histórica

La actividad prehistórica, que se infiere del registro cronoestratigráfico, a juzgar por los materiales emitidos, sugiere que las erupciones han sido efusivas a explosivas, de magnitudes moderadas a grandes, de tipo estromboliano a pliniano, con índices de explosividad volcánica probables de 2 - 4 (Moreno y Gardeweg, 1989).

La actividad histórica, basada en los antecedentes bibliográficos que describen las erupciones en el pasado y presente siglo indican, a lo menos, 5 eventos históricos desde el año 1853, donde el último de estos ocurrió en los años 1988 – 1989, y dio paso a la formación de un cono en el flanco oriental del volcán, denominado “Cono Navidad” (Von Wolff, 1929; Stone e Ingerson, 1934; “Zeischrift für Volcanologie, 1935; Brüggén, 1950; Casertano, 1963 en Moreno y Gardeweg, 1989). Polanco (2010) indica que la información eruptiva documentada para el Lonquimay es escasa y fragmentada (Tabla 2.3)

Tabla 2.3 Resumen de la cronología eruptiva histórica del Vn. Lonquimay (modificado de Petit-Breuilh, 2004). ~T: tiempo de reposo (Klein, 1982), A: altura de la columna y IEV: índice de Explosividad Volcánica (Newhall y Self, 1988). Se indica con una “X” cuando se detectaron fenómenos de S: sismicidad, R: ruidos subterráneos, C: colada de lava y P: piroclastos.

Fecha erupción		$\Delta t$	Características eruptivas					
Inicio	Final		A (m)	VEI	S	R	C	P
12/1852	02/1853		> 3000	3			X	X
02/06/1887	01/1890	34	> 2000	2	X	X		X
04/01/1933	04/1933	43	> 2000	2	X	X	X	X
02/1940		7	< 1000					?
25/12/1988	24/01/1999	48	9000	3	X	X	X	X

#### 2.3.4.1. Erupción de 1853

Erupción del Volcán Lonquimay. Se caracterizó por fuertes explosiones, proyección de material piroclástico y derrames de lava.

#### 2.3.4.2. Erupción de 1887 – 1889

Erupción del Cordón Fisural Oriental y Volcán Lonquimay (?). Caracterizada por un violento ciclo eruptivo con proyección de material piroclástico y grandes emisiones de lavas de bloques.

#### 2.3.4.3. Erupción de 1933

Erupción del Volcán Lonquimay. Se observó erupción de piroclastos.

#### 2.3.4.4. Erupción de 1940

Erupción del Volcán Lonquimay. Se desarrolló una fumarola o erupción de piroclastos (?).



#### 2.3.4.5. Erupción de 1988 –1989

Ciclo eruptivo precedido por una intensa actividad sísmica, con el registro de hasta 92 eventos entre el 22 y el 25 de diciembre de 1988. Caracterizada por una erupción estromboliana explosiva con índices de explosividad volcánica que variaron entre 2 - 3, hasta 1 en algunos momentos de la erupción. Se caracterizó por el desarrollo de un nuevo cono en el flanco oriental del Volcán Lonquimay, denominado “Cono Navidad”. Los flujos de lava viscosa formaron coladas tipo bloque, las cuales avanzaron en gorma general hacia el noreste, inundando el valle del río Lolco, mientras que la altura máxima que alcanzó la columna fue de 9000 m. Esta generó, además de las coladas de lava, proyección de bombas, lapilli, abundante ceniza y fuerte desgasificación. Por otra parte, no se registraron lahares importantes.

### 2.4. Volcán Mocho – Choshuenco

#### 2.4.1. Rocas del Basamento e Intrusivas

Se dispone sobre un basamento compuesto por rocas metamórficas, estratificadas e intrusivas. La más antigua de estas unidades corresponde al Complejo Metamórfico Trafún, de edad Devónico - Carbonífero. Sobreyace a este la Formación Panguipulli, del Triásico Superior, la cual se encuentra cubierta por rocas de los Estratos de Lago Ranco, asignados entre el Oligoceno y Mioceno. Sobre la unidad anterior en discordancia, se ubican las Secuencias Volcánicas Indiferenciadas, de edades comprendidas entre el Pleistoceno inferior al Pleistoceno medio. Además, hay presencia de rocas intrusivas como el Batolito Futrono -Riñihue (Carbonífero Superior – Pérmico Inferior), Plutón Panguipulli (Jurásico), Plutón Choshuenco (Cretácico Inferior), y finalmente los granitoides y pórfidos miocenos (Moreno y Lara, 2007).

#### 2.4.2. Rocas y Depósitos Volcánicos

Según criterios geológicos, morfoestructurales y geocronológicos, se han reconocido 5 unidades evolutivas en el edificio principal del Volcán Mocho y 2 unidades en el estratovolcán Choshuenco. Además, existen cerca de 40 centros adventicios organizados en dos grupos distribuidos sobre sus flancos noreste y suroeste, denominados Ranquil (4 conos) y Caunahue (13 conos), respectivamente, además del Grupo Fui (25 conos) y volcanes Chanchán (3 o 4 conos) al noreste (Rawson *et al.*, 2015) (Figura 2.4). Las edades de estos depósitos están comprendidas entre el Pleistoceno medio y erupciones históricas (Moreno y Lara, 2007).



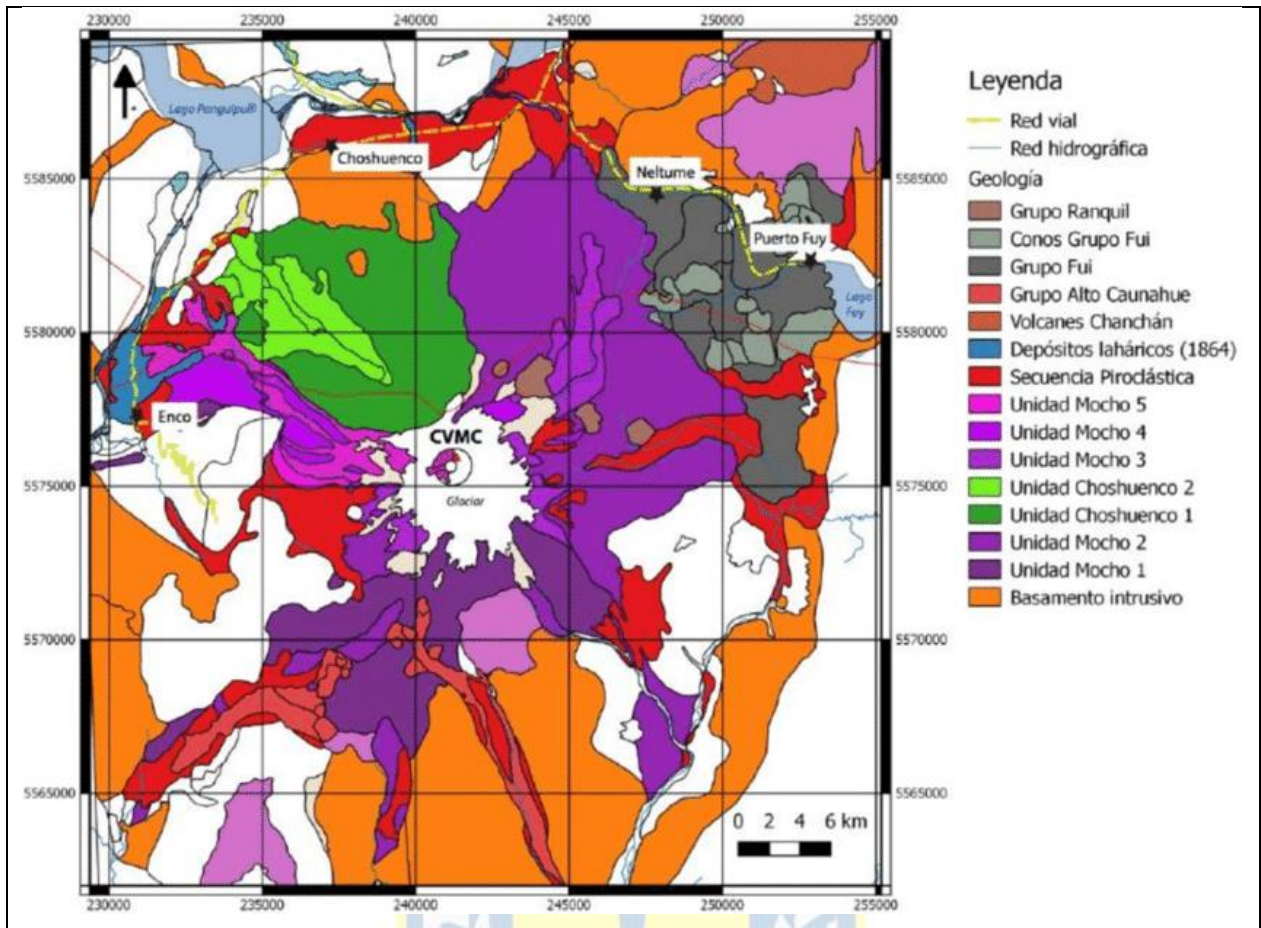


Figura 2.4 Mapa Geológico del Volcán Mocho-Choshuenco. Extraído del Informe “Estudio de Riesgo del Volcán Mocho-Choshuenco” (inédito, adaptado de Moreno y Lara, 2007).

### 2.4.2.1. Unidades Evolutivas del Volcán Choshuenco

#### 2.4.2.1.1. Unidad Choshuenco 1 (Pleistoceno Medio)

Secuencia de fuerte manto radial al O y N, que alcanza sobre 1000 m de espesor en el sector noroccidental del complejo volcánico y que constituye el edificio principal del volcán Choshuenco. Forma parte de la secuencia pre-caldera del complejo y presenta intensa erosión glacial en su cima y en sus flancos superiores. Está constituida, principalmente, por lavas ‘aa’ andesítico - basálticas a andesíticas (52 - 59% SiO<sub>2</sub>) y, en menor proporción, por coladas de bloques andesítico - silíceas y dacíticas de olivino y piroxeno (62-68% SiO<sub>2</sub>).

#### 2.4.2.1.2. Unidad Choshuenco 2 (Pleistoceno Superior)

Conjunto de lavas expuestas en el flanco noroeste del volcán Choshuenco y emitidas desde dos centros laterales localizados a 1750 y 1850 m s.n.m., respectivamente. Las coladas, principalmente de bloques, tienen una longitud de hasta 7 km, espesores medios de 20 m y formas distales lobuladas con frentes de hasta 30 m. Estas lavas presentan composiciones principalmente andesíticas y dacíticas (59 - 66% SiO<sub>2</sub>).

#### 2.4.2.2. Unidades Evolutivas del Volcán Mocho

##### 2.4.2.2.1. Unidad Mocho020 1 (Pleistoceno Medio)

Sucesión de lavas, conglomerados volcánicos y tobas con suave manteo radial hacia el suroeste y sureste dispuesta, predominantemente, en la sección S del complejo volcánico y que constituye la secuencia más antigua del edificio volcánico. Presenta intensa erosión glacial y alcanza espesores de hasta 750 m. Está constituida principalmente por lavas andesítico - basálticas a andesíticas de olivino y piroxeno (52 - 59% SiO<sub>2</sub>), de 10 a 30 m de espesor, con abundantes intercalaciones de conglomerados volcánicos y algunas tobas. En algunos sectores, diques andesítico - basálticos y dacíticos de olivino y piroxeno (55 - 65% SiO<sub>2</sub>) cortan la secuencia principal o alimentan coladas menores.

##### 2.4.2.2.2. Unidad Mocho 2 (Pleistoceno Medio – Superior)

Sucesión de lavas con intercalaciones volcanoclásticas, en especial tobas y brechas, además de conglomerados volcánicos, con inyecciones filoneanas y lacolíticas. Esta unidad presenta suave manteo radial divergente y está expuesta preferentemente en los flancos oriental y nororiental del complejo volcánico, donde forma gran parte de la secuencia pre-caldera del edificio volcánico. En el flanco oriental, esta secuencia alcanza aproximadamente 500 m de espesor y se reconocen tres subunidades sucesivas. Esta subunidad está cubierta, a su vez, por un paquete de lavas con espesores entre 5 y 40 m, de tipo 'aa' y bloques, profusamente intruida por diques y un extenso cuerpo lacolítico de aproximadamente 200 m de espesor.

Forman parte de esta unidad, coladas aisladas dispuestas en los flancos distales del edificio principal, en los valles de los ríos Caunahue, Florin y Pillanleufu en el sector Sur del complejo. Estas últimas habrían sido emitidas desde centros eruptivos de flanco. La unidad presenta intensa

erosión glacial, alcanza localmente espesores superiores a 600 m y está constituida por andesitas basálticas a dacitas de olivino y piroxeno (52 - 68% SiO<sub>2</sub>).

#### 2.4.2.2.3. Unidad Mocho 3 (Pleistoceno Superior)

Conjunto de lavas con suave manteo radial divergente, expuesto principalmente en la periferia de la caldera, en los sectores nororiental y suroccidental y que forma la sucesión estratificada terminal de la secuencia pre-caldera del complejo volcánico. Estas coladas rellenan, parcialmente, valles del flanco alto del edificio principal y corresponden a lavas andesíticas y dacíticas de piroxeno (56 - 66% SiO<sub>2</sub>), localmente con texturas de mezcla. Las lavas más extensas del flanco NE alcanzan una longitud de 8 km, son de tipo 'aa' y de bloques, con formas lobuladas y espesores de varias decenas de metros. En la parte alta, las lavas presentan fracturamiento tipo '*hackle joints*' que indicaría emplazamiento bajo cuerpos de hielo (Lescinsky y Fink, 2000), además de intensa erosión glacial en su superficie. Están cubiertas por depósitos morrénicos recientes, asociados a los lóbulos del glaciar en retroceso. La edad máxima de esta unidad es desconocida, aunque de acuerdo con las edades mínimas de las unidades precedentes se puede considerar como enteramente intraglacial. Con posterioridad a esta unidad, el estratovolcán ancestral habría sufrido el colapso del edificio y se habría generado la caldera. Esta etapa habría ocurrido aun durante la última glaciación (> 14 ka) y, en consecuencia, los depósitos piroclásticos asociados al colapso se habrían emplazado, tanto sobre el hielo en las áreas distales como dentro de la depresión calderico (Moreno y Lara, 2007).

#### 2.4.2.2.4. Unidad Mocho 4 (Holoceno)

Conjunto de lavas expuestas, principalmente, en el sector occidental y en algunos lugares altos del flanco oriental del complejo volcánico. Forma parte de la secuencia de coladas postcaldera emitidas, tanto desde centros de emisión en el interior de la caldera como desde los flancos a través de pequeñas fisuras. Además, representarían la primera etapa de construcción del cono moderno. Corresponden principalmente a coladas de tipo 'aa' andesítico - basálticas (52 - 55% SiO<sub>2</sub>) y lavas de bloque andesíticas - silíceas a diacríticas (60 - 67% SiO<sub>2</sub>), con formas lobuladas y espesores de hasta 25 m, sin rasgos de erosión glacial.

#### 2.4.2.2.5. Unidad Mocho 5 (Holoceno tardío e Histórico)

Conjunto de lavas que representan las emisiones más recientes del CVMCH, además de aglomerados volcánicos (roca piroclástica con bombas >75% en volumen del depósito) que forman

el cono central volcán Mocho, depósitos de piroclásticos de flujo, oleada y caída, depósitos laháricos y lavas emitidas en tiempos históricos. Los derrames de lavas corresponden principalmente a coladas de tipo ‘aa’ y de bloques, de composición andesítica a dacítica (57 - 64% SiO<sub>2</sub>). Esta unidad incluye una colada dacítica de bloques, que alcanza una longitud de 4 km, con un espesor medio de 30 m, emitida desde un centro eruptivo lateral ubicado en el flanco occidental, inmediatamente al N del cráter Tumba del Buey, extruida durante la erupción histórica del año 1864 (Moreno y Lara, 2007). Las coladas indiferenciadas, que también pertenecen a esta unidad, presentan una longitud de hasta 11 km y son de tipo ‘aa’ en los sectores proximales, variando a lavas de bloques hacia los extremos distales, con frentes de hasta 20 m de espesor. Las coladas más antiguas de esta unidad presentan, localmente, solo una delgada cubierta de piroclastos que corresponde a la parte superior de la secuencia piroclástica Holocena (Moreno y Lara, 2007).

#### 2.4.3. Actividad Eruptiva Histórica

En el área de estudio existe registro de actividad eruptiva en tiempos históricos solo en el volcán Mocho y en conos adventicios del mismo. Lo anterior es consistente con la profunda erosión que presenta el volcán Choshuenco y las edades radiométricas reportadas que indican que este no ha mostrado actividad durante el post-glacial (Holoceno).

Se han registrado 4 erupciones históricas desde 1759 (Rawson *et al.*, 2015), la última y más violenta de ellas ocurrida en 1864 (Moreno y Lara, 2007) y 6 eventos con depósitos bien preservados, por la magnitud del evento (Rawson *et al.*, 2015). Existen también otros 19 depósitos, que presentan un menor grado de preservación (Rawson *et al.*, 2015). El recuento total de los eventos eruptivos del Holoceno provenientes del Mocho-Choshuenco indica, según Gardeweg (2010) una periodicidad de 140-180 años, la que disminuye a 90 años en los últimos 2000 años. Rawson *et al* (2015) estima una frecuencia eruptiva de 440 años para eventos de magnitud igual o superior a 3, pero sugiere que, basado en las dataciones de los niveles de la Unidad Mocho 5 y el comportamiento de los últimos 1,7 ka, las erupciones explosivas ocurren cada 150 años.

##### 2.4.3.1. Erupción de 1759

Erupción explosiva. Se registró actividad eruptiva en el volcán Valdivia, el cual correspondería al actual volcán Mocho (Mapa de León Garavito, 1759 en Gardeweg, 2010). Índice de Explosividad Volcánica (IEV): 2



#### 2.4.3.2. Erupción de 1777

Erupción explosiva. En el mapa de Tomás López (1777 en Gardeweg, 2010), el volcán Valdivia (volcán Mocho) aparece con "llama". IEV: 2.

#### 2.4.3.3. Erupción de 1822

Erupción estromboliana, deducido de descripción realizada por Goll (1904 en Gardeweg, 2010): “reventaron con gran violencia y luego volvieron a su estado habitual de quietud” (Caldeleugh, 1855 en Gardeweg, 2010). IEV: 2

#### 2.4.3.4. Erupción de 1864

Principal erupción histórica registrada en este volcán. Según los antecedentes recopilados por Petit-Breuilh (2004) de Vidal Gormaz (1869 en Gardeweg, 2010), la erupción habría durado “muchos días”. Rawson indica que el año 1863, ocurrió un evento precursor a este. Los relatos indican que “por las quebradas del volcán corrían arroyos de fuego” los que fueron interpretados como flujos piroclásticos por Petit-Breuilh (2004). Lo anterior se ve corroborado por la presencia de fragmentos de cerámica indígena dentro de depósito a orillas del lago Panguipulli (Moreno y Lara, 2007). La erupción estuvo acompañada de ruidos subterráneos y actividad sísmica (“fuerte sacudón”). Causó que se elevara el nivel de los lagos, en particular en el lago Rinihue. Tradición oral más reciente indica que esta erupción habría acabado con la población indígena de los alrededores, salvándose solo un “robusto mocetón mapuche” que huyó en canoa hacia Panguipulli, aunque en su huida del río Enco hacia el lago volcó su embarcación y murió quemado por las aguas “que hervían” como resultado de la erupción (Bernales, 1990 en Gardeweg, 2010). Durante esta erupción se generó, además de flujos piroclásticos, una colada de lava dacítica emitida desde un centro eruptivo lateral ubicado en el flanco occidental, inmediatamente al N del cráter Tumba del Buey. Esta colada alcanza una longitud de 4 km con un espesor medio de 30 m. Depósitos laháricos asociados a este evento han sido descritos por varios autores. Corresponden a depósitos no consolidados con abundantes fragmentos tamaño grava, mal seleccionados y ricos en matriz arenosa. Reconocidos principalmente en el sector de Enco, río Enco y estero Punahue. Ellos constituyen el extenso relleno de superficie plana en el sector de Enco, en el valle del río homónimo, y se les reconoce también en el valle del estero Punahue, donde este último descarga en el valle del río Llanquihue (Moreno y Lara, 2007). Rawson describe el nivel de caída como un depósito de escorias tamaño lapilli, de



buena selección, con un espesor máximo de 47 cm y espesor mínimo de 8 cm a 11 km de la cumbre; cerca del edificio, se encuentran bombas de hasta 20 cm y en las orillas del lago Panguipulli aflora un depósito de flujo piroclástico con fragmentos de cerámica mapuche (Rawson *et al.*, 2015).

## 2.5. Volcán Tolhuaca

### 2.5.1. Generalidades

Las lavas que componen este volcán son, principalmente, macizas andesíticas y andesítico-basálticas, todas de carácter calcoalcalino (Figura 2.5; Bertin, 2010). La actividad eruptiva Holocena, incluye sólo tres eventos relativamente antiguos entre 8.050 y 6.590 A.P., pero de explosividad importante (IEV = 3 - 4), y actualmente su única anomalía ha sido actividad fumarólica débil en la cima (Polanco *et al.*, 2000).

### 2.5.2. Rocas del Basamento e Intrusivas

Las rocas que conforman el basamento corresponden a intrusivos de edades que van desde el Jurásico al Mioceno, las que constituyen el zócalo cristalino, y secuencias de rocas estratificadas de origen volcánico y sedimentario, de edades entre el Jurásico y el Plioceno, las que conforman la cobertura Meso – Cenozoica (Figura 2.5; MYMA, 2012).

### 2.5.3. Rocas y Depósitos Volcánicos

Se reconocen rocas volcánicas y volcanoclásticas, de edades comprendidas entre el Plioceno y el Holoceno, que corresponden en su mayor parte a lavas andesíticas y basálticas, además de depósitos fragmentados como tobas, capas de pómez, escoria y, localmente, niveles de brechas relacionadas con eventos laháricos (MYMA, 2012).

#### 2.5.3.1. Rocas Volcánicas Cuaternarias del Volcán Tolhuaca

Rocas volcánicas y volcanoclásticas las que corresponden en su mayor parte a lavas andesíticas grises a negruzcas, frescas a moderadamente alteradas; y lavas basálticas. Estas presentan sectores de grano fino correspondientes a los niveles interiores de los flujos y flujos marginales (base y techo), amigdaloidales y brechosos. Además, hay presencia de depósitos fragmentados, tales como, tobas de lapilli, capas de pómez, escoria y, localmente, niveles volcanoclásticos de brechas con

matriz verdosa y fragmentos volcánicos rojizos, relacionados con eventos de lahares (MYMA, 2012).

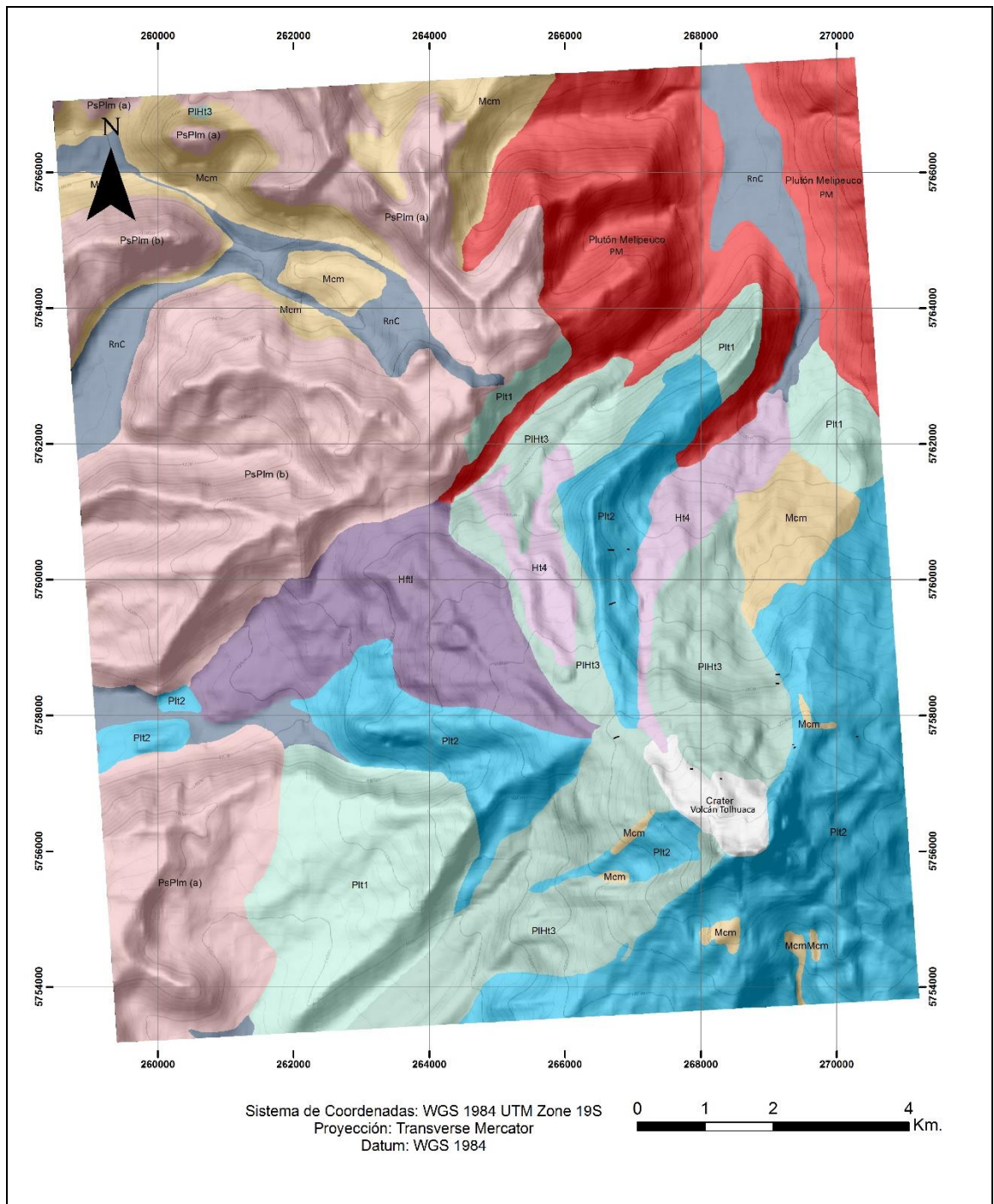


Figura 2.5

Mapa Geológico del Volcán Tolhuaca. Digitalizado por Belén Cartes en la Asignatura de Tópicos Avanzados de Geología (2017) con base en el mapa geológico elaborado por MYMA (2012). Leyenda en la página siguiente.

Leyenda	
	Crater
Litología	
	RnC Rocas Sedimentarias no Consolidadas
	Ht4 Rocas Volcánicas Recientes
	HRJ Rocas Volcánicas Holocenas
	PlHt3 Rocas Volcánicas
	Plt2 Rocas volcánicas
	Plt1 Rocas Volcánicas
	PsPim (b) Formación Malleco
	PsPim (a) Formación Malleco
	Mcm Formación Cura Mallín
	PM Plutón Melipeuco

Leyenda de la Figura 2.5

### 2.5.3.2. Rocas Sedimentarias No Consolidadas

Secuencias de gravas, arenas y limos asociadas a depósitos morrénicos superficiales, depósitos tipo lahares y depósitos aluviales. Se encuentran asociadas a los valles de los ríos Blanco y Tolhuaca. Además, se reconocen depósitos de flujos laháricos, flujos de detritos y aluviales (MYMA, 2012).

### 2.5.4. Actividad Eruptiva Histórica

La actividad eruptiva Holocena, incluye sólo tres eventos relativamente antiguos entre 8050 y 6590 A.P., pero de explosividad importante (IEV = 3 - 4), y actualmente su única anomalía ha sido actividad fumarólica débil en la cima (Polanco *et al.*, 2000). El volcán no ha registrado actividad eruptiva durante los últimos 6500 años (Polanco, 1998).

## 2.6. Volcán Villarrica

### 2.6.1. Generalidades

En términos históricos, el tipo de erupción característico para el macizo es el de tipo estromboliano, con columnas de emisión de hasta 5 km de altura (sobre el cráter), con eyección de piroclastos, pero no necesariamente con emisión de lava (Petit-Breuilh y Lobato, 1994). Además de lo anterior, ha presentado erupciones de tipo hawaianas y eventualmente subplinianas (Moreno, 1993; Moreno y Clavero, 2006). En cuanto a su composición, ha emitido productos principalmente basálticos a andesítico-basálticos (50% - 58% SiO<sub>2</sub>), en forma de lavas, piroclastos escoriáceos y flujos



piroclásticos (Figura 2.6; Clavero y Moreno, 2004; Moreno y Clavero, 2006). La actividad eruptiva histórica a partir de 1558 muestra 60 eventos para el Volcán Villarrica (Petit-Breuilh y Lobato, 1994, donde la mayoría de las erupciones presentan un IEV = 2, que corresponden a eventos más bien moderados.

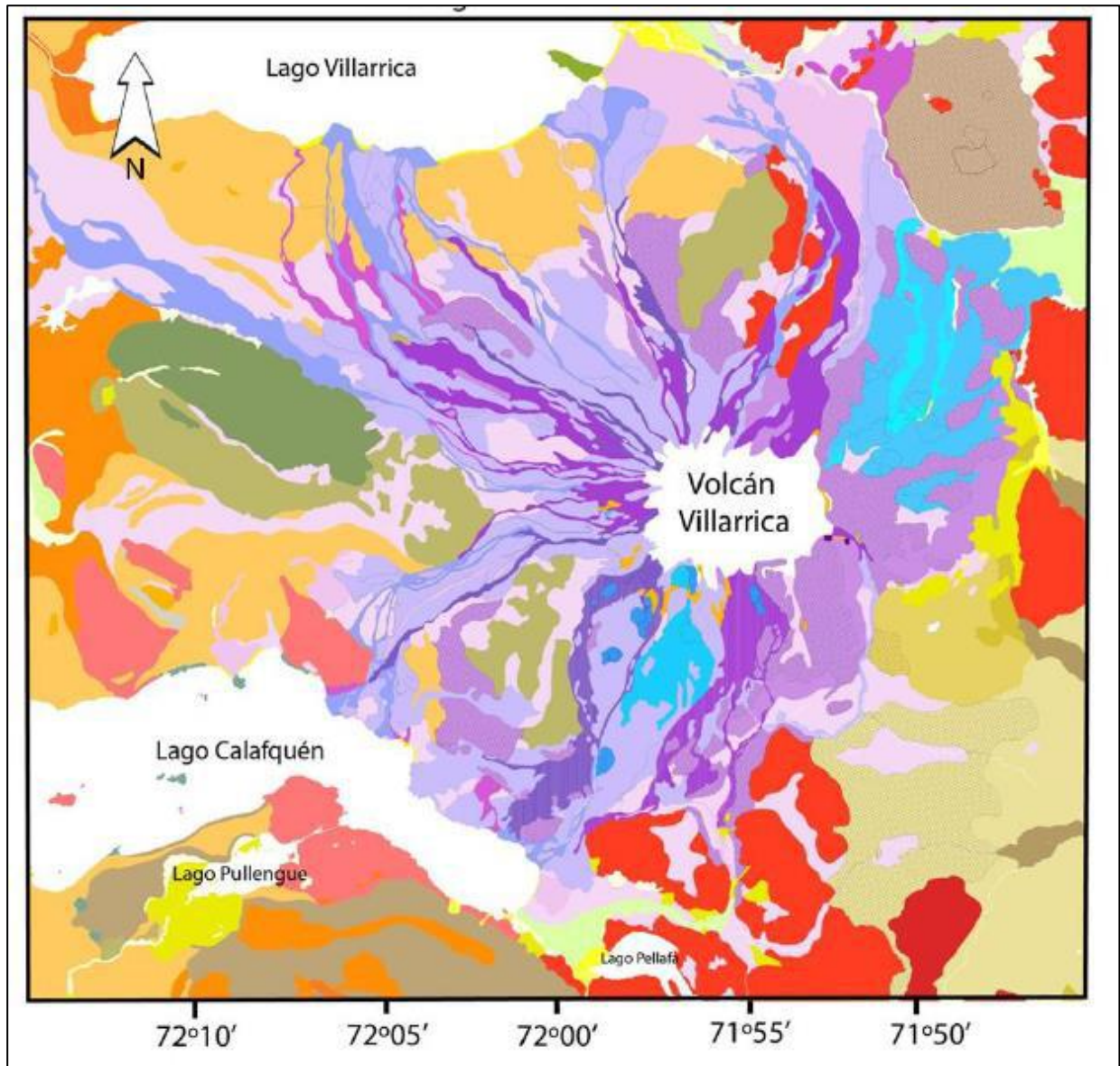
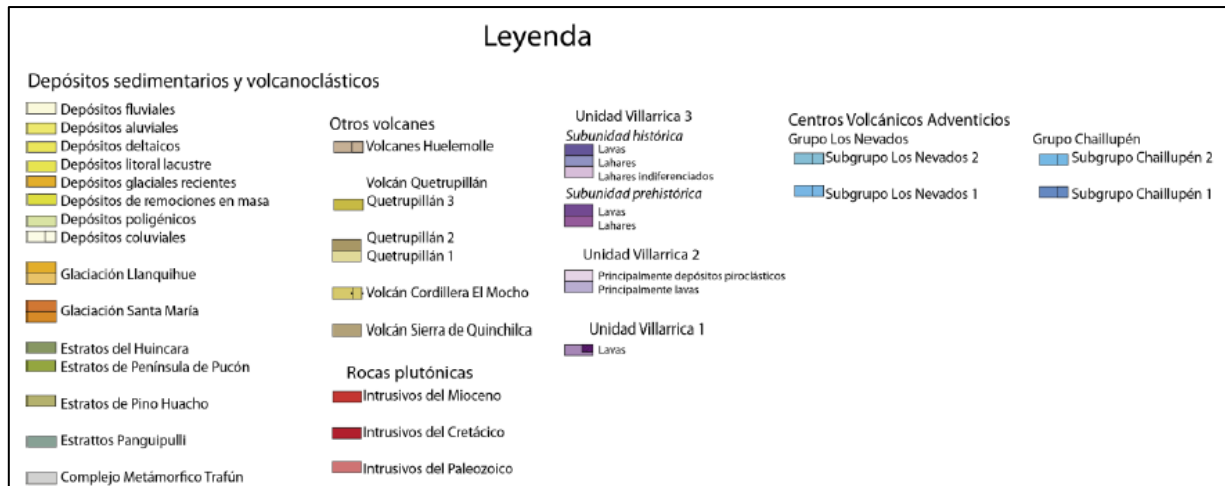


Figura 2.6

Mapa Geológico del Volcán Villarrica. Modificado de la carta geológica de Moreno y Clavero (2006) en Bono (2014). Leyenda en la página siguiente.



Leyenda de la Figura 2.6

### 2.6.2. Rocas del Basamento e Intrusivas

Se dispone sobre un basamento compuesto por rocas estratificadas, intrusivas y metamórficas, con edades en el rango comprendido entre el Paleozoico y el Pleistoceno. La unidad más antigua corresponde al Basamento Metamórfico, que se extiende desde el Paleozoico al Carbonífero. Sobreyaciendo a las rocas anteriores, se dispone la Formación Panguipulli, asignada al Triásico Superior; los Estratos de Pino Huacho, Península de Pucón y Huincara, de edades comprendidas entre el Oligoceno y el Pleistoceno. Además, se reconocen cuerpos intrusivos de distintas litologías, con edades desde el Paleozoico y el Mioceno (Moreno y Clavero, 2006).

### 2.6.3. Rocas y Depósitos Volcánicos

Se reconocen tres unidades evolutivas basadas en rasgos estratigráficos, geomorfológicos, estructurales y geocronológicos, las cuales se denominan Unidad Villarrica 1, 2 y 3 (Figura 2.6), con edades comprendidas entre el Pleistoceno medio y el Reciente, en orden decreciente. La composición de sus productos es, predominantemente, basáltica a andesítica, reconociéndose también diques de composición dacítica (Moreno, 1993).

#### 2.6.3.1. Unidad Villarrica 1 (Pleistoceno Medio – Superior)

Corresponde a la unidad más antigua del volcán, de edad pleistocena media hasta 13850 años A.P. y consiste en una sucesión de 500 m de lavas, brechas volcanoclásticas (laháricas y piroclásticas), aglomerados, algunas tobas ignimbríticas, con composición basáltica a andesítica, y algunas



intrusiones de diques dacíticos, lacolitos y pequeños domos (Clavero y Moreno, 2004). Esta unidad sobreyace en inconformidad a granitoides de edad Miocena (Munizaga *et al.*, 1988), y rocas volcanoclásticas cenozoicas. La Unidad Villarrica 1, aflora en las partes bajas de todos los flancos del volcán, pero principalmente hacia E, SE y N (Clavero y Moreno, 2004). Moreno y Clavero (2006), han dividido esta unidad en dos subunidades separadas por un evento eruptivo mayor que generó el colapso parcial del edificio construido en la primera etapa. Ésta corresponde a la etapa de construcción del edificio ancestral de volcán Villarrica, el que habría comenzado a edificarse hace unos 600 ka hasta la formación de una primera caldera hace unos ca. 100 ka. Se inicia con la emisión de lavas basálticas a andesítica basálticas, acompañadas de brechas piroclásticas, tanto de caída como de flujo, y de numerosos depósitos laháricos. Éstos últimos tienen espesores de 2 a 5 m, y corresponden a brechas mono a polimícticas con fragmentos subredondeados a subangulosos, de hasta 1,5 m de diámetro inmersos en una matriz arenosa sin mayores estructuras. Las lavas y depósitos de esta unidad se encuentran muy afectados por erosión glacial y por un colapso que generó una caldera de unos 6,5 por 4,2 km de diámetros (Caldera 1) (Moreno y Clavero, 2006).

Post caldera 1, comienza una segunda etapa de construcción de este edificio ancestral, la que se inicia con la formación de domos dacíticos (64,5% SiO<sub>2</sub>; Clavero y Moreno, 2004), y la inyección de filones y diques de la misma composición. Esta etapa se extiende hasta los 13,9 ka, lo que sumado a otros antecedentes sugieren que el volcanismo en esta época está comprendido, al menos, entre los 95 ka y los 13,9 ka, es decir, previo y durante la glaciación Llanquihue, y que la actividad fue tanto efusiva como explosiva (Clavero y Moreno, 2004; Gaytán *et al.*, 2005; Gaytán *et al.*, 2006).

#### 2.6.3.2. Unidad Villarrica 2 (Pleistoceno Superior – Holoceno)

Corresponde a una sucesión de depósitos piroclásticos, laháricos y lavas emitidos desde los 13850 años A.P. (Ignimbrita Licán) hasta los 3700 años A.P. (Ignimbrita Pucón). Esta unidad revela una etapa evolutiva altamente explosiva (Moreno, 1993). La Ignimbrita Licán cubre un área aproximada de más de 1000 km<sup>2</sup>, con un volumen estimado de 10 km<sup>3</sup> (Clavero, 1996), encontrando depósitos a más de 40 km del volcán (Clavero y Moreno, 1994; Clavero, 1996). Corresponde al primer evento postglacial explosivo del volcán y una de las mayores erupciones de toda su historia. Restos de carbón otorgaron edades de 14320 y 13690 años A.P. Su composición es andesítico - basáltica (54,5 - 57% SiO<sub>2</sub>; Clavero, 1996).

Posteriormente, una serie de erupciones tranquilas y explosivas fueron producidas, tanto por el conducto central como por conos piroclásticos parásitos. Se suceden nuevos flujos piroclásticos, depósitos de caída y flujos de lava, principalmente de composición basáltica a andesítica (50 – 57% SiO<sub>2</sub>) (Moreno y Clavero, 2006). Estos productos formaron un estratovolcán compuesto en la parte noroccidental de la Caldera 1. El fin de la Unidad Villarrica 2 está determinado por una violenta erupción que provocó el colapso de este estratovolcán, en conjunto a una serie de flujos piroclásticos que dieron origen a la Ignimbrita Pucón y provocó el colapso parcial de la cima del edificio volcánico, lo que generó una nueva caldera (Caldera 3) de 2,2 x 2,0 km.

La Ignimbrita Pucón cubre una superficie de 400 a 500 km<sup>2</sup> y su volumen se estima en 4 a 5 km<sup>3</sup> (Clavero y Moreno, 1994; Clavero, 1996; Silva *et al.*, 2005; Moreno y Clavero, 2006). Dataciones en restos de materia vegetal carbonizada arrojaron edades entre 3580 y 3740 años A.P. Los productos de esta unidad se disponen normalmente en discordancia de erosión (en su mayoría por acción glacial) sobre lavas y depósitos piroclásticos de la Unidad Villarrica 1 y sobre depósitos glaciales de la Glaciación Llanquihue (Moreno y Clavero, 2006).

#### 2.6.3.3. Unidad Villarrica 3 (Holoceno tardío)

Corresponde al cono actual, de unos 450 m de altura edificadas sobre la caldera más joven (Caldera 3), ubicada a unos 2400 m s.n.m. y sus productos asociados. Esta unidad está conformada por lavas tipo *aa* y *pahoehoe* de composición basáltica a andesítico – basáltica, al igual que depósitos piroclásticos de flujo, oleada, y de caída, generadas por erupciones estrombolianas a subplinianas y depósitos laháricos (Moreno 1993; Clavero y Moreno, 2004; Moreno y Clavero, 2006). Todos estos se distribuyen por los flancos del volcán, y son los productos que constituyen el cono actual. A esta unidad pertenecen las 53 erupciones históricas (Petit–Breuilh, 2004), que incluyen flujos de lava y lahares (Clavero y Moreno, 2004). El último flujo piroclástico documentado habría ocurrido hace 530 años A.P., y su antecesor, el flujo piroclástico Cónquil, de edad 1600 años A.P. posee depósitos que se extienden ampliamente, cubriendo un área de más de 2000 km<sup>2</sup> (Moreno y Clavero, 2006).

#### 2.6.4. Actividad Eruptiva Histórica

La actividad eruptiva histórica del Volcán Villarrica ha sido principalmente de tipo hawaiana, freatomagmática, vulcaniana y estromboliana (Moreno, 1993 en Lara, 2004). En base a

investigaciones históricas, Petit-Breuilh (2004) establece que entre los años 1558 y 1991 el Volcán Villarrica presenta 53 eventos eruptivos (Tabla 2.4). Por otra parte, en base a un estudio estratigráfico de los sedimentos del fondo de los lagos Calafquén y Villarrica, Van Daele *et al.*, (2014) señala que el volcán ha presentado 112 erupciones en los últimos 600 años, con un índice de explosividad volcánica (IEV)  $\geq 2$ . Cabe destacar que el Volcán Villarrica corresponde al volcán más activo de Chile en tiempos históricos, y presenta permanente actividad en el cráter (Petit-Breuilh y Lobato, 1994 en Moreno y Clavero, 2006; Witter y Calder, 2004 en Moreno y Clavero, 2006).

Las erupciones recientes más importantes de este volcán han ocurrido en los años 1904, 1908, 1909, 1920, 1948 – 1949, 1963, 1964, 1971 – 1972 y 1984 – 1985, mientras que la más reciente ocurre el año 2015 (Naranjo y Moreno, 2004)

#### 2.6.4.1. Erupción de 1904

Erupción con un IEV = 2, con una actividad que consistió en explosiones, la formación de una columna de gases y cenizas de 1 km, la emisión de piroclastos y lahares (Petit-Breuilh y Lobato, 1994), además de numerosos flujos de detritos y la formación de una presa aguas arriba de la unión de los ríos Turbio y Pucón, la cual colapsó luego de unas horas (Naranjo y Moreno, 2004).

#### 2.6.4.2. Erupción de 1908

Erupción con un IEV = 2, donde se generaron sismos volcánicos, explosiones, lahares, derrumbes y una columna eruptiva de 3 km (Petit-Breuilh y Lobato, 1994). Lahares descendieron por los sistemas de los ríos Turbio – Pedregoso, Zanjón Seco, Correntoso, Molco – Huichatio, y Chaillupén (Naranjo y Moreno, 2004).

#### 2.6.4.3. Erupción de 1909

Erupción con un IEV = 2, con una columna eruptiva de más de 2 km (Petit-Breuilh y Lobato, 1994), y lahares (Naranjo y Moreno, 2004).

#### 2.6.4.4. Erupción de 1920

Erupción con un IEV = 2, con una columna eruptiva de más de 2 km (Petit-Breuilh y Lobato, 1994), además de la generación de lahares (Naranjo y Moreno, 2004).

Tabla 2.4 Cronología eruptiva documentada del volcán Villarrica. Modificado de Petit-Brueilh y Lobato (1994) y Vera (2019). RS: ruidos subterráneos; SV: sismos volcánicos; EX: explosiones cráter central; GC: columna cenizas y gases; EP: eyección de piroclastos; FL: flujo de Lava; LH: flujos laháricos; AR: aumento caudal ríos; DR: derrumbes en cráter; IEV: Índice de explosividad volcánica. \*: La erupción no fue descrita en las fuentes consultadas; X: la erupción está claramente descrita en las fuentes consultadas; ?: la fuente es desconocida o la descripción no es suficientemente completa como para asignarlo fehacientemente; -: la erupción no presentó tal característica.

N°	Fecha de Inicio Año/Mes/Día	Fecha de Término Año/Mes/Día	RS	SV	EX	GC	EP	FL	LH	AR	DR	IEV
1	1558		*	*	X	X	X	*	?	*	*	2
2	1562		*	*	X	X	X	*	*	*	*	2
3	1594		*	*	X	*	X	*	*	*	*	1
4	1640/02/03		X	X	X	X	X	X	X	X	X	3
5	1647? /05/13		*	*	?	?	?	*	*	*	*	1?
6	1657?/03/15		*	*	?	?	?	*	*	*	*	1?
7	1688		*	*	X	X	X	*	?	*	*	1-2
8	1716		*	*	X	*	*	*	*	*	*	1
9	1730/07/08		*	*	X	*	*	*	*	*	*	2
10	1737/12/24		*	*	X	*	*	*	*	*	*	2
11	1742		*	*	X	X	X	*	*	*	*	2
12	1745		*	*	X	*	*	*	*	*	*	2
13	1751/12/14		*	*	X	X	X	X	*	*	*	1
14	1759/12		*	*	X	X	X	*	*	*	*	1
15	1777		*	*	X	X	X	*	*	*	*	1
16	1780		*	*	?	?	?	*	*	*	*	2?
17	1787		*	*	X	*	X	X	*	*	*	0-1
18	1790		X	X	X	X	X	*	*	*	*	1-2
19	1792		X	X	X	X	X	*	*	*	*	1-2
20	1796		X	X	X	X	X	*	*	*	*	1-2
21	1799		X	X	X	X	X	*	*	*	*	1-2
22	1801		X	X	X	X	X	*	*	*	*	1-2
23	1806		*	*	X	?	?	*	*	*	*	2?
24	1815	1818	*	*	X	X	X	*	*	*	*	2
25	1822/11/19		*	*	X	X	X	*	*	*	*	2
26	1832/12/24		X	X	X	X	X	*	*	*	*	2
27	1837/11/07	1837/??/21	X	X	X	X	X	*	*	*	*	2
28	1853/11		X	X	X	X	X	X	*	*	*	2





#### 2.6.4.5. Erupción de 1948 – 1949

Erupción con un IEV = 3, siendo la de mayor magnitud del siglo XX. Su actividad se caracterizó por una serie de explosiones, sismos, emisión de piroclastos, coladas de lava, flujos laháricos y flujos piroclásticos de pequeño volumen (Moreno y Clavero, 2006). La altura de la columna eruptiva se estima en más de 8 km (Petit-Breuilh y Lobato, 1994).

#### 2.6.4.6. Erupción de 1963

Erupción con un IEV = 2, según Petit-Breuilh y Lobato (1994) y el Proyecto de Observación Visual del Volcán Villarrica (POVI), e IEV = 3 según otros autores (Dzierma y Wehrmann, 2010; Van Daele *et al.*, 2014) y en el sitio web del Global Volcanism Program (GVP, 2013). Este evento generó explosiones, eyección de piroclastos, flujos de lava y lahares (Moreno y Clavero, 2006).

#### 2.6.4.7. Erupción de 1964

Erupción con un IEV = 2, y una columna eruptiva de 1.5 km (Petit-Breuilh y Lobato, 1994). Correspondió a una erupción de tipo estromboliana, donde fueron emitidas columnas de piroclastos y flujos de lava, generando una serie de lahares (Moreno y Clavero, 2006).

#### 2.6.4.8. Erupción de 1971 – 1972

Erupción con un IEV = 2, que consistió en sismos volcánicos, explosiones, columna de gases y ceniza por sobre los 3 km, balísticos, flujos de lava y lahares (Petit-Breuilh y Lobato, 1994; Moreno y Clavero, 2006).

#### 2.6.4.9. Erupción de 1984 – 1985

Erupción con IEV = 2, que consistió en sismos volcánicos, explosiones, el desarrollo de una columna eruptiva de hasta 3 km, balísticos, flujos de lava y derrumbes (Petit-Breuilh y Lobato, 1994; Moreno y Clavero, 2006).

#### 2.6.4.10. Erupción de 2015

Erupción caracterizada por su corta duración (etapa paroxismal de 16 min) pero con la magnitud suficiente para depositar gran cantidad de material en las cercanías de la cumbre del volcán. Los productos emitidos generaron diversos depósitos que cubrieron la capa de hielo/nieve de la parte superior del edificio volcánico, distribuyéndose de forma radial en torno al cráter (Figura 4.1). Estos

fueron eyectados desde una fuente de lava que alcanzó una altura superior a 1 km, en la fase paroxismal, y acompañados de una columna de gases y material piroclástico de 6 a 8 km de altura (RAV volumen 4, 2015 en Vera, 2019).

Durante el mes de febrero de 2015 comenzó a registrarse un aumento en la sismicidad, ascenso del lago de lava e incandescencia en la cumbre del volcán (REAV 06/02/2015 03:10 HL; REAV 06/02/2015 21:00 HL en Vera, 2019). Posteriormente la actividad superficial del cráter fue escalando, mostrando mayor incandescencia y explosiones estrombolianas, con eyección de material balístico hasta a 1 km de distancia (REAV 28/02/2015 22:50 HL en Vera, 2019).

En la madrugada del 03 de marzo la actividad aumentó considerablemente, presentando explosiones continuas cada vez más energéticas que evolucionaron progresivamente hasta formar una fuente de lava con una altura de 1 km sobre el cráter, para luego de 16 minutos disminuir su energía de forma repentina (RAV Volumen 4, 2015 en Vera, 2019).

Posteriormente, se registraron pequeñas explosiones estrombolianas y caídas de bloques incandescentes, acompañadas de una débil columna de ceniza y gases. De forma progresiva, la actividad continuó disminuyendo hasta alcanzar niveles inferiores a los observados los días previos a la erupción, concentrándose solo en derrumbes de detritos generados por la inestabilidad del material eyectado (RAV Volumen 6, 2015 en Vera, 2019).

Debido a que la erupción se desarrolló en la época con menos cantidad de nieve estacional (verano) el agua disponible para la generación de lahares era menor a lo habitual. Como consecuencia de esto, en la mayoría de los valles no había agua disponible, salvo en el Río Turbio y en la parte baja del Río Pedregoso (Vera, 2019). Vera (2019) estimó el volumen de hielo/nieve erodado en  $43.800 \text{ m}^3$  equivalentes en agua, estimando también volúmenes de lahares de  $2,4 \times 10^5 \text{ m}^3$  en el Zanjón Seco,  $0,9 \times 10^5 \text{ m}^3$  en el Correntoso y  $1,9 \times 10^5 \text{ m}^3$  en el Turbio-Pedregoso.

Los lahares generaron flujos ramificados, probablemente simultáneos, en diferentes direcciones dentro de los valles (Vera, 2019; Figura 2.7). En cuanto a sus trayectorias, Vera (2019) reconoció una influencia directa de la topografía de la cabecera de los valles en las características de la inundación.

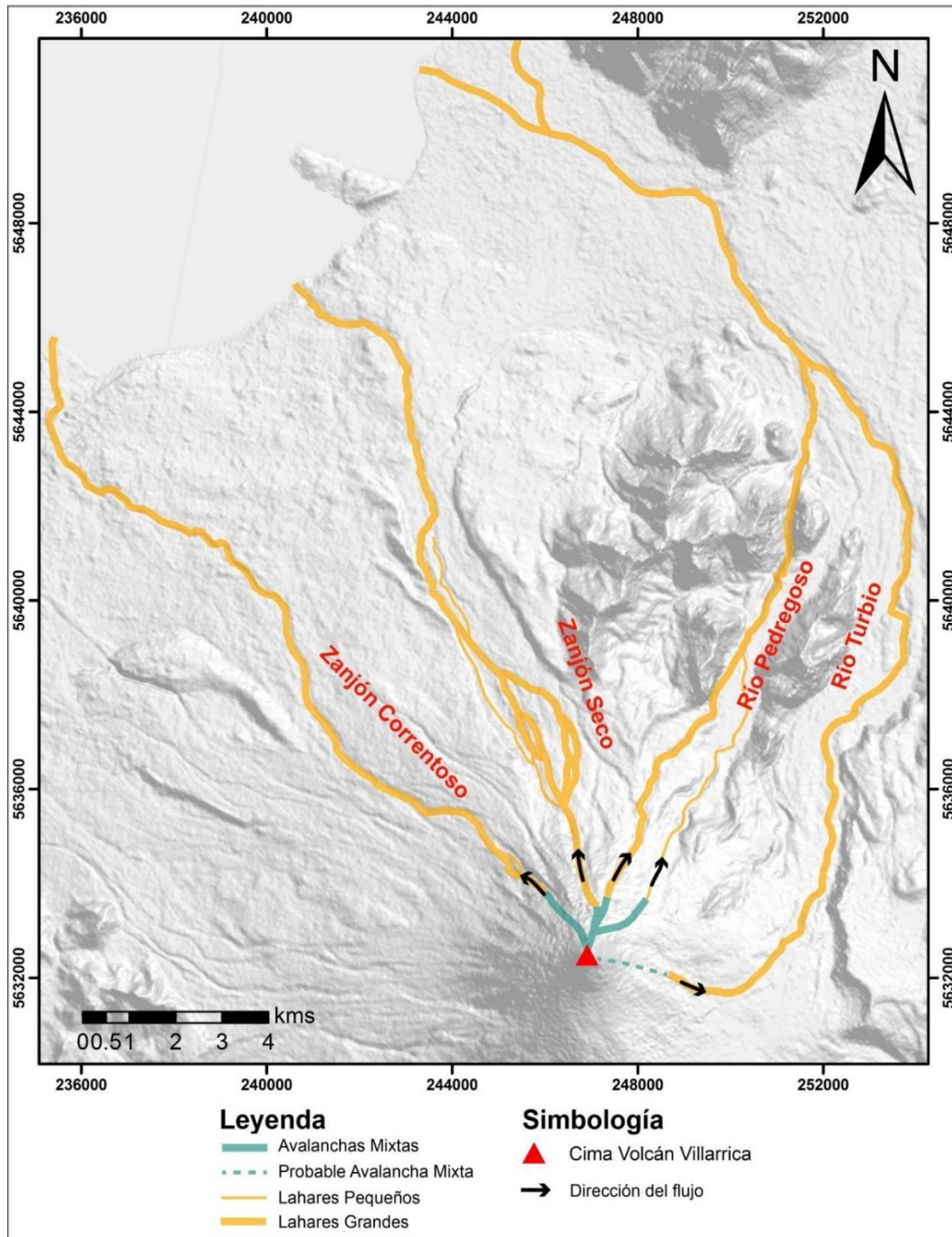


Figura 2.7 Trayectoria de lahares generados en la erupción de 2015 en el volcán Villarrica. Extraído de Vera (2019).

### 3. METODOLOGÍAS DE ZONIFICACIÓN DE PELIGROS

La magnitud y alcance que puede tener un lahar está íntimamente relacionada con el volumen de agua disponible que poseen los volcanes para ser fundidos por los productos volcánicos (lavas o CDPs) emitidos en una erupción. Para determinar este volumen se toman en cuenta las dimensiones que presentan los glaciares y los procesos de derretimiento del hielo por la interacción de este con lavas o CDPs. Además del agua que pueda aportar un glaciar en la generación de lahares se debería considerar la cantidad de nieve según la época del año y el caudal de los ríos aledaños a este que puedan ser alimentados por un lahar. Sin embargo, para efectos de la presente memoria no se incluirán estos cálculos, dada la cantidad de trabajo y el nivel de detalle que esto conlleva. Lo anterior se aborda de forma más completa en el subcapítulo 6.3. de la discusión.

Para determinar el volumen del lahar que se utilizará como parámetro de entrada en la modelación se realiza una subdivisión de cuencas, para dividir el área glaciar que cubre el volcán en base a estas y evaluar los volúmenes que se descargarán en sus valles asociados de forma particular. Además, dependiendo de que producto eruptivo genere una fusión del glaciar (lava o CDP), la cantidad de hielo fundido variará según sus dimensiones y características físicas (temperatura, velocidad, etc.). Luego, se debe añadir un volumen de detritos al agua disponible para obtener el volumen del lahar, este volumen de detritos varía según el origen del flujo, lo cual se detalla en capítulos posteriores. Finalmente, se ingresan los volúmenes determinados al software *LaharZ* y se obtienen modelos del avance de los lahares en torno al volcán, para luego mediante el análisis de la información bibliográfica, observaciones de terreno e interpretaciones propias llegar al resultado final de la zonación del peligro de lahares para cada volcán.

#### 3.1. Subdivisión de cuencas

Con el objetivo de determinar el área de influencia de los glaciares presentes en los volcanes a estudiar, se realiza un análisis detallado de las redes de drenajes presentes en la zona de estudio, para identificar las cuencas hidrográficas que controlan el comportamiento de posibles flujos laháricos que se generen en futuros eventos eruptivos. Esto se realiza mediante el software ArcMap y un Modelo de Elevación Digital (DEM) de 12,5 m de resolución, utilizando herramientas de procesamiento de datos incluidas dentro del programa mediante la siguiente metodología: (i) Eliminar imperfecciones (huecos y vacíos) del ráster con la herramienta “Fill”, (ii) Establecer la



dirección del flujo hidrológico de la pendiente con la herramienta “Flow Direction”, (iii) Determinar la acumulación del flujo de las celdas que fluyen hacia cada celda descendiendo sobre la pendiente con la herramienta “Flow Accumulation”, (iv) Delimitar automáticamente las cuencas en base a la red de drenaje utilizando el ráster generado por el paso anterior mediante la herramienta “Basin” y (v) Transformar el ráster obtenido a vector (shapefile) con la herramienta “Raster to Polygon” (Figura 3.1).

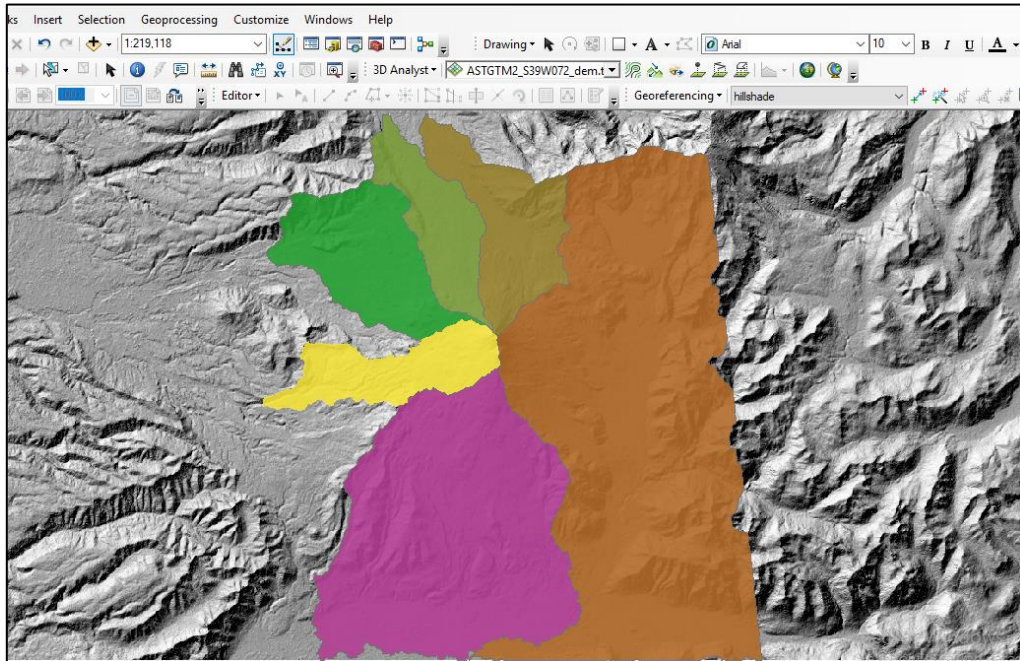


Figura 3.1 Subdivisión de cuencas en el Volcán Llaima utilizando ArcMap. Elaboración propia.

### 3.2. Subdivisión de glaciares en base a cuencas

Para poder determinar el volumen de agua disponible para formar un flujo de lahar, por la emisión de lavas y la generación de una corriente de densidad piroclástica (CDP), se identifica el área glaciar que podría ser fundida (Figura 3.2) mediante los “Inventarios de Glaciares en Chile” realizados por Rivera (2011) y Rivera *et al* (2015), los cuales utilizaron herramientas de percepción remota satelital (ASTER y LANDSAT), técnicas digitales de análisis (ArcGis, ENVI, Erdas Imagine y Global Mapper) y otras fuentes complementarias, generando mapas con la distribución espacial de los glaciares y obteniendo información adicional como área, espesor, variaciones temporales, etc. Lo anterior se superpone a las cuencas identificadas anteriormente y se divide el casquete glaciar en “subcuerpos” para cada cuenca delimitada. Finalmente, con el área y espesor



glaciar para cada volcán se estima el volumen de agua a ser incorporado en un flujo de lahar, a partir del derretimiento de hielo. Para el caso de la determinación del espesor de glaciares que se utilizan en los cálculos hay que precisar que no todos los volcanes poseen datos sobre esto, por lo que se utiliza un promedio de 20 m espesor (Rivera, 2011; Rivera *et al.*, 2015) en los volcanes que no tienen mediciones en sus glaciares. Además, en el caso de los volcanes Callaqui y Villarrica, se utilizan valores de espesor de 22 m y 43 m, respectivamente, según datos proporcionados por el trabajo de GEOESTUDIOS Ltda. (2014) para la Dirección General de Aguas.

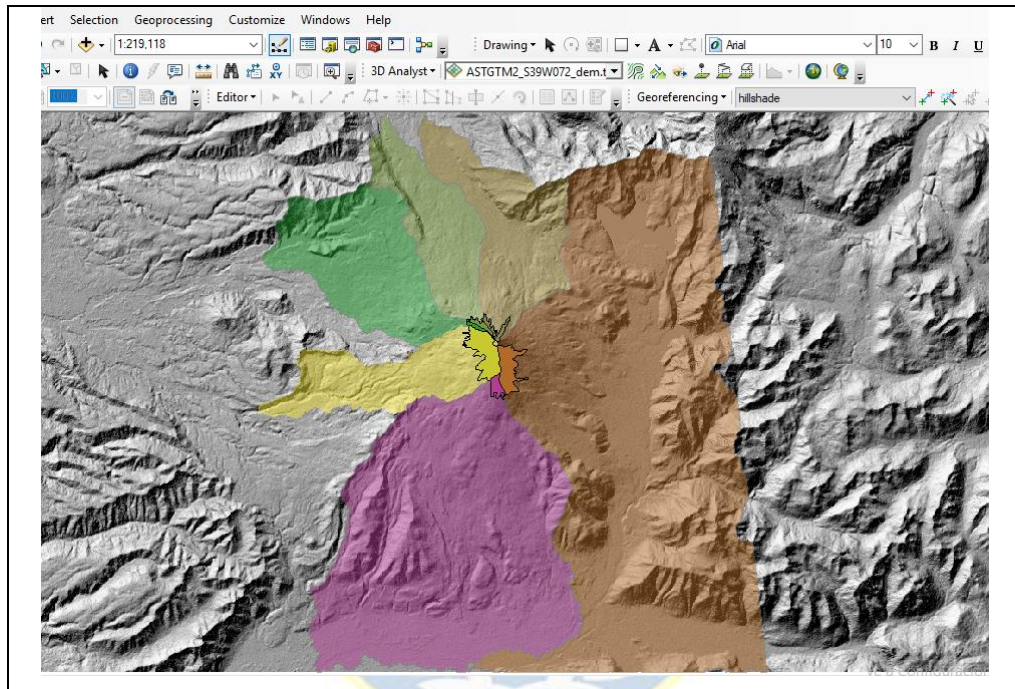


Figura 3.2 Subdivisión de glaciares en el volcán Llaima utilizando ArcMap.  
Elaboración propia.

### 3.3. Cálculo de volumen de agua disponible por emisión de un flujo de lava

Para obtener los volúmenes de glaciar fundido por la interacción lava-hielo se emplea un estudio realizado por Wilson y Head (2007), el cual establece que si el agua generada en la fusión escapa rápidamente de la interfaz lava-hielo, la razón entre el grosor de la colada de lava y de la capa de hielo fundida es igual a 1:5, donde por cada 1 metro de espesor de lava se funden 5 metros de hielo. Mientras que si el agua queda atrapada y no escapa de esta interfaz la razón de fusión entre la lava y el hielo es de 1:2, es decir, que por cada 1 metro de espesor de la colada de lava se fundirán 2 metros de hielo. Esto debido a que parte del calor emitido por la lava será utilizado en calentar el agua y no fundir el hielo.

Para este caso, se supondrá un flujo de lava emitido desde el conducto central, donde la geometría de la lava será un prisma rectangular de espesor constante, a fin de simplificar la ecuación. Para obtener el volumen de agua por fusión de hielo, en cada una de las cuencas, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = (Fw * E * A * L) * \frac{\rho h}{\rho ag}$$

Donde:

- V = Volumen de agua por fusión de hielo (m<sup>3</sup>)
- Fw = Factor de Wilson y Head
- E = Espesor de colada de lava (m)
- A = Ancho de colada de lava (m)
- L = Longitud de la colada (m)
- ρh = Densidad del hielo (kg/m<sup>3</sup>)
- ρag = Densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

El espesor, ancho y largo de la colada de lava se determinará mediante la revisión bibliográfica de la información existente de anteriores flujos y depósitos de lava de cada volcán, mapas geológicos de estos e imágenes satelitales; la densidad del hielo empleada corresponde a 917 kg/m<sup>3</sup> y la densidad del agua 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Mediante este cálculo se obtienen valores de volúmenes mínimos, intermedios y máximos, dependiendo de los escenarios eruptivos definidos para cada volcán. El volumen intermedio se entenderá como el promedio entre los volúmenes mínimos y máximos.

### 3.4. Cálculo de volumen de agua disponible por generación de corrientes de densidad piroclástica (CDP)

El volumen de agua disponible para formar un flujo de lahar por la interacción entre CDP-hielo fue determinado a partir de la fracción de glaciario que puede derretir una CDP, calculada por Pierson (1990), el cual basa su cálculo en la erupción del Nevado del Ruiz de 1985, y corresponden a los

únicos antecedentes empíricos de cómo afectaría el paso de un CDP sobre la superficie de un glaciar. Este estudio señala que los flujos piroclásticos forman canales de piso plano de 100 m de ancho y de entre 2 – 4 m de profundidad en el hielo, fundiendo toda la capa de nieve. Además, se considera la posibilidad de un CDP de 10 m de ancho en base a lo ocurrido durante la erupción del Volcán Villarrica el año 2015.

Esta se resume en la siguiente ecuación:

$$V = (E * A * L) * \frac{\rho_h}{\rho_{ag}}$$

Donde:

- V = Volumen de agua por fusión de hielo (m<sup>3</sup>)
- E = Espesor de canal formado por CDPs (m)
- A = Ancho de canal formado por CDPs (m)
- L = Longitud de CDPs (m)
- $\rho_h$  = Densidad del hielo (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_{ag}$  = Densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

El espesor y ancho de los canales formados por CDPs se define según lo propuesto por Pierson (1990) con valores entre 2 – 4 m para el espesor y 10 – 100 m para el ancho, donde se incluye el antecedente de la erupción del Volcán Villarrica de 2015. Estos valores serán utilizados en el cálculo de volúmenes de agua disponible por generación de CDPs en todos los volcanes a estudiar.

Mediante este cálculo se obtienen valores de volúmenes mínimos, intermedios y máximos, dependiendo de los escenarios eruptivos definidos para cada volcán. El volumen intermedio se entenderá como el promedio entre los volúmenes mínimos y máximos para todos los volcanes.

### 3.5. Cálculo de volumen por fusión de nieve.

En el caso del volcán Callaqui se utiliza el volumen de nieve como fuente de agua disponible en un escenario específico, para determinar el volumen de nieve se delimita el área cubierta por nieve

en los meses de junio - septiembre, mediante imágenes satelitales del área, mientras que el espesor promedio se obtiene desde el trabajo de Araneda y Avendaño (2013).

### 3.6. Modelamiento de flujos laháricos generados por emisión de lavas y CDP

“LaharZ” es una herramienta diseñada por Iverson *et al* (1998) que utiliza ArcMap como interfaz para su funcionamiento. Para definir las zonas de inundación que otorga hay que seguir una serie de pasos incluidos dentro de “LaharZ” como *scripts* de ArcMap: (i) Obtener la hidrología del área de estudio a través de un DEM (“Create Surface Hydrology”), (ii) Definir la zona de peligro proximal (H/L) mediante el DEM y la definición del punto de inicio de la erupción (“Hazard Zone Proximal”), (iii) Generar las zonas de inundación en formato “.tiff” por lahares ingresando los volúmenes calculados y los puntos de inicio de los flujos (“LaharZ Distal Zones” y “Merge Raster by Volume”) y (iv) Transformar los resultados obtenidos en formato “.tiff” a “.shp” para poder visualizarlos de mejor forma y editarlos. Los fundamentos teóricos que gobiernan a “LaharZ” se explican en el capítulo 1.6.2.

De este modo se generan diferentes mapas que ilustran las zonas de inundación de acuerdo con los volúmenes mínimos, intermedios y máximos de lahares con 20% de detritos y 60% de detritos en el caso de lavas, y 60% de detritos y 75% de detritos en el caso de CDP, para cada volcán.

Los porcentajes de detritos mencionados en el párrafo anterior se fundamentan en que, para el caso de lahares generados por lavas, estos varían entre flujos hiperconcentrados y de detritos, y según Scott (1988) sobre un 20% de detritos corresponde a un flujo hiperconcentrado y sobre el 60% a un flujo de detritos. Por otra parte, en el caso de los lahares generados por CDPs se utilizan los valores de 60% y 75% ya que estos corresponden a los valores máximos de transición de flujo hiperconcentrado a un flujo de detritos, 75% según Pierson (1990) y 60% según Vallance (2000).

### 3.7. Tolerancia de sección transversal en puentes

Según las dimensiones obtenidas en terreno de los valles sobre los que se construyeron puentes se puede obtener su área transversal. De acuerdo con los diferentes escenarios y sus respectivos volúmenes de lahar se calcula el área de inundación transversal mediante la ecuación:  $A = 0.02 * V^{2/3}$  (Iverson *et al.*, 1998, ver subcapítulo 1.6.2.), para de esta forma evaluar si los puentes se verán o no sobrepasados por flujos laháricos de determinados volúmenes. Cabe mencionar que esta ecuación conlleva un error asociado a las generalizaciones realizadas para programar el *software* y

no representan la totalidad de los fenómenos físicos presentes en el avance de un lahar (Iverson *et al.*, 1998; Subcapítulo 1.6.2.).

### 3.8. Zonas de peligro por flujos laháricos

La zonificación de peligros para cada volcán se realiza utilizando como base los resultados obtenidos con LaharZ, los cuáles no representan directamente el resultado final, debido a que las zonas de inundación que el *software* define se deben complementar y corregir de acuerdo a factores geomorfológicos, las observaciones de terreno, información geológica e información histórica sobre el comportamiento de los flujos laháricos. Combinando los resultados obtenidos con LaharZ y una evaluación experta de los factores mencionados anteriormente se definen manualmente las zonas de inundación en el *software* ArcMap.





## 4. ANÁLISIS DE PELIGROS POR LAHARES

### 4.1. Volcán Callaqui

#### 4.1.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares

Naranjo *et al* (2000) indica que una futura erupción del volcán Callaqui puede generarse, con mayor probabilidad, en cualquier lugar sobre su fisura, con coladas de lava que descenderían por alguno de los valles presentes en sus flancos y que alcanzarían distancias máximas de 14 km. El PLADECO (2006) señala que las últimas coladas que ha emitido este volcán han descendido hacia los ríos Pangue-Epún, Biobío, Malla y Quillaicahue-Ralco, al igual que los flujos laháricos, los cuales se han encausado preferentemente hacia el río Malla y sus efectos se han extendido aguas abajo a lo largo del valle del río Biobío. Por otra parte, la reactivación de la fisura del sector suroccidental del volcán podría generar lahares sólo durante la temporada de mayor acumulación de nieve (junio – septiembre; Naranjo *et al.*, 2000; Subcapítulo 2.1.1.).

El período de recurrencia para un evento explosivo (IEV: 2-4) se ha estimado en ~1.000 años (Polanco *et al.*, 2000). Por otro lado, los productos esperados, como flujos de lava y corrientes de densidad piroclástica, sumado a la presencia de un casquete glaciar que cubre el volcán, significan una alta posibilidad de generar lahares en próximas erupciones. La dirección que tomen los flujos no se puede prever totalmente, ya que dependerá de que fisura actúe como centro de emisión de los productos (Naranjo *et al.*, 2000).

Según Naranjo *et al* (2000) la actividad fumarólica en la cima genera zonas de debilidad estructural en el edificio volcánico, lo cual, sumado a la presencia del glaciar, puede causar avalanchas volcánicas o de nieve que descenderían por los valles de los ríos Pangue y Malla, las cuales podrían transformarse en lahares en zonas más distales.

Debido a la poca información sobre la generación de lahares en tiempos históricos, se recurre a estudiar los depósitos antiguos y el comportamiento de volcanes con características similares (Tabla 4.1), como es el caso del Mt. Adams (Estados Unidos) y el volcán Tongariro (Nueva Zelanda), los cuales poseen similar composición, morfología y estilo eruptivo con el volcán Callaqui.

Tabla 4.1 Cuadro comparativo entre volcanes Callaqui, Mt. Adams y Tongariro. El IEV frecuente de cada volcán se define en base a la información del Smithsonian Institution – Global Volcanism Program.

Volcán	Tipo	Composición	Altura (m s.n.m.)	IEV (frecuente)
Callaqui	Estratovolcán, fisural	Andesítico, andesítico-basáltico	3.164	<4
Mt. Adams	Estratovolcán	Andesítico, andesítico basáltico	3.742	2
Tongariro	Estratovolcán	Andesítico, andesítico-basáltico	1.978	2

El Mt. Adams, ubicado en Washington, Estados Unidos, posee el registro de grandes deslizamientos de tierra y lahares, no necesariamente relacionados a erupciones volcánicas, fenómeno que proveen el peligro más destructivo (Scott *et al.*, 1995). Durante los últimos 10.000 años, se han producido numerosas avalanchas de detritos, las cuáles en caso de contener o adquirir suficiente cantidad de agua pueden transformarse en lahares. Una avalancha con un volumen aproximado de 70.000.000 m<sup>3</sup> generó el lahar más extenso conocido para este volcán, hace 6.000 años (Scott *et al.*, 1995). Lo anterior da cuenta de que la posibilidad de generar lahares no sólo se acota a erupciones volcánicas, sino también al colapso de edificios que se encuentran con baja o nula actividad volcánica, como es el caso del Vn. Callaqui.

El volcán Tongariro es un macizo andesítico que presenta una docena de conos (tipo fisural) construidos en un período de 275 mil años (Global Volcanism Program, 2013), característica similar al volcán Callaqui. Los conos se posicionan en dirección NE-SW y han estado activos durante cientos de años desde el Holoceno, produciendo grandes erupciones.

Finalmente, para el volcán Callaqui se definen tres escenarios en base a la cronología eruptiva histórica, depósitos piroclásticos holocenos y la comparación con otros volcanes: (1) El primer escenario corresponde al de mayor probabilidad, de tipo estromboliano y con un IEV de 1, con emisiones desde el cráter principal o a lo largo de la fisura SW, y está basado en la historia eruptiva reciente que ha presentado el volcán, con pequeñas erupciones de ceniza, actividad fumarólica y eyección de piroclastos pequeños (Moreno y Lahsen, 1984). (2) El segundo escenario se define en base a la actividad frecuente de los volcanes Mt. Adams y Tongariro, con actividad estromboliana de un IEV de 2 y emisión de flujos de lava. Finalmente, (3) el tercer escenario, que corresponde al menos probable se define en base a la actividad holocena explosiva (IEV: 3-4) registrada en los

depósitos del volcán (Subcapítulo 2.1.2), la cual da cuenta del potencial que tiene el volcán Callaqui de producir grandes erupciones violentas con generación de corrientes de densidad piroclástica. Estos escenarios se resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Síntesis de las características de los escenarios definidos.

Escenario	IEV	Tipo de Actividad	Fenómenos Eruptivos (sin considerar lahares)
1 Pequeño	1	Hawaiana - Estromboliana	Caída de tefra y balísticos
2 Moderado	2	Estromboliana	Caída de tefra, balísticos, flujos piroclásticos y flujos de lava
3 Grande	3 - 4	Vulcaniana - Subpliniana	Caída de tefra, balísticos, flujos piroclásticos y flujos de lava

#### 4.1.2. Estimación del volumen de lahares

##### 4.1.2.1. Subdivisión de cuencas y estimación del volumen glaciar

Las cuencas en el sector del volcán Callaqui fueron subdivididas en base a un análisis detallado de la red hidrográfica de la zona de estudio, a partir del modelo de elevación digital (DEM) de resolución de 12,5 m. Se identificaron 3 cuencas hidrográficas que reciben aporte directo desde el glaciar, las cuales se denominaron: Quillaicahue, Malla y Pangué.

En base al glaciar definido por Rivera (2011), se identifican 3 subdivisiones glaciares de acuerdo con las cuencas hidrográficas que recibirían aportes del casquete (Figura 4.1), cuyas áreas, volúmenes de glaciares y volúmenes de agua equivalente disponible en el glaciar, calculados mediante las ecuaciones descritas en el Capítulo 3 de metodología se indican en la Tabla 4.3. El espesor utilizado para el cálculo de volumen de este volcán es de 22 m y fue definido en base a GEOESTUDIOS (2014).

Tabla 4.3 Volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas.

Cuenca	Área de glaciar (m <sup>2</sup> )	Espesor del glaciar (m)	Volumen de glaciar (m <sup>3</sup> )	Volumen de glaciar EQ agua (m <sup>3</sup> )
Quillaicahue	1.102.698	22	24.259.364	22.318.615
Malla	5.259.285		115.704.278	106.447.936
Pangué	880.840		19.378.482	17.828.203

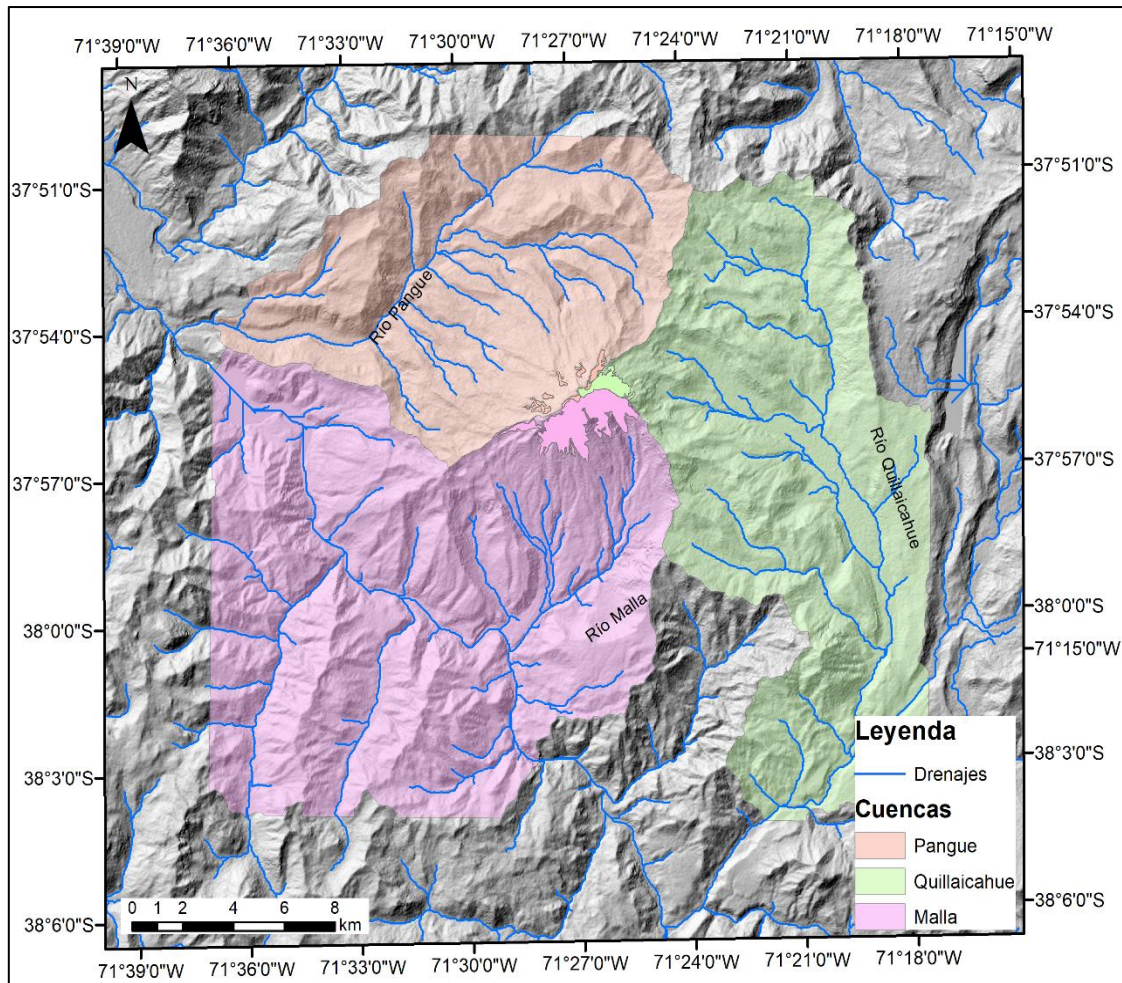


Figura 4.1 Red hídrica, subdivisión de cuencas y glaciar del volcán Callaqui. Elaboración propia con base en Rivera (2011) para el área del glaciar.

#### 4.1.2.2. Volumen de lahar por acción de coladas de lava

Se considera la emisión probable de flujos de lava entre 5 y 40 m de espesor y anchos que varían entre 20 – 80 m, en base al trabajo de Moreno y otros (1984), Jorquera (2019) e imágenes satelitales del área. Para el cálculo del volumen mínimo se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de lava de 5 m y 20 m, respectivamente. En el caso del volumen intermedio se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de 20 m y 45 m, respectivamente. Finalmente, para el cálculo del volumen máximo se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de 40 m y 80 m, respectivamente (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Callaqui por lavas.

Cuenca	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]
Quillaicahue	156.400	4.926.600	22.318.615
Malla	193.200	6.085.800	30.912.000
Pangue	138.000	4.347.000	17.828.203

Mediante el recálculo del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de lava con el glaciar Callaqui.

Cuenca	Volumen mínimo con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen mínimo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]
Quillaicahue	195.500	6.158.250	27.898.269	391.000	12.316.500	22.318.615
Malla	241.500	7.607.250	38.640.000	483.000	15.214.500	77.280.000
Pangue	172.500	5.433.750	22.285.254	345.000	10.867.500	17.828.203

#### 4.1.2.3. Volumen de lahar por acción de CDPs

Se considera la emisión probable de CDP de 0.3 a 1 m de espesor y anchos que varían entre 10 – 100 m, sobre la base de los trabajos de Polanco y Naranjo (2008), Pierson y otros (1990), el marco geológico de este volcán (Subcapítulo 2.1.) e imágenes satelitales del área. Para el cálculo se utilizan valores de espesor y ancho de 0.3 m y 10 m, 0.8 m y 55 m, y 1 m y 100 m, entregando resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos de hielo fundido para el Volcán Callaqui (Tabla 4.6).



Tabla 4.6 Volúmenes de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Callaqui.

Cuenca	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]
Quillaicahue	4.692	68.816	156.400
Malla	5.796	85.008	193.200
Pangue	4.140	60.720	138.000

Mediante el recálculo del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.7).

Tabla 4.7 Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Callaqui.

Cuenca	Volumen mínimo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen mínimo con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]
Quillaicahue	11.730	172.040	391.000	18.768	275.264	625.600
Malla	14.490	212.520	483.000	23.184	340.032	772.800
Pangue	10.350	151.800	345.000	16.560	242.880	552.000

#### 4.1.2.4. Cálculo de volumen de nieve en caso de erupción fisural

Durante la temporada en que el volcán se encuentra cubierto de nieve, se considera la posibilidad de que una erupción fisural pueda ocurrir en el flanco suroccidental del macizo (Naranjo *et al.*, 2000), donde no hay presencia del casquete glaciar. En este caso, se podrían generar lahares por el súbito derretimiento de la nieve acumulada alrededor de la fisura. El volumen de nieve presente en el flanco suroccidental del volcán se calculó a través de la delimitación del área cubierta por nieve en los meses de junio – septiembre, mediante imágenes satelitales del área (Figura 4.2), mientras que el espesor promedio de esta fue obtenido desde el trabajo de Araneda y Avendaño (2013). Para la modelación, se escogieron arbitrariamente dos escenarios probables: i) donde la totalidad de la nieve se derrite por la erupción, para evaluar el peligro de lahares en este escenario en el peor escenario posible y ii) donde la mitad del volumen de esta lo hace, para evaluar el peligro en un escenario más probable y realista (Tabla 4.8).

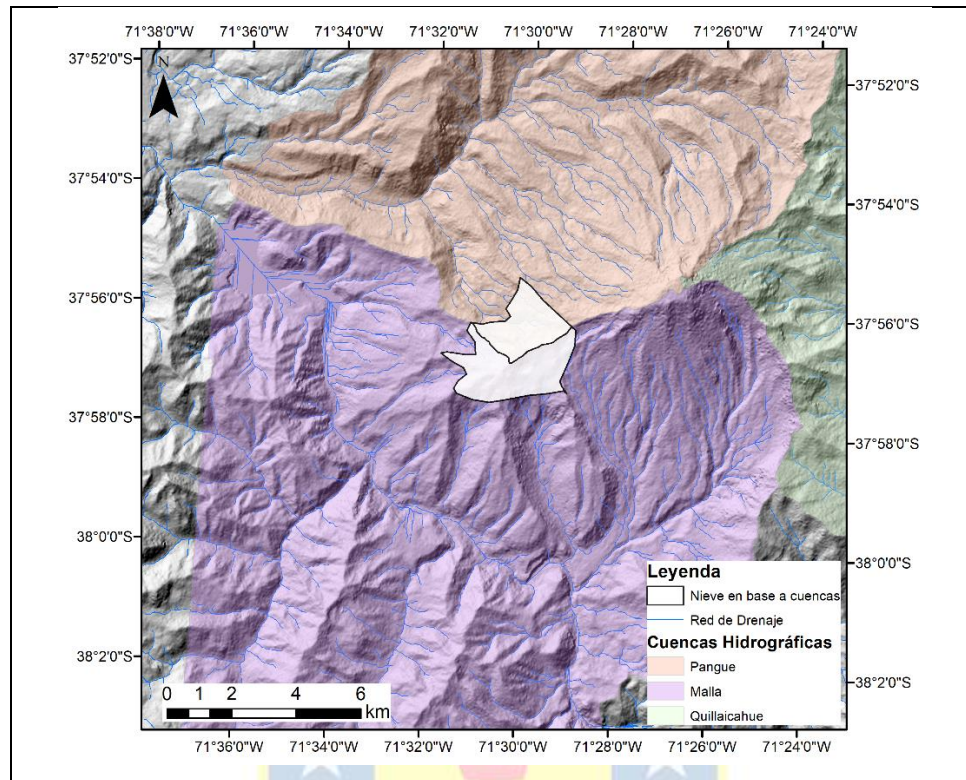


Figura 4.2 Área cubierta por nieve a ser afectada por una erupción ocurrida en la fisura SW del volcán Callaqui. Elaboración propia.

Tabla 4.8 Volúmenes de nieve calculados en el flanco suroccidental del volcán Callaqui.

Cuenca	Área [m <sup>2</sup> ]	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Vol/2 [m <sup>3</sup> ]
Pangue	3.533.958	3	10.601.875	5.300.938
Malla	5.376.760	3	16.130.280	8.065.140

#### 4.1.3. Modelado de inundación con LaharZ

Los escenarios definidos en secciones anteriores producen distintos productos eruptivos según su comportamiento y explosividad, a la vez que las dimensiones de estos varían según la magnitud de la erupción. Estas diferencias de tamaño influyen directamente en la cantidad de agua disponible en la generación de un lahar, ya que, por ejemplo, una lava más extensa cubrirá una mayor área del glaciar y, en consecuencia, habrá mayor fusión de hielo. Es así, como los volúmenes mínimos, intermedios y máximos se relacionan con los escenarios eruptivos, ya que erupciones de baja magnitud (tasa de emisión de lavas baja y sin generación de CDPs) cubrirán en menor proporción los glaciares que erupciones de mayor magnitud y explosividad.

En el caso del presente volcán, el escenario 1 se ve representado por los volúmenes mínimos calculados para lahares generados por acción de coladas de lava, con la respectiva variación en el volumen final dependiendo del porcentaje de detritos (20% y 60%; subcapítulo 3.3) y los ocurridos en caso de una erupción fisural. El escenario 2 se representa por los volúmenes intermedios calculados para lahares generados por coladas de lava o CDPs y el escenario 3 corresponde a los volúmenes máximos de lahares generados por lavas o CDPs..

De acuerdo con lo anterior, se realizan 5 modelaciones para el volcán Callaqui en el software LaharZ, cuyos volúmenes de entrada para el modelo son obtenidos desde la Tabla 4.5, 4.7 y 4.8, y corresponden a i) lahares generados por lavas con un 20% de detritos (Figura 4.3), ii) lahares generados por lavas con un 60% de detritos, iii) lahares generados por CDP con 60% de detritos, iv) lahares generados por CDP con un 75% de detritos, y v) lahares generados por una erupción fisural (Figura 4.4). En esta sección se presenta un ejemplo del resultado obtenido con la modelación en LaharZ, los mapas restantes se encuentran en el Anexo 1.

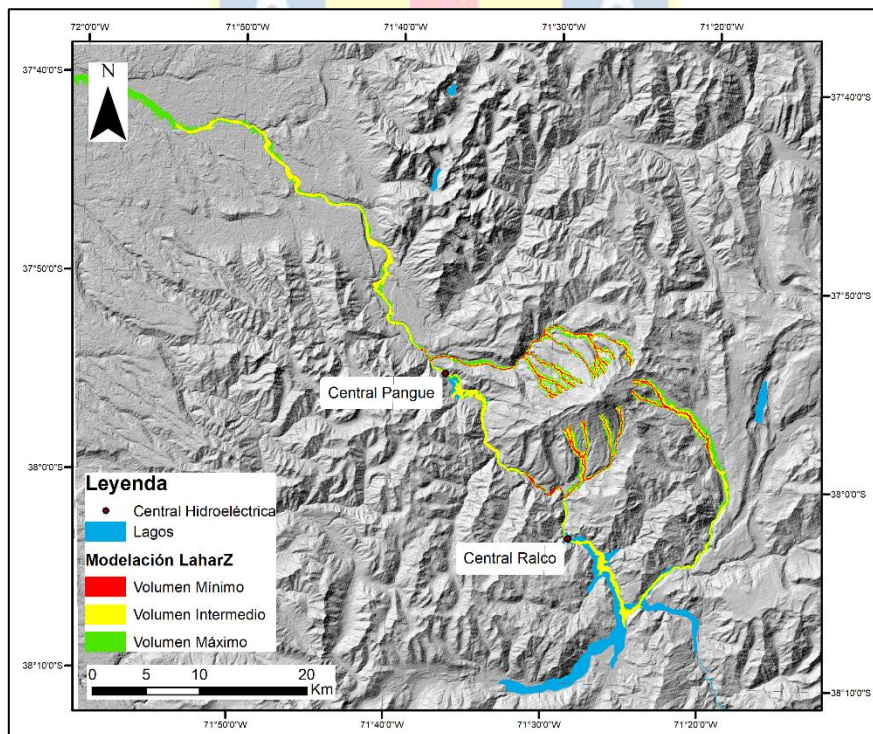


Figura 4.3

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Callaqui, en el caso de lahares generados por lavas con un 20% de detritos. El volumen mínimo es de  $6,1 \times 10^5 \text{ m}^3$ , el volumen intermedio de  $1,9 \times 10^7 \text{ m}^3$  y el volumen máximo de  $9,8 \times 10^7 \text{ m}^3$ .



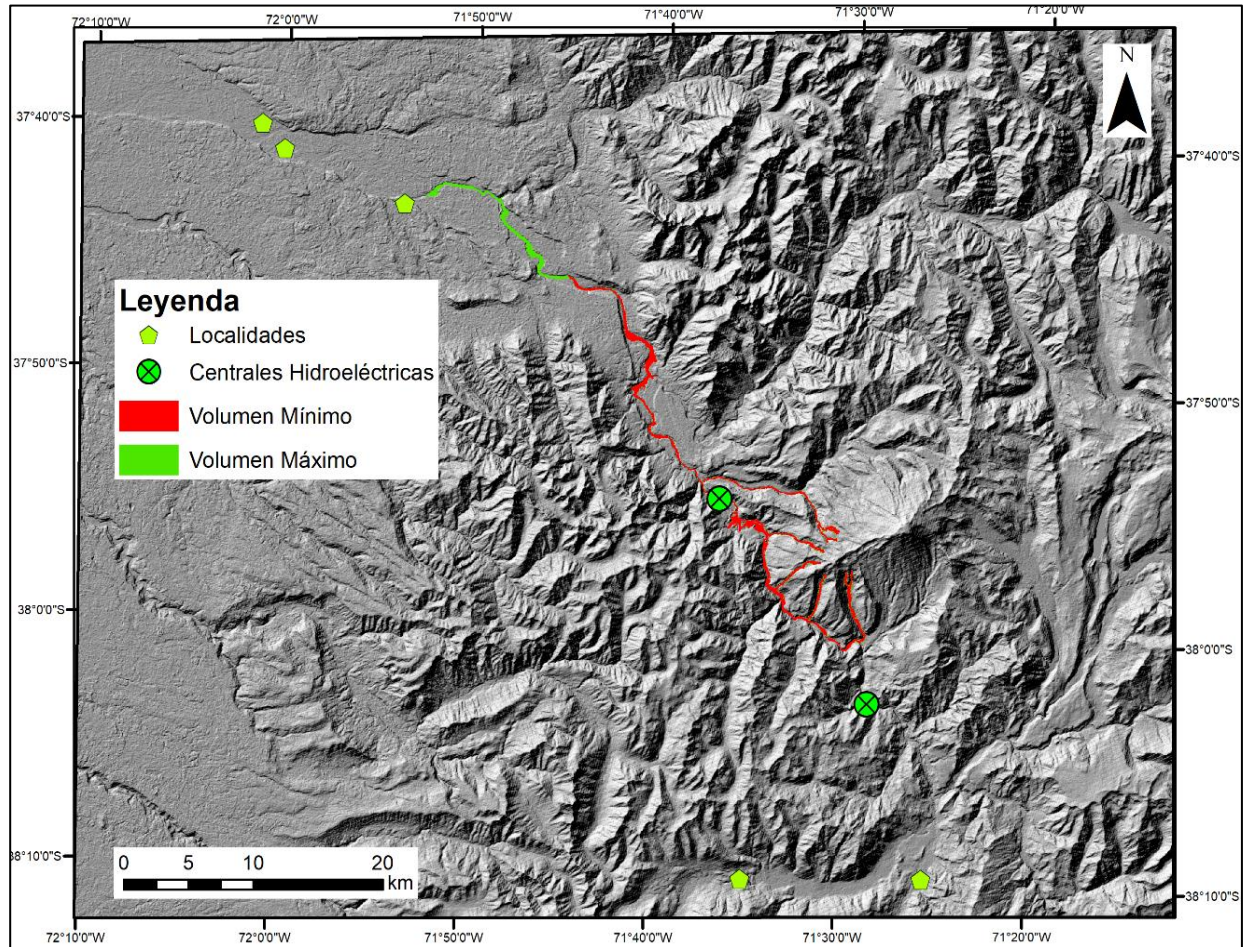


Figura 4.4

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Callaqui, en el caso de lahares generados por una erupción fisural. El volumen mínimo es de  $1,3 \times 10^7 \text{ m}^3$  y el volumen máximo de  $2,7 \times 10^7 \text{ m}^3$ .

#### 4.1.4. Zonas de peligro por flujos laháricos

Como se mencionó en la sección anterior, los volúmenes de los lahares modelados están relacionados directamente con los escenarios eruptivos definidos y sus productos, por lo que se definen las zonas de peligro según el alcance que pueden tener los lahares bajo determinadas condiciones de generación y sus volúmenes asociados (Figura 4.5). En el caso de este volcán, se definen 2 zonas que representan el escenario 1 (Zona 1 y 4), con el objetivo de hacer una distinción entre los distintos centros de emisión que puede tener una erupción y como la ubicación de este determinará el comportamiento del lahar.

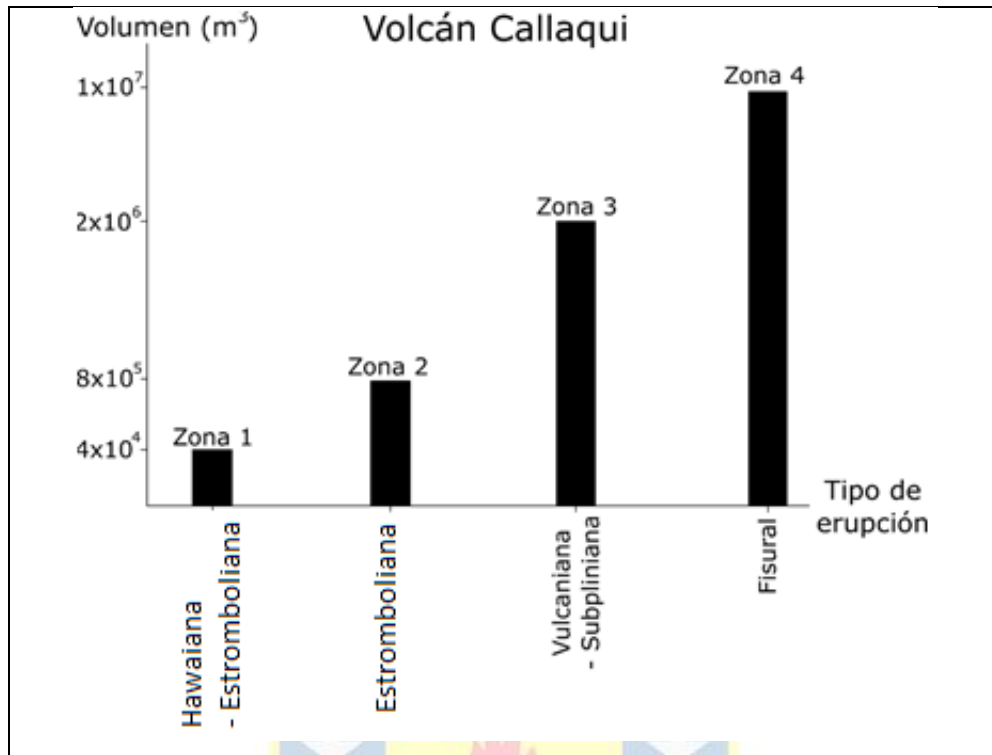


Figura 4.5 Relación entre escenarios y volúmenes determinados.

Según los volúmenes de lahares definidos anteriormente, su relación con los escenarios eruptivos, la modelación con LaharZ y el análisis de la bibliografía e información recopilada durante este trabajo se definen 4 zonas de peligros para el Volcán Callaqui (Figura 4.6):

Zona 1: Áreas de máxima probabilidad de inundación por lahares para erupciones de baja magnitud, con un IEV = 1, y volúmenes de lahares del orden de  $5 \times 10^4$  m<sup>3</sup> o mayor. Corresponde al volumen mínimo de lahares generados por la interacción entre CDPs y glaciares. Incluye la zona proximal de peligro volcánico (H/L) en la cual se genera la fusión de hielo/nieve por lavas o CDPs y comienzan los lahares.

Zona 2: Áreas susceptibles a ser inundadas por lahares generados por la interacción entre hielo o nieve con lavas o CDP, en erupciones desde una magnitud moderada (con IEV entre 1 y 2). Corresponde a los volúmenes intermedios a máximos de lahares generados por CDPs.

Zona 3: Zonas inundables por grandes lahares generados por la interacción entre hielo o nieve con lavas, en erupciones de gran magnitud (IEV  $\geq 2$ ), ocasionando la rápida fusión del hielo o nieve disponible. Corresponden a los lahares de mayor volumen calculado anteriormente, generados por la interacción entre glaciares o nieve con lavas.



Zona 4: Zonas inundables por lahares en caso de una reactivación de la fisura SW, en períodos donde el volcán esté cubierto por nieve.

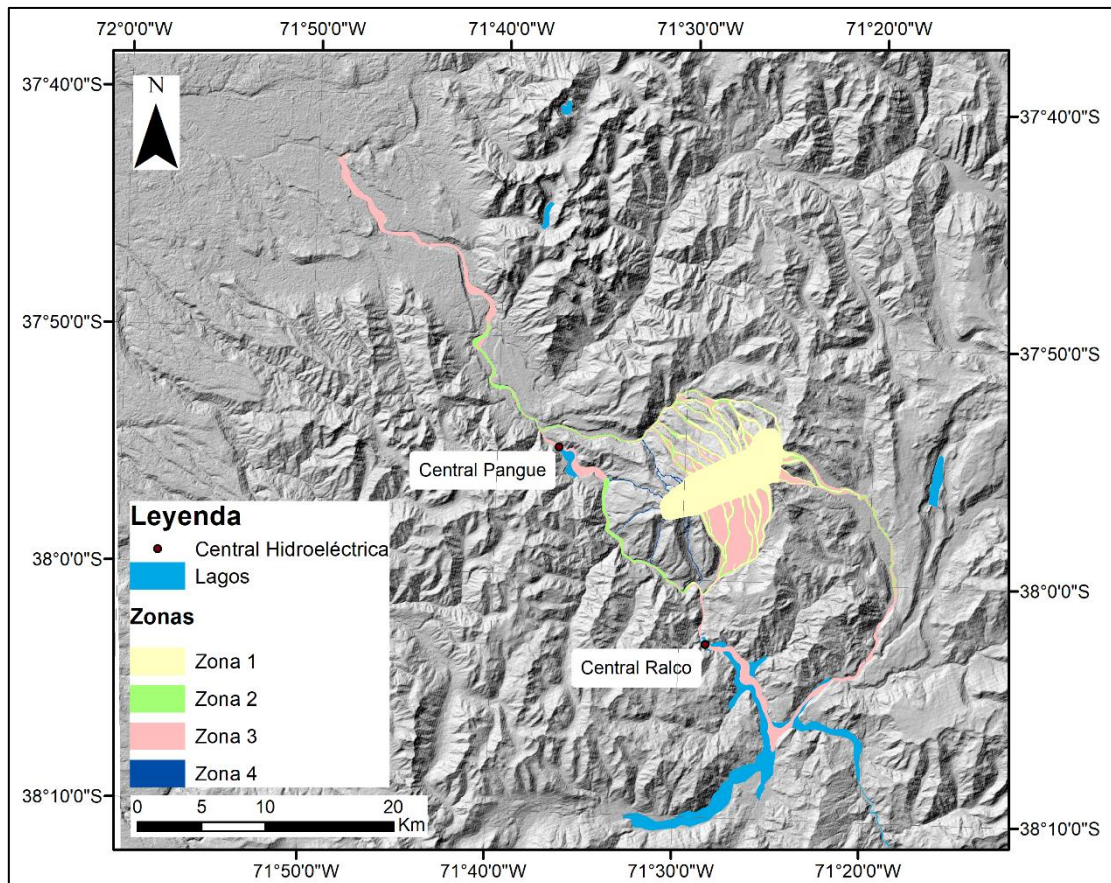


Figura 4.6 Zonación del peligro volcánico de lahares en el Volcán Callaqui.

## 4.2. Volcán Llaima

### 4.2.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares

El volcán Llaima, en tiempos históricos, ha registrado más de 10 erupciones con generación de lahares (Tabla 2.2; Subcapítulo 2.2.3.). Las erupciones que han presentado lahares son: 1640, 1780 – 1853, 1875 – 1876, 1895 – 1896, 1932 – 1933, 1945, 1946 – 1947, 1956, 1957, 1979, 1994, 2007 – 2009. Las erupciones más frecuentes poseen un IEV = 2 (77.3%), seguidas por magnitudes IEV = 3 (14.8%), y ocasionalmente IEV = 1 (7.5%). Además de esto, se estima que el Vn. Llaima genera una erupción IEV = 2 cada 5.6 años (Dzierma y Wehrmann, 2010).

La erupción del año 1640 es la más grande conocida. Esta presentó eyección de balísticos, gases sulfurosos y lahares calientes, los cuales descendieron por el río Trifultruful, perturbando los ríos Allipén y Toltén. Adicionalmente, se produjeron derrumbes en los cerros cercanos e inundaciones por el embalsamiento de algunos ríos por flujos laháricos (Ovalle, 1646; Rosales, 1877, en Navarrete, 2017).

En la reciente erupción del 2007 – 2009 se generaron pequeños lahares en los flancos del volcán en distintas fases eruptivas, los cuales fueron gatillados por el derretimiento glacial inmediato por material incandescente (Moreno *et al.*, 2019).

La actividad eruptiva esperada para el Vn. Llaima es de tipo estromboliano, con fases subplinianas, y también en ocasiones de tipo hawaiano (González-Ferrán, 1995). Estas erupciones están acompañadas por coladas de lava, formación de lahares, proyección de balísticos y ocasionalmente flujos piroclásticos (SERNAGEOMIN, 2015a). Debido al mecanismo de generación de lahares en este volcán, el cual se caracteriza por una rápida fusión de nieve o hielo durante las etapas álgidas de una erupción, propiciando una súbita descarga de agua subglacial (Naranjo y Moreno, 2005), se espera que las erupciones que generen coladas de lava o corrientes de densidad piroclástica de tamaños significativos produzcan lahares importantes, alcanzando velocidades máximas de 30 – 40 km/hr y velocidades promedio de 15 – 20 km/hr, los cuáles se encausan en los valles de los ríos aledaños al volcán, afectando en casos extremos a los poblados cercanos (Melipeuco, Cherquenco, otras localidades rurales y, en menor medida, Curacautín). Naranjo y Moreno (2005) reconocen seis glaciares principales independientes dispuestos en forma de lenguas glaciares distribuidos desde las partes más altas hasta cotas que varían entre los 1.500 y 1.700 m. Los glaciares se disponen en los flancos occidental, suroccidental y oriental, siendo los más extensos los del sector occidental y suroccidental, con una superficie total de 19 km<sup>2</sup>, mientras que el flanco oriental presenta 4 lenguas glaciares que cubren una superficie total de 10 km<sup>2</sup>.

Naranjo y Moreno (1991) definen volúmenes de agua contenidos en los glaciares de la cima y los flancos del orden de  $535 \times 10^6 \text{ m}^3$ , además de volúmenes de agua aportados por la nieve temporal, presente en los períodos de invierno y primavera, de  $300 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Finalmente, se definen 3 escenarios eruptivos para el volcán Llaima sobre la base de la actividad eruptiva histórica, explosiva y sus depósitos (Tabla 4.9): El primer escenario corresponde a una

erupción de baja explosividad y estilo eruptivo estromboliano a vulcaniano, fundamentada en erupciones históricas recopiladas por Petit-Breuilh y Lobato (1994) desde 1640, principalmente en la reciente erupción de 2007-2009, la cual presentó diferencias en la energía liberada a lo largo del ciclo eruptivo, con fases explosivas y energéticas y fases de mayor calma. El segundo escenario corresponde a la mayor erupción registrada por el volcán en tiempos históricos (año 1640), la cual generó lahares calientes que bajaron por los valles de los ríos Allipen y Toltén, además del embalsamiento y crecida de algunos ríos. Finalmente, el tercer escenario se fundamenta en los depósitos holocenos del volcán, los cuales dan cuenta de eventos violentos y energéticos, con desarrollo de corrientes de densidad piroclástica y produciendo el colapso parcial del cono de las unidades Llaima Ancestral 1 y 2 (Naranjo y Moreno, 2005).

Tabla 4.9 Síntesis de las características de los escenarios definidos.

Escenario	IEV	Tipo de Actividad	Fenómenos Eruptivos (además de lahares)
1-2 Pequeño	1-2	Estromboliana	Caída de tefra, balísticos, flujos piroclásticos y flujos de lava
2 Moderado	3	Estromboliana - Subpliniana	Caída de tefra, balísticos y flujos piroclásticos
3 Grande	>4	Subpliniana - Pliniana	Caída de tefra, balísticos y flujos piroclásticos

#### 4.2.2. Estimación de volumen de lahares

##### 4.2.2.1. Subdivisión de cuencas y estimación del volumen glaciar

Las cuencas del volcán Llaima fueron subdivididas sobre la base de un análisis detallado de la red hidrográfica de la zona de estudio, a partir del modelo de elevación digital (DEM) de resolución de 12,5 m. Se identificaron 12 cuencas hidrográficas, de las cuales sólo 6 reciben aporte directo desde el glaciar, por lo que estas se consideran para la modelación de flujos laháricos. Las cuencas analizadas se denominan: Negro, Captrén, Seco, Calbuco, Membrillo y Triful.

Considerando el glaciar definido por Rivera (2011), se identifican 6 subdivisiones glaciares de acuerdo con las cuencas hidrográficas que recibirían aportes del casquete (Figura 4.7), cuyas áreas, volúmenes de glaciares y volúmenes de agua equivalente disponible en el glaciar, calculados mediante las ecuaciones descritas en el Capítulo 3 de metodología se indican en la Tabla 4.10. El espesor utilizado para el cálculo de volumen de este volcán es de 20 m y fue definido de acuerdo con Rivera (2011).



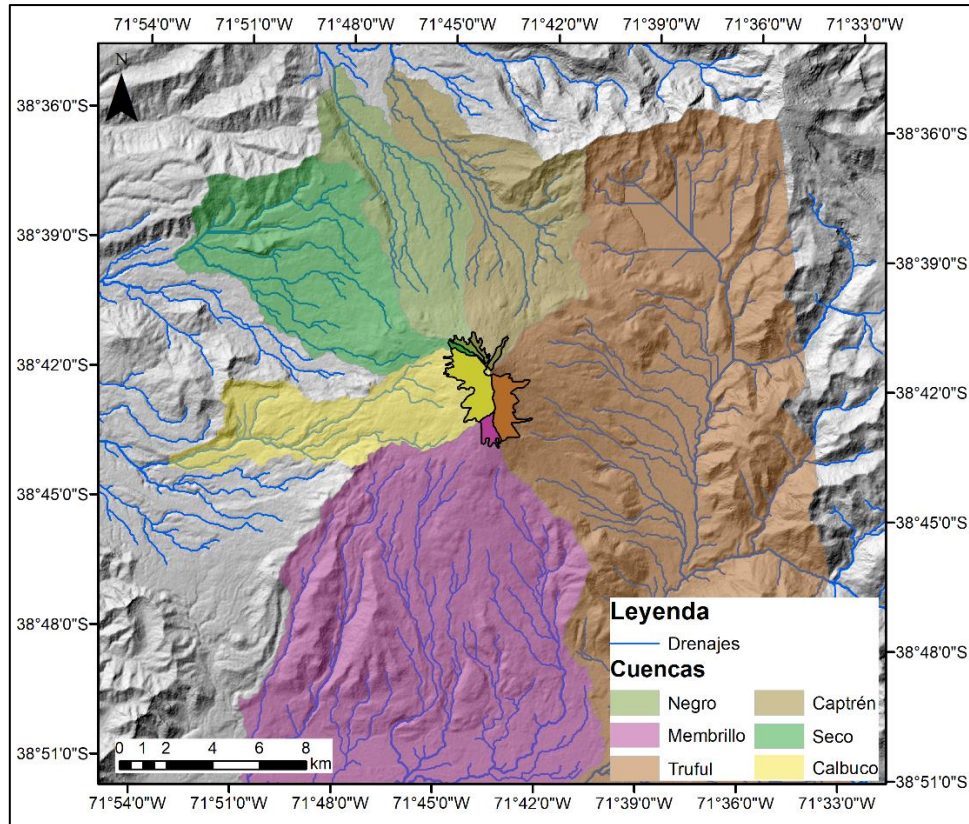


Figura 4.7 Subdivisión de cuencas, glaciares y red hídrica del volcán Llaima. Elaboración propia basándose en Rivera (2011) para delimitar las áreas glaciares.

Tabla 4.10 Volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas.

Cuenca	Área de glaciar (m <sup>2</sup> )	Espesor del glaciar (m)	Volumen de glaciar (m <sup>3</sup> )	Volumen de glaciar EQ agua (m <sup>3</sup> )
Negro	381.068	20	7.621.362	7.011.653
Captren	628.351		12.567.038	11.561.674
Seco	265.801		5.316.020	4.890.738
Calbuco	3.632.587		72.651.744	66.839.604
Membrillo	736.767		14.735.350	13.556.522
Triful	2.626.655		52.533.106	48.330.457

#### 4.2.2.2. Volumen de lahar por acción de coladas de lava

Se considera la emisión probable de flujos de lava entre 1 y 15 m de espesor y anchos que varían entre 5 – 20 m, sobre la base del mapa geológico disponible para el volcán (Naranjo y Moreno, 2005) e imágenes satelitales del área. Para el cálculo del volumen mínimo se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de lava de 1 m y 5 m, respectivamente. En el caso del volumen

intermedio se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de 5 m y 15 m, respectivamente. Finalmente, para el cálculo del volumen máximo se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de 15 m y 20 m, respectivamente (Tabla 4.11).

Tabla 4.11 Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Llaima por lavas.

Cuenca	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]
Negro	15.640	273.700	2.346.000
Captren	13.800	241.500	2.070.000
Seco	16.560	289.800	2.484.000
Calbuco	21.252	371.910	3.187.800
Membrillo	13.800	241.500	2.070.000
Triful	16.560	289.800	2.484.000

Mediante el recálculo del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.12).

Tabla 4.12 Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de lava con el glaciar Llaima.

Cuenca	Volumen mínimo con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen mínimo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]
Negro	19.550	195.500	782.000	39.100	391.000	1.564.000
Captren	17.250	172.500	690.000	34.500	345.000	1.380.000
Seco	20.700	207.000	828.000	41.400	414.000	1.656.000
Calbuco	26.565	265.650	1.062.600	53.130	531.300	2.125.200
Membrillo	17.250	172.500	690.000	34.500	345.000	1.380.000
Triful	20.700	207.000	828.000	41.400	414.000	1.656.000



#### 4.2.2.3. Volumen de lahar por acción de CDPs

Se considera la emisión probable de CDP de 1 a 8 m de espesor y anchos que varían entre 10 – 100 m, sobre la base de los trabajos de Naranjo y Moreno (1991) y Pierson *et al* (1990), información obtenida en terreno e imágenes satelitales del área. Para el cálculo se utilizan valores de espesor y ancho de 1 m y 10 m, 4 m y 55 m, y 8 m y 100 m, entregando resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos de hielo fundido para el Volcán Llaima (Tabla 4.13).

Tabla 4.13 Volúmenes de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Llaima.

Cuenca	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]
Negro	31.280	258.060	625.600
Captren	27.600	227.700	552.000
Seco	33.120	273.240	662.400
Calbuco	42.504	350.658	850.080
Membrillo	27.600	227.700	552.000
Triful	33.120	273.240	662.400

Mediante el recalcu del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.14).

Tabla 4.14 Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Llaima.

Cuenca	Volumen mínimo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen mínimo con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]
Negro	97.750	879.750	1.564.000	195.500	1.759.500	3.128.000
Captren	172.500	1.552.500	2.760.000	345.000	3.105.000	5.520.000
Seco	55.200	496.800	883.200	110.400	993.600	1.766.400
Calbuco	97.750	879.750	1.564.000	195.500	1.759.500	3.128.000
Membrillo	149.500	1.345.500	2.392.000	299.000	2.691.000	4.784.000
Triful	118.450	1.066.050	1.895.200	236.900	2.132.100	3.790.400

#### 4.2.3. Modelado de inundación con LaharZ

Para el volcán Llaima, el escenario 1 se ve representado por los volúmenes mínimos calculados para lahares generados por acción de coladas de lava, con la respectiva variación en el volumen final dependiendo del porcentaje de detritos (20% y 60%; subcapítulo 3.3.). El escenario 2 se

representa por los volúmenes intermedios calculados para lahares generados por coladas de lava o CDPs y el escenario 3 corresponde a los volúmenes máximos de lahares generados por lavas o CDPs.

De acuerdo con lo anterior, se realizan 4 modelaciones para el volcán Llaima en el software LaharZ, cuyos volúmenes de entrada para el modelo son obtenidos desde la Tabla 4.12 y 4.14, y corresponden a i) lahares generados por lavas con un 20% de detritos (Figura 4.8), ii) lahares generados por lavas con un 60% de detritos, iii) lahares generados por CDP con 60% de detritos, y iv) lahares generados por CDP con un 75% de detritos. En esta sección se presenta un ejemplo del resultado obtenido con la modelación en LaharZ, los mapas restantes se encuentran en el Anexo 1.

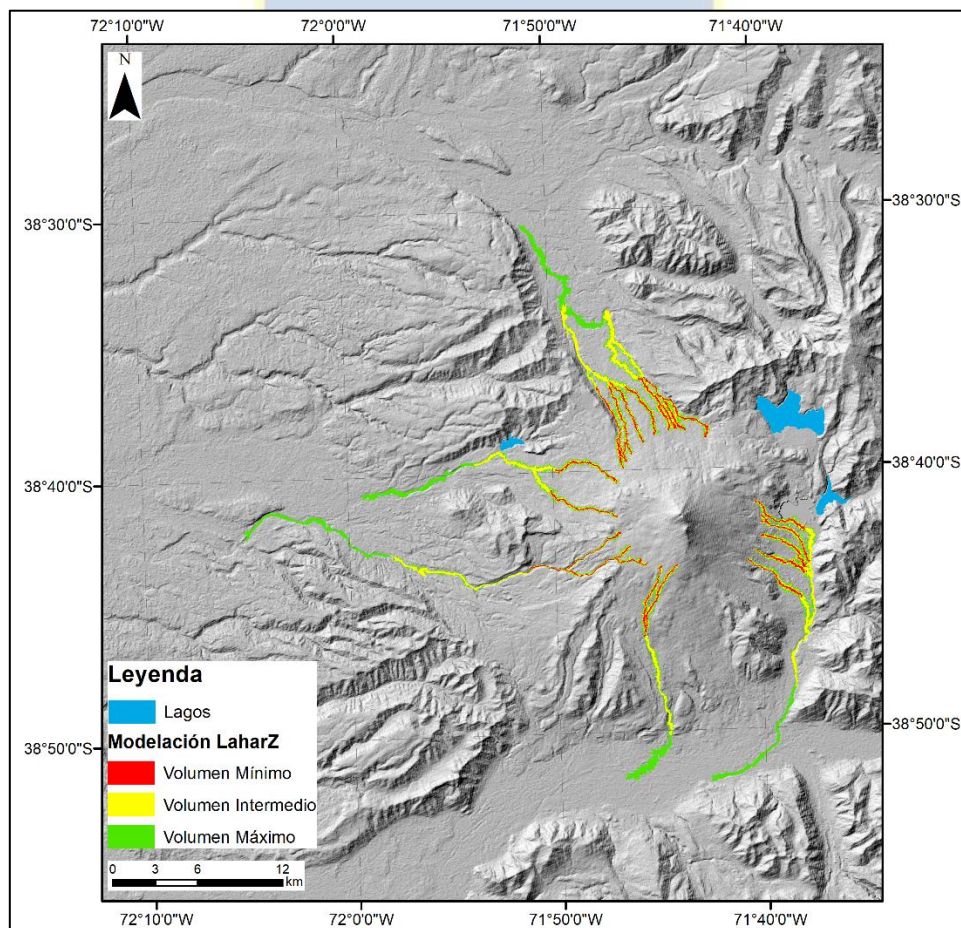


Figura 4.8 Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Llaima, en el caso de lahares generados por lavas con un 20% de detritos. El volumen mínimo es de  $1,2 \times 10^5 \text{ m}^3$ , el volumen intermedio de  $2,1 \times 10^6 \text{ m}^3$  y el volumen máximo de  $1,8 \times 10^7 \text{ m}^3$ .

#### 4.2.3.1. Tolerancia de sección transversal en puentes

Según las dimensiones obtenidas en terreno, los resultados de las áreas transversales calculadas en los puentes visitados en las cercanías del Volcán Llaima se tabulan en la Tabla 4.15, mientras que en la Tabla 4.16 es posible visualizar los puentes que se verían comprometidos en caso de la ocurrencia de un flujo lahárico que pasara bajo estos. El cálculo del área de inundación transversal del lahar se realiza mediante la ecuación definida anteriormente para la sección transversal de un lahar ( $A = 0.02 * V^{2/3}$ ).

Tabla 4.15 Área transversal de los principales puentes en vías de evacuación.

Puente	Coordenada X	Coordenada Y	Largo (m)	Altura (m)	Área transversal del puente (m <sup>2</sup> )	Cuenca asociada
Pte. Captrén 1	253475	5736090	15.08	2.67	33	Captrén - Llaima
Pte. Captrén 2	257053	5727496	20.01	2.52	30	Captrén - Llaima
Pte. El Negro	257882	5720188	12.36	1.96	20	Negro - Llaima
Pte. Quepe	760817	5713807	65.41	31.59	1254	Seco - Llaima
Pte. Quepe Sur	758965	5713067	33.32	4.9	120	Calbuco - Llaima
Pte. El Seco	252522	5715669	27.43	4.8	80	Seco - Llaima
Pte. Lanlan 1	246985	5715295	28.32	8.15	132	Seco - Llaima
Pte. Lanlan 2	248295	5715828	51.82	4.4	144	Seco - Llaima
Pte. Lanlan 3	251541	5714804	14.87	3.36	31	Seco - Llaima
Pte. Colorado	256629	5725218	34.50	4.25	113	Captrén - Llaima
Pte. Sin Nombre 2	242755	5714679	88.43	7.34	492	Triful - Llaima

Para este volcán, casi la totalidad de los puentes se ve sobrepasado por lahares generados por lavas y CDP, con volúmenes intermedios y máximos, mientras que incluso un puente se ve sobrepasado por volúmenes mínimos de lahares, como es el caso del Puente El Negro (Tabla 4.16).

Tabla 4.16 Evaluación de las áreas transversales que alcanzarían los flujos laháricos. En rojo se muestran las que superan las respectivas áreas de los puentes, indicando daño al puente o interrupción de la vía de evacuación.

Puente	Volumen mínimo (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	Volumen intermedio (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	Volumen máximo (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )
Pte. Captrén 1	17250	13	258750	81	1380000	248
Pte. Captrén 2	17250	13	258750	81	1380000	248
Pte. El Negro	19550	15	293250	88	1564000	269
Pte. Quepe	20700	15	310500	92	1656000	280

Tabla 4.16 Evaluación de las áreas transversales que alcanzarían los flujos laháricos. En rojo se muestran las (Continuación) que superan las respectivas áreas de los puentes, indicando daño al puente o interrupción de la vía de evacuación.

Pte. Quepe Sur	26565	18	398475	108	2125200	331
Pte. El Seco	20700	15	310500	92	1656000	280
Pte. Lanlan 1	20700	15	310500	92	1656000	280
Pte. Lanlan 2	20700	15	310500	92	1656000	280
Pte. Lanlan 3	20700	15	310500	92	1656000	280
Pte. Colorado	17250	13	258750	81	1380000	248
Pte. Sin Nombre 2	20700	15	310500	92	1656000	280
Escenario de flujo lahárico por generación de CDPs						
Puente	Volumen mínimo (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	Volumen intermedio (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	Volumen máximo (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )
Pte. Captrén 1	34.500	21	986.700	198	4.416.000	538
Pte. Captrén 2	34.500	21	986.700	198	4.416.000	538
Pte. El Negro	39.100	23	1.118.260	215	5.004.800	585
Pte. Quepe	41.400	24	1.184.040	224	4.890.738	576
Pte. Quepe Sur	53.130	28	1.519.518	264	6.800.640	718
Pte. El Seco	41.400	24	1.184.040	224	4.890.738	576
Pte. Lanlan 1	41.400	24	1.184.040	224	4.890.738	576
Pte. Lanlan 2	41.400	24	1.184.040	224	4.890.738	576
Pte. Lanlan 3	41.400	24	1.184.040	224	4.890.738	576
Pte. Colorado	34.500	21	986.700	198	4.416.000	538
Pte. Sin Nombre 2	41.400	24	1.184.040	224	5.299.200	608

#### 4.2.4. Zonas de peligro por flujos laháricos

Como se mencionó anteriormente, los volúmenes de los lahares modelados están relacionados directamente con los escenarios eruptivos definidos y sus productos, por lo que se definen las zonas de peligro según el alcance que pueden tener los lahares bajo determinadas condiciones de generación y sus volúmenes asociados (Figura 4.9).

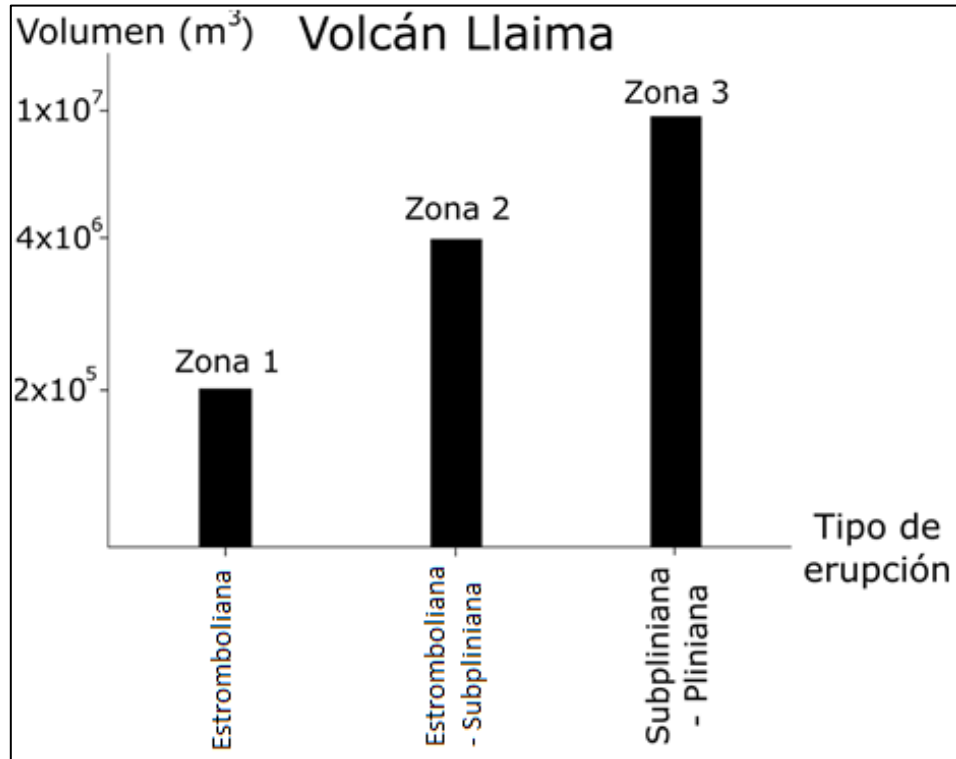


Figura 4.9 Relación entre escenarios y volúmenes de lahares determinados.

Según los volúmenes de lahares definidos anteriormente, su relación con los escenarios eruptivos, la modelación con LaharZ y el análisis de la bibliografía e información recopilada durante este trabajo se definen 3 zonas de peligros para el Volcán Llaima (Figura 4.10):

Zona 1: Áreas de máxima probabilidad de inundación por lahares para erupciones de baja magnitud, con un IEV = 1 y volúmenes de lahares del orden de  $1 \times 10^5 \text{ m}^3$  o mayor. Incluye la zona proximal de peligro volcánico en la cual se genera la fusión de hielo/nieve por lavas o CDPs y donde comienzan los lahares.

Zona 2: Áreas susceptibles a ser inundadas por lahares generados desde erupciones de mediana magnitud (IEV = 2) y volúmenes del orden de  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  o mayor.

Zona 3: Zonas inundables por grandes lahares generados en erupciones de gran magnitud (IEV  $\geq 2 - 3$ ) y volúmenes del orden de  $1 \times 10^7 \text{ m}^3$  o mayor.



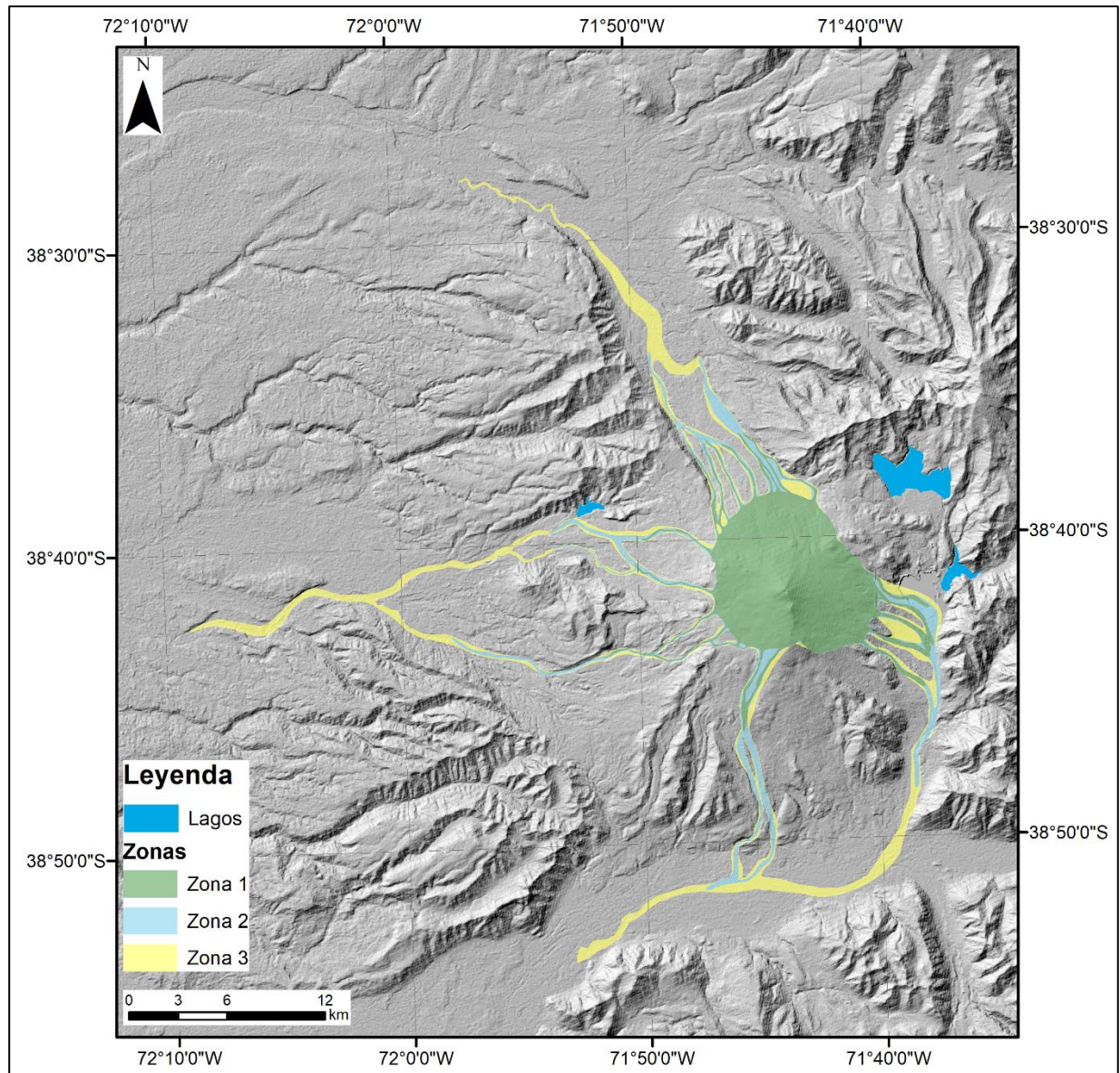


Figura 4.10 Zonación del peligro volcánico de lahares en el Volcán Llaima.

### 4.3. Volcán Lonquimay

#### 4.3.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares

La información eruptiva documentada para el Lonquimay es escasa y fragmentada (Tabla 2.3; Subcapítulo 2.3.4.). No obstante, es posible asumir que las erupciones históricas de IEV igual a 2 - 3, similar al último ciclo eruptivo, tienen un patrón de comportamiento semejante al de las erupciones explosivas holocenas. Bajo este supuesto, la tasa eruptiva para estas erupciones resulta de 3.6 erupciones por siglo con períodos de recurrencia de 17 y 55 años. Ahora bien, si sólo se

consideran aquellas erupciones históricas estrombolianas que han generado coladas de lava, la tasa disminuye a 2.2 erupciones por siglo.

Además, existe escasa evidencia sobre la generación de lahares, salvo en la parte NE y N del edificio volcánico, donde parecen estar asociados a coladas de lava (Polanco, 2010). Además de esto, se ha reportado la presencia de depósitos de origen lahárico en las rocas que conforman el basamento del volcán (Vergara, 2010; Contreras, 2013) por lo que estos flujos han ocurrido a lo largo de la conformación de este. Estos fenómenos serían relativamente pequeños y de escaso impacto, y se circunscriben a los flancos del volcán, alejados de los centros poblados, aún en caso de ocurrir en pleno invierno (Polanco, 2010). En contraste con esto, Naranjo *et al* (2000) realizan un mapa de peligros volcánicos en donde la amenaza de lahares es menos optimista, inundando zonas cercanas a centros poblados.

Según Naranjo *et al* (2000), posibles lahares se encausarían hacia el NE, en el valle del río Lolco, alcanzando extensiones aproximadas de hasta 29 km. Hacia el SW, la zona de influencia de estos flujos posee una extensión de 25 km aproximadamente, siguiendo los valles de los ríos El Indio, Blanco y Cautín, pudiendo afectar en su recorrido a poblados como Panquehue y Santa Luisa, cortando caminos no pavimentados y las principales vías de evacuación de la zona (ruta R – 761, ruta R-89). Finalmente, en dirección S, los lahares se extenderían aproximadamente 12 km por valles como el Cajón Cuchillo y del río Colorado, afectando el centro turístico Corralco y cortando vías de evacuación (R – 89), dejando aislada la localidad de Malalcahuello.

Otros volcanes correlacionables con el Lonquimay por su composición similar, la ocurrencia de erupciones explosivas y la cantidad de agua disponible, como el Monte Mayón en Filipinas y el Reventador en Ecuador (Tabla 4.17) han generado lahares.

El Monte Mayón corresponde a un estratovolcán con erupciones de tipo estrombolianas a plinianas originadas principalmente desde su cráter principal (Global Volcanism Program, 2013). Sus erupciones frecuentemente están acompañadas de CDPs que alcanzan una longitud máxima desde la cima de ~ 7 km (Moore y Nelson, 1969 en Jorquera, 2019) El volcán ha producido numerosos lahares calientes relacionados a erupciones, acompañados de lahares fríos generados por lluvias en períodos posteriores a ciclos eruptivos (Arguden y Rodolfo, 1990). Posee un registro de al menos 59 lahares gatillados por lluvias desde la erupción del año 1984, la cual también generó un lahar

con un volumen de  $1.25 \times 10^6 \text{ m}^3$ , debido a corrientes ascendentes que produjeron lluvia en el sector (Rodolfo y Arguden, 1991).

El volcán Reventador es un estratovolcán que ha generado al menos 19 erupciones desde 1541 a la fecha (Hall *et al.*, 2004; Global Volcanism Program, 2013) se han reportado 20 flujos laháricos en las últimas 30 erupciones inventariadas, causando una destrucción mucho mayor que la erupción en sí, además de pérdidas humanas (D'Ercole, 1989). Estos lahares habrían alcanzado velocidades superiores a 40 km/hr en un radio de 20 a 40 km del cráter (Hall, 1987 en D'Ercole, 1989).

Tabla 4.17 Tabla comparativa entre el Vn. Lonquimay y volcanes similares.

Nombre	Tipo	Composición	Altura (m)	IEV (frecuente)
Lonquimay	Estratovolcán	Andesítico, andesítico-basáltico	2.865	2-3
Mayón	Estratovolcán	Andesítico, andesítico-basáltico	2.462	2-3
Reventador	Estratovolcán	Andesítico, andesítico-basáltico	3.562	2-3

Sobre la base de la actividad histórica del Vn. Lonquimay y su comparación con la actividad de volcanes similares, se definen 3 posibles escenarios eruptivos, que se presentan en la Tabla 4.18, siendo el escenario 2, el más probable (IEV = 3), mientras que el 3 el más desfavorable pero menos probable (IEV = 4). El primer escenario (1) se define basándose en la actividad histórica del volcán, principalmente en las erupciones de los años 1887-1890 y 1933, las cuales presentaron un IEV de 2 según la recopilación de antecedentes de Petit-Breuilh (2004). El segundo escenario (2) se justifica en sus depósitos antiguos (Subcapítulo 2.3.3) y el último período eruptivo que presentó el volcán, caracterizada por el desarrollo de un nuevo cono (Navidad) en el flanco oriental del volcán, la extrusión de flujos de lava viscosa de tipo bloque y una columna eruptiva de 9 km de altura; esta erupción alcanzó un valor 3 de IEV. Finalmente, sobre la base de la actividad presentada por los volcanes Mayón y Reventador, cuyas características son similares al Lonquimay y poseen un registro eruptivo más amplio se define el tercer escenario (3), de características más explosivas y con el desarrollo de CDPs que bajan por los flancos del volcán, provocando el derretimiento de la cubierta de hielo/nieve.

Tabla 4.18 Síntesis de las características de los escenarios definidos.

Escenario	IEV	Tipo de Actividad	Fenómenos Eruptivos (además de lahares)
1 Bajo-Moderado	2	Estromboliana	Caída de tefra, balísticos, flujos piroclásticos y flujos de lava
2 Moderado	3	Estromboliana - Subpliniana	Caída de tefra, balísticos y flujos piroclásticos
3 Grande	4	Subpliniana - Pliniana	Caída de tefra, balísticos y flujos piroclásticos

#### 4.3.2 Estimación de volumen de lahares

##### 4.3.2.1. Subdivisión de cuencas y estimación del volumen glaciar

Las cuencas del volcán Lonquimay fueron subdivididas realizando un análisis detallado de la red hidrográfica de la zona de estudio, a partir del modelo de elevación digital (DEM) de resolución de 12,5 m. Se identificaron 12 cuencas hidrográficas, de las cuales sólo 6 reciben aporte directo desde el glaciar, por lo que estas se consideran para la modelación de flujos laháricos. Las cuencas analizadas se denominan: Verde, Coloradito, Coloradito 2, Colorado, Navidad y Blanca.

Considerando el glaciar definido por Rivera (2011), se identifican 6 subdivisiones glaciares de acuerdo con las cuencas hidrográficas que recibirían aportes del casquete (Tabla 4.19; Figura 4.1), cuyas áreas, volúmenes de glaciares y volúmenes de agua equivalente disponible en el glaciar, calculados mediante las ecuaciones descritas en el Capítulo 3 de metodología se indican en la Tabla 4.3. El espesor utilizado para el cálculo de volumen de este volcán es de 20 m y fue definido según Rivera (2011).

Tabla 4.19 Volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas.

Cuenca	Área de glaciar (m <sup>2</sup> )	Espesor del glaciar (m)	Volumen de glaciar (m <sup>3</sup> )	Volumen de glaciar EQ agua (m <sup>3</sup> )
Verde	91.480	20	1.829.614	1.683.244
Navidad	26.476		529.534	487.171
Blanca	381.705		7.634.100	7.023.372
Coloradito	107.821		2.156.422	1.983.908
Coloradito 2	134.295		2.685.916	2.471.042
Colorado	248.116		4.962.336	4.565.349



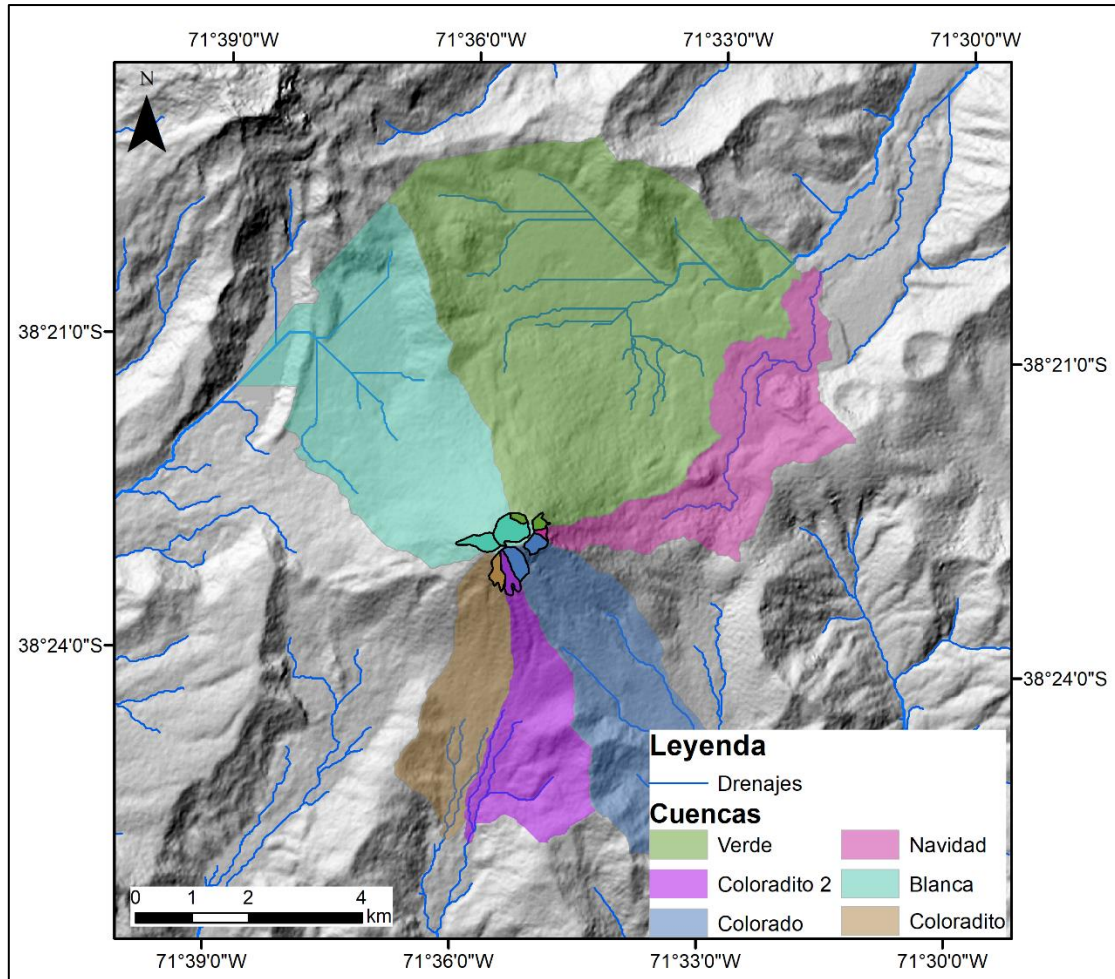


Figura 4.11 Red hídrica, subdivisión de cuencas y glaciar del volcán Lonquimay. Elaboración propia con base en Rivera (2011) para el área del glaciar.

#### 4.3.2.2. Volumen de lahar por acción de coladas de lava

Se considera la emisión probable de flujos de lava entre 5 y 20 m de espesor y anchos que varían entre 10 – 80 m, basándose en los trabajos de Gho (2013) y Contreras (2013), e imágenes satelitales del área. Para el cálculo del volumen mínimo se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de lava de 5 m y 20 m, respectivamente. En el caso del volumen intermedio se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de 12 m y 45 m, respectivamente. Finalmente, para el cálculo del volumen máximo se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de 20 m y 80 m, respectivamente (Tabla 4.20).



Tabla 4.20 Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Lonquimay por lavas.

Cuenca	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]
Verde	31.740	285.660	507.840
Navidad	20.240	182.160	323.840
Blanca	64.400	579.600	1.030.400
Coloradito	62.560	563.040	1.000.960
Coloradito 2	72.680	654.120	1.162.880
Colorado	59.800	538.200	956.800

Mediante el recálculo del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.21).

Tabla 4.21 Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de lava con el glaciar Lonquimay.

Cuenca	Volumen mínimo con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen mínimo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]
Verde	39.675	357.075	634.800	79.350	714.150	1.269.600
Navidad	25.300	227.700	404.800	50.600	455.400	809.600
Blanca	80.500	724.500	1.288.000	161.000	1.449.000	2.576.000
Coloradito	78.200	703.800	1.251.200	156.400	1.407.600	2.502.400
Coloradito 2	90.850	817.650	1.453.600	181.700	1.635.300	2.907.200
Colorado	74.750	672.750	1.196.000	149.500	1.345.500	2.392.000

#### 4.3.2.3. Volumen de lahar por acción de CDPs

Se considera la emisión probable de CDP de 1 a 8 m de espesor y anchos que varían entre 10 – 100 m, según Pierson *et al* (1990), recálculo de volúmenes con incorporación de detritos del Volcán Lonquimay, información obtenida en terreno e imágenes satelitales del área. Para el cálculo se utilizan valores de espesor y ancho de 1 m y 10 m, 4 m y 55 m, y 8 m y 100 m, entregando resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos de hielo fundido para el Volcán Lonquimay (Tabla 4.22).

Tabla 4.22 Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Lonquimay por CDP.

Cuenca	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]
Verde	3.174	69.828	253.920
Navidad	2.024	44.528	161.920
Blanca	6.440	141.680	515.200
Coloradito	6.256	137.632	500.480
Coloradito 2	7.268	159.896	581.440
Colorado	5.980	131.560	478.400

Mediante el recálculo del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.23).

Tabla 4.23 Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Lonquimay.

Cuenca	Volumen mínimo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen mínimo con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]
Verde	7.935	174.570	634.800	12.696	279.312	1.015.680
Navidad	5.060	111.320	404.800	8.096	178.112	647.680
Blanca	16.100	354.200	1.288.000	25.760	566.720	2.060.800
Coloradito	15.640	344.080	1.251.200	25.024	550.528	2.001.920
Coloradito 2	18.170	399.740	1.453.600	29.072	639.584	2.325.760
Colorado	14.950	328.900	1.196.000	23.920	526.240	1.913.600

#### 4.3.3. Modelado de inundación con LaharZ

El escenario 1 se ve representado por los volúmenes mínimos calculados para lahares generados por acción de coladas de lava, con la respectiva variación en el volumen final dependiendo del porcentaje de detritos (20% y 60%; subcapítulo 3.3). El escenario 2 se representa por los volúmenes

intermedios calculados para lahares generados por coladas de lava o CDPs y el escenario 3 corresponde a los volúmenes máximos de lahares generados por lavas o CDPs.

De acuerdo con lo anterior, se realizan 4 modelaciones para el volcán Lonquimay en el software LaharZ, cuyos volúmenes de entrada para el modelo son obtenidos desde la Tabla 4.21 y 4.23, y corresponden a i) lahares generados por lavas con un 20% de detritos (Figura 4.12), ii) lahares generados por lavas con un 60% de detritos, iii) lahares generados por CDP con 60% de detritos, y iv) lahares generados por CDP con un 75% de detritos. En esta sección se presenta un ejemplo del resultado obtenido con la modelación en LaharZ, los mapas restantes se encuentran en el Anexo 1.

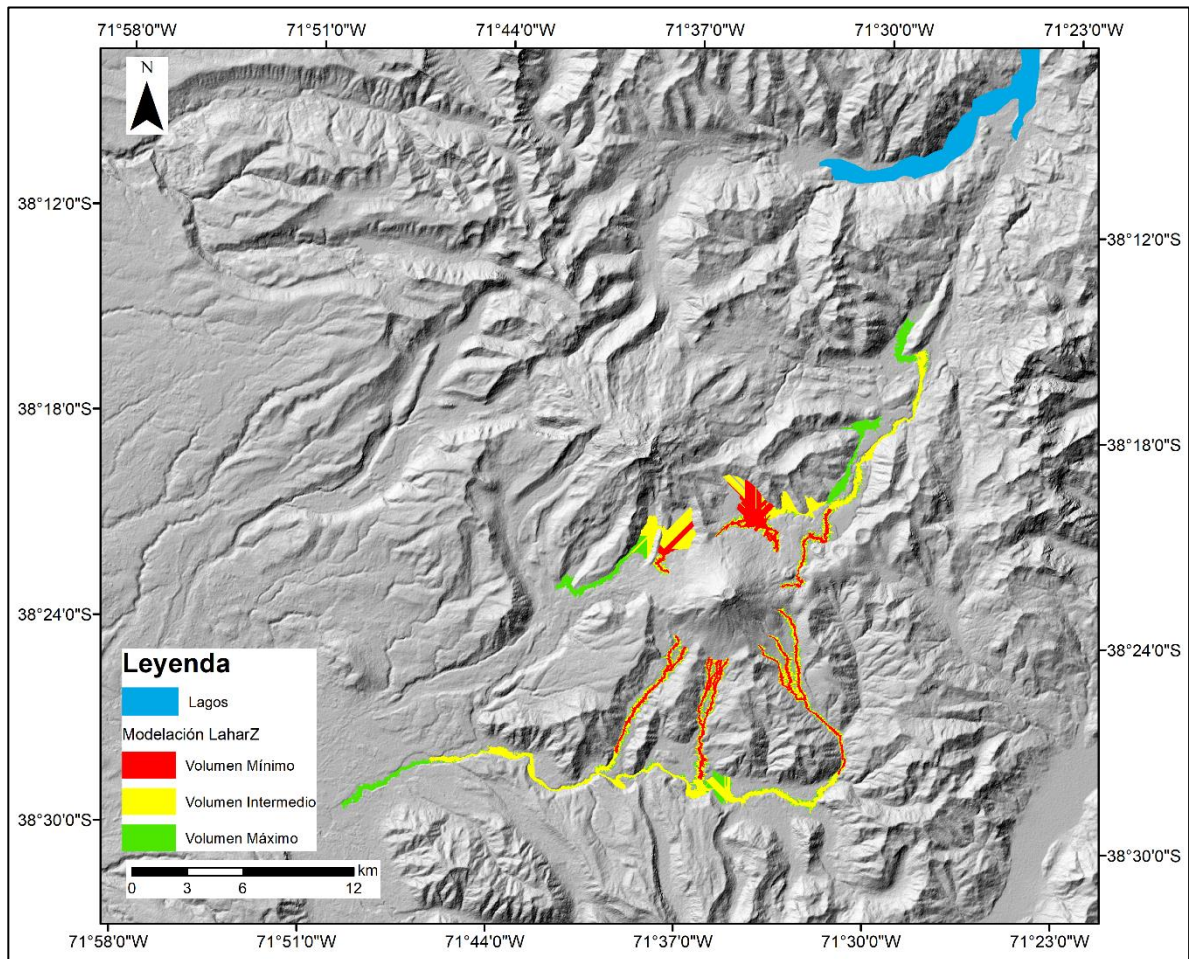


Figura 4.12

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Lonquimay, en el caso de lahares generados por lavas con un 20% de detritos. El volumen mínimo es de  $3,9 \times 10^5 \text{ m}^3$ , el volumen intermedio de  $7,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ , y el volumen máximo de  $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ .

#### 4.3.3.1. Tolerancia de sección transversal en puentes

Los resultados de las áreas transversales calculadas en los puentes visitados en las cercanías del Volcán Lonquimay se tabulan en la Tabla 4.24, mientras que en la Tabla 4.25 es posible visualizar los puentes que se verían comprometidos en caso de la ocurrencia de un flujo lahárico.

Casi la totalidad de los puentes se ve sobrepasado por lahares generados por lavas y CDP, con volúmenes intermedios y máximos, mientras que incluso un puente se ve sobrepasado por volúmenes mínimos de lahares, como es el caso del Puente Corralco (Figura 4.13).

Tabla 4.24 Área transversal de los principales puentes en vías de evacuación.

Puente	Coordenada X	Coordenada Y	Largo (m)	Altura (m)	Área transversal del puente (m <sup>2</sup> )	Cuenca asociada
Pte. Río Negro	253586	5740356	28.94	5	133	Blanca – Lonquimay
Pte. Río Blanco	260889	5739517	56.2	5.15	219	Blanca - Lonquimay
Pte. Corralco	267410	5738866	10.67	3.64	25	Colorado - Lonquimay

Tabla 4.25 Evaluación de las áreas transversales que alcanzarían los flujos laháricos. En rojo se muestran las que superan las respectivas áreas de los puentes, indicando daño al puente o interrupción de la vía de evacuación.

Escenario de flujo lahárico por emisión de lava						
Puente	Volumen mínimo (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	Volumen intermedio (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	Volumen máximo (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )
Pte. Río Negro	80500	37	1086750	211	2576000	376
Pte. Río Blanco	80500	37	1086750	211	2576000	376
Pte. Corralco	74750	35	1009125	201	2392000	358
Escenario de flujo lahárico por generación de CDPs						
Pte. Río Negro	16.100	13	460.460	119	2.060.800	324
Pte. Río Blanco	16.100	13	460.460	119	2.060.800	324
Pte. Corralco	14.950	12	427.570	114	1.913.600	308



Figura 4.13 Vista frontal del Puente Corralco.

#### 4.3.4. Zonas de peligro por flujos laháricos

Como se mencionó en la sección anterior, los volúmenes de los lahares modelados están relacionados directamente con los escenarios eruptivos definidos y sus productos, por lo que se definen las zonas de peligro según el alcance que pueden tener los lahares bajo determinadas condiciones de generación y sus volúmenes asociados (Figura 4.14).

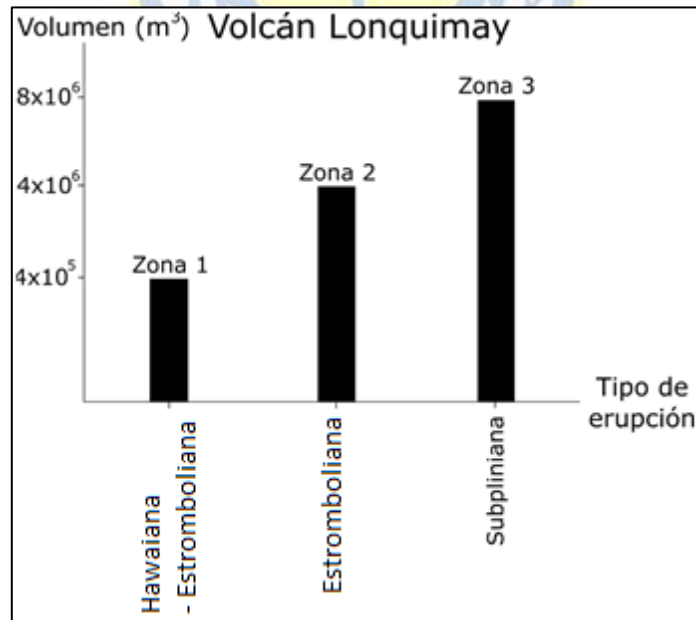


Figura 4.14 Relación entre escenarios eruptivos y volúmenes determinados.



Según los volúmenes de lahares definidos anteriormente, su relación con los escenarios eruptivos, la modelación con LaharZ y el análisis de la bibliografía e información recopilada durante este trabajo se definen 3 zonas de peligros para el Volcán Lonquimay (Figura 4.15):

Zona 1: Áreas de inundación por lahares para erupciones de baja magnitud, con un IEV entre 1 y 2. Corresponde al volumen mínimo de lahares generados por la interacción entre los glaciares con lavas o CDP. Incluye la zona proximal de peligro volcánico (H/L) en la cual se genera la fusión de hielo/nieve por lavas o CDPs y comienzan los lahares.

Zona 2: Áreas susceptibles a ser inundadas por lahares generados por la interacción entre hielo o nieve con lavas o CDP, durante erupciones desde una magnitud moderada (IEV entre 2 - 3). Corresponde a los volúmenes intermedios de lahares generados por lavas y CDP.

Zona 3: Zonas inundables por grandes lahares generados por la interacción entre hielo o nieve con lavas o CDP, en erupciones de gran magnitud (IEV  $\geq 3$ ), ocasionando la rápida fusión del hielo o nieve disponible. Corresponden a los lahares de mayor volumen calculado anteriormente, tanto de lahares generados por lavas y CDP.

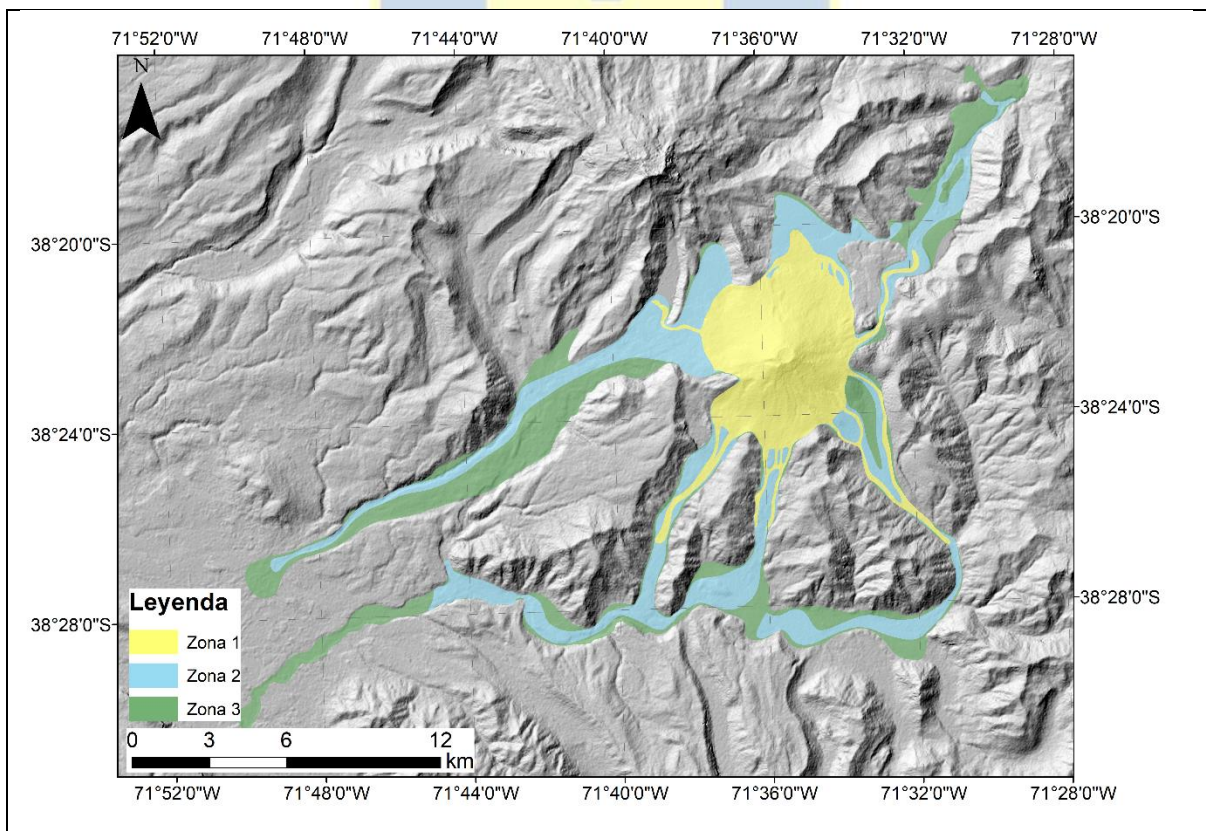


Figura 4.15 Zonación del peligro volcánico de lahares en el Volcán Lonquimay.

## 4.4. Volcán Mocho – Choshuenco

### 4.4.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares

Las últimas coladas de lava de la Unidad Mocho 5 (UM5) son de composición andesítica - dacítica (57- 64 %SiO<sub>2</sub>; Subcapítulo 2.4.2), y se espera que en una próxima erupción la composición del magma sea similar. Variaciones en la composición y propiedades físicas del magma, determinan en gran parte la magnitud de la erupción. Considerando estas características, y que el volcán no ha tenido una erupción en más de 100 años (Subcapítulo 2.4.3.), se espera que al menos durante el comienzo del nuevo ciclo eruptivo, se desarrolle una actividad explosiva capaz de generar columnas eruptivas de varios kilómetros de altura. Si la erupción continúa por semanas o meses, la explosividad podría disminuir e incluso evolucionar a una actividad más efusiva, donde predominen la creación de domos o emplazamiento de flujos de lavas. En este trabajo se considera que la actividad explosiva se desarrollará en el volcán Mocho. Esta elección se sustenta en la última actividad reconocida en la geología del área y en las descripciones sobre actividad histórica.

La formación de lavas podría comenzar a solo horas o días del comienzo de la erupción, y su origen no estaría necesariamente restringido únicamente al volcán Mocho, pero también por fisuras o aberturas adventicias en la parte superior del edificio. La unidad más reciente del volcán Mocho (UM5) muestra que se han generado lavas que han fluido hacia el oeste, desde el cráter principal, y también desde un centro adventicio a aprox. 4.2 km al oeste del cráter principal durante la erupción de 1864 (Moreno y Lara, 2007; Subcapítulo 2.4.2.).

Los lahares son considerados el principal peligro en el CVMC junto a las corrientes de densidad piroclásticas (CDP). Lahares primarios se generarían principalmente por el derretimiento parcial del glaciar que se encuentra en la cima del macizo, ocasionado por el emplazamiento de CDPs o flujos de lava sobre este. Es importante notar que el emplazamiento de un pequeño CDP es suficiente para generar un lahar de volumen considerable, capaz de recorrer decenas de kilómetros e inundar valles en las faldas del volcán. Asimismo, flujos de lava sobre el glaciar podrían generar acumulación de agua que podría liberarse repentinamente y generar lahares.

Considerando las observaciones recopiladas de las erupciones en los siglos XVIII y XIX, dos posibles escenarios para una próxima erupción son:

a) Actividad menor con explosiones discretas que generen columnas eruptivas de pocos kilómetros de altura ( $< 10$  km), CDP restringidos a la parte media superior del macizo, y posibles lahares de volumen moderado, generalmente restringidos a los valles de los principales ríos. No es posible determinar la dirección que puedan seguir los CDP o lahares.

b) Erupción subpliniana a pliniana, de magnitud similar o mayor a la de 1864, con generación de CDP que pueden llegar a las zonas bajas del macizo y afectar poblados, lahares que pueden desbordar los valles e inundar extensas áreas en zonas bajas, destruyendo o interrumpiendo puentes y vías de evacuación.

#### 4.4.2. Estimación de volumen de lahares

##### 4.4.2.1. Subdivisión de cuencas y estimación del volumen glaciar

Las cuencas del edificio volcánico del Complejo Mocho-Choshuenco fueron subdivididas efectuando un análisis detallado de la red hidrográfica de la zona de estudio, a partir del modelo de elevación digital (DEM) de resolución de 12,5 m. Con el software ArcMap, fue posible identificar un total de 12 cuencas: Punahue 1, Punahue 2, Punahue 3, Huilo, Triful, Triful SN, Blanco E, Mocho, Chico, Blanco W, Pirinel y Chumpulli. (Figura 4.16) (EULA, 2017).

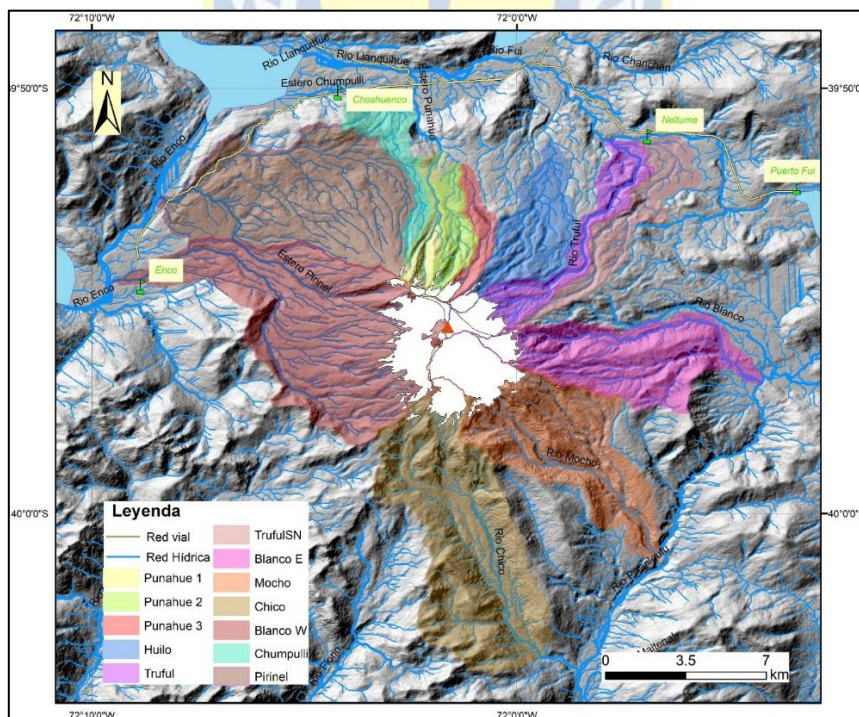


Figura 4.16 Red hídrica. Subdivisión de cuencas y glaciar del volcán Mocho-Choshuenco. Extraído de EULA, 2017.



Las cuencas sin aporte del glaciar son Chumpulli, Pirinel y TrifulSN, sin embargo, esta última igualmente será considerada en la modelación de flujos de lahar bajo un escenario en particular que será detallado más adelante, por lo tanto, se analizan 10 de las 12 cuencas identificadas en la zona del edificio del CVMC (EULA, 2017).

Particularmente las cuencas Punahue 1, 2 y 3 tienen un tratamiento especial, pues éstas se unen antes del punto de desfogue con el río Llanquihue, por tanto, se analizan en conjunto, definiendo la cuenca “Punahue”, donde se suman los resultados obtenidos de las tres subcuencas (Figura 4.17) (EULA, 2017).

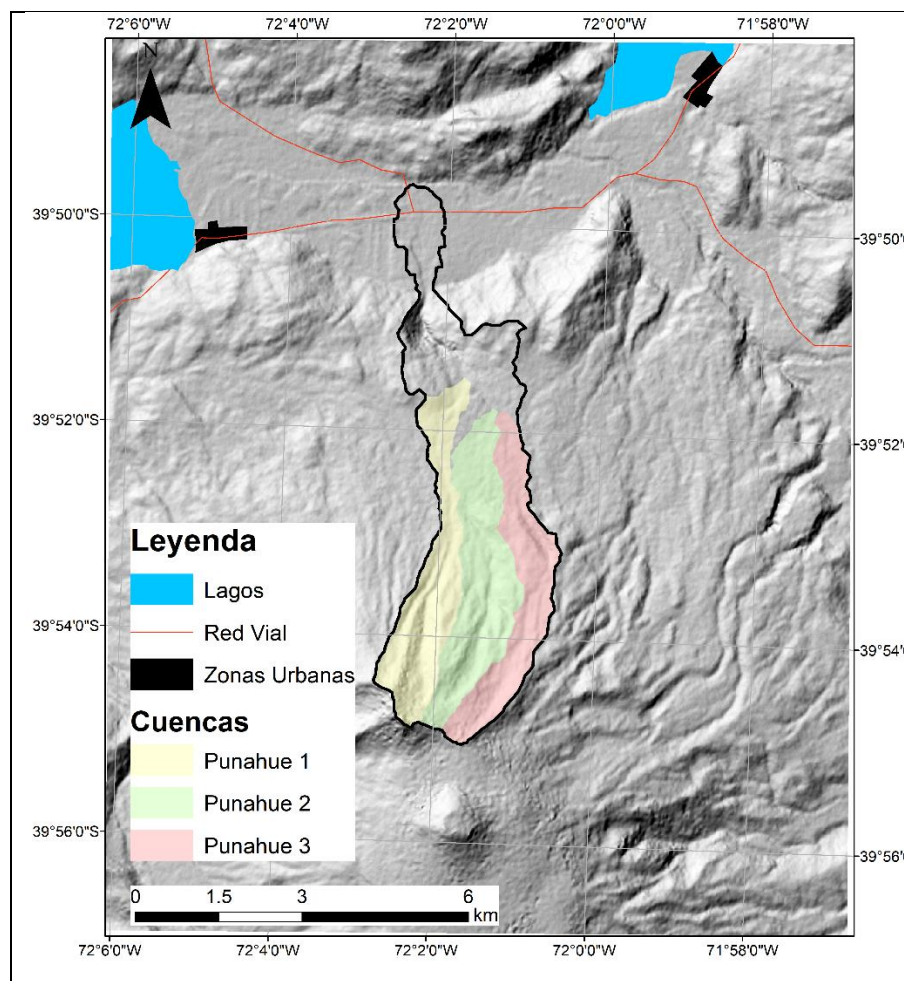


Figura 4.17 Detalle de cuencas Punahue 1, 2 y 3. Extraído de EULA (2017).

Para poder determinar el volumen de agua disponible para formar un flujo de lahar, ya sea por la emisión de lavas o por la generación de una CDP, fue necesario determinar la fracción de glaciar que podría ser fundida. Esta fracción de glaciar para cada cuenca se determinó a partir del

inventario de glaciares de la Dirección General de Aguas (DGA; Rivera, 2011) que constan de un set de datos de área, espesor medio, tipo de glaciar, altura, entre otros datos, para el glaciar Mocho-Choshuenco; con esta información superpuesta a las cuencas identificadas anteriormente, fue posible subdividir el casquete glaciar en “subcuerpos” glaciares para cada cuenca delimitada. Con ello fue posible estimar el volumen de agua que podría ser incorporado en un flujo de lahar, a partir del derretimiento de hielo (Tabla 4.26; EULA, 2017).

Tabla 4.26 Volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas (Inventario de Glaciares DGA, 2015). Extraído de EULA (2017).

Cuenca	Área de glaciar [m <sup>2</sup> ]	Volumen de glaciar [m <sup>3</sup> ]	Volumen del glaciar EQ agua [m <sup>3</sup> ]
Punahue 1	266.765	5.071.073	4.665.388
Punahue 2	222.674	5.232.213	4.813.636
Punahue 3	406.505	10.925.591	10.051.544
Huilo	611.205	23.005.398	21.164.966
Triful	2.154.173	98.258.120	90.397.470
Triful SN	222.674	5.232.213	4.813.636
Blanco E	1.144.228	72.150.393	66.378.361
Mocho	5.747.881	363.992.771	334.873.350
Chico	1.678.595	102.571.124	94.365.434
Blanco W	6.006.737	305.507.991	281.067.352
Punahue	895.944	21.228.878	19.530.568

#### 4.4.2.2. Volumen de lahar por acción de coladas de lava

Bajo este escenario consideraremos la probable emisión de flujos de lavas entre 5 y 10 m de espesor y anchos variables entre 70 a 120 m, esto según el mapa geológico del complejo volcánico (Moreno y Lara, 2007). Las lavas emitidas durante el Holoceno y tiempos históricos han sido claramente identificadas en el mapa geológico, la primera de estas corresponde a una colada que se extiende por el sector oeste del volcán, sin embargo, se consideran las dimensiones de ancho que posee en el sector más próximo al cráter del volcán Mocho (entre 70 y 120 m), pues corresponde al lugar de interacción con el glaciar. El espesor máximo que se utiliza para la modelación corresponde igualmente al valor reportado por coladas dacíticas de la Unidad Mocho 5, mientras que el valor



mínimo es un valor de referencia basado en otras coladas de lavas asociadas al complejo, pero igualmente emitidas por el volcán Mocho. Es necesario además considerar la longitud del glaciar que podría estar en contacto con la colada de lava, que fue posible estimar con los datos reportados por la DGA.

Particularmente para las cuencas Punahue 1, 2, Triful SN y Punahue, bajo los parámetros máximos, los valores obtenidos según la razón propuesta por Wilson y Head (2007) supera el volumen de agua disponible en el glaciar (Tabla 4.26). Por ello, se considera el 100% del volumen de glaciar fundido (Tablas 4.26 y 4.27) (EULA, 2017).

Tabla 4.27 Mínimo: espesor de lava igual a 5 m, factor igual a 2, ancho igual a 70 m; Intermedio: espesor de lava igual a 7,5 m, factor igual a 3,5, ancho igual a 135 m; Máximo: espesor de lava igual a 10 m, factor igual a 5, ancho igual a 200 m. Extraído de EULA (2017).

Cuenca	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m3]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m3]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m3]
Punahue 1	605.360	3.064.635	4.665.388
Punahue 2	631.120	3.195.045	4.813.636
Punahue 3	672.980	3.406.961	9.614.000
Huilo	914.480	4.629.555	13.064.000
Triful	901.600	4.564.350	12.880.000
Blanco E	1.210.720	6.129.270	17.296.000
Mocho	2.086.560	10.563.210	29.808.000
Chico	1.159.200	5.868.450	16.560.000
Blanco W	1.867.600	9.454.725	26.680.000
Punahue	1.909.460	9.666.641	19.530.568

Mediante el recálculo del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.28).

Tabla 4.28 Volumen de lahares que pueden generarse por emisión de lava supraglacial. Para el 20% de detritos, el factor es: 1,25; Para el 60% de detritos: el factor: 2,5. Extraído de EULA (2017).

Cuenca	Volumen mínimo con 20% detritos [m3]	Volumen intermedio con 20% detritos [m3]	Volumen máximo con 20% detritos [m3]	Volumen mínimo con 60% detritos [m3]	Volumen intermedio con 60% detritos [m3]	Volumen máximo con 60% detritos [m3]
Punahue 1	756.700	3.830.794	5.831.734	1.513.400	7.661.588	11.663.469
Punahue 2	788.900	3.993.806	6.017.045	1.577.800	7.987.613	12.034.090
Punahue 3	841.225	4.258.702	12.017.500	1.682.450	8.517.403	24.035.000
Huilo	1.143.100	5.786.944	16.330.000	2.286.200	11.573.888	32.660.000
Triful	1.127.000	5.705.438	16.100.000	2.254.000	11.410.875	32.200.000
Blanco E	1.513.400	7.661.588	21.620.000	3.026.800	15.323.175	43.240.000
Mocho	2.608.200	13.204.013	37.260.000	5.216.400	26.408.025	74.520.000
Chico	1.449.000	7.335.563	20.700.000	2.898.000	14.671.125	41.400.000
Blanco W	2.334.500	11.818.406	33.350.000	4.669.000	23.636.813	66.700.000
Punahue	2.386.825	12.083.302	23.866.280	4.773.650	24.166.603	47.732.559

#### 4.4.2.3. Volumen de lahar por acción de CDPs

Se considera la emisión probable de CDP de 2 a 4 m de espesor y anchos que varían entre 10 y 100 m, en base a Pierson *et al.*, (1990), el marco geológico de este volcán (subcapítulo 2.4) e imágenes satelitales del área, además, se considera la posibilidad de CDP con 10 m de ancho, en concordancia con lo ocurrido durante el evento eruptivo del año 2015 en el volcán Villarrica. Para el cálculo se utilizan valores de espesor y ancho de 2 m y 10 m, 3 m y 55 m, y 4 m y 100 m, entregando resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos de hielo fundido, respectivamente, para el volcán Mocho-Choshuenco (Tabla 4.29).

Tabla 4.29 Mínimo: espesor de 2 m y ancho de 10 m; Intermedio: espesor de 3 m y ancho de 55 m; Máximo: espesor de 4 m y ancho de 100 m. Extraído de EULA (2017).

Cuenca	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m3]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m3]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m3]
Punahue 1	17.296	142.692	345.920
Punahue 2	18.032	148.764	360.640
Punahue 3	19.228	158.631	384.560
Huilo	26.128	215.556	522.560
Truful	25.760	212.520	515.200
Truful SN	17.296	142.692	345.920
Blanco E	34.592	285.384	691.840
Mocho	59.616	491.832	1.192.320
Chico	33.120	273.240	662.400
Blanco W	53.360	440.220	1.067.200
Punahue	54.556	450.087	1.091.120

Mediante el recalcu del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.30).

Tabla 4.30 Volumen de lahares que puede generarse producto del contacto de CDP con el glaciar. Para el 60% de detritos, el factor es: 2,5; Para el 75% de detritos: el factor: 4. Extraído de EULA (2017).

Cuenca	Volumen mínimo con 60% detritos [m3]	Volumen intermedio con 60% detritos [m3]	Volumen máximo con 60% detritos [m3]	Volumen mínimo con 75% detritos [m3]	Volumen intermedio con 75% detritos [m3]	Volumen máximo con 75% detritos [m3]
Punahue 1	43.240	356.730	864.800	69.184	570.768	1.383.680
Punahue 2	45.080	371.910	901.600	72.128	595.056	1.442.560
Punahue 3	48.070	396.578	961.400	76.912	634.524	1.538.240
Huilo	65.320	538.890	1.306.400	104.512	862.224	2.090.240
Truful	64.400	531.300	1.288.000	103.040	850.080	2.060.800
Truful SN	43.240	356.730	864.800	69.184	570.768	1.383.680
Blanco E	86.480	713.460	1.729.600	138.368	1.141.536	2.767.360
Mocho	149.040	1.229.580	2.980.800	238.464	1.967.328	4.769.280
Chico	82.800	683.100	1.656.000	132.480	1.092.960	2.649.600
Blanco W	133.400	1.100.550	2.668.000	213.440	1.760.880	4.268.800
Punahue	136.390	1.125.218	2.727.800	218.224	1.800.348	4.364.480

#### 4.4.2.4 Volumen adicional por caudal del Río Fui

Para el recálculo de volúmenes que podrían involucrarse en flujos laháricos, considerando el caudal del río Fui, se analizan los datos disponibles en la web de la DGA, de la estación “río Fui en desagüe lago Pirihueco”, ubicada en 39° 52' 29" latitud S y 71° 53' 23" Longitud W, entre los años 2012 y 2017 (Tabla 4.31). Por lo tanto, solo se recalcula el volumen para las cuencas que interactúan con el río Fui: Triful SN, Triful, Huilo y Punahue, esta última debería considerar además el caudal del afluente que nace en el desagüe del lago Neltume, donde el río Fui cambia de nombre a río Llanquihue, pero no fue posible encontrar estos datos, pues la estación de esa zona no reporta datos actuales. De los datos disponibles, se utilizan los valores mínimos (fondo azul), medianas (fondo amarillo) y máximos (fondo naranja) del registro de los meses de verano (entre diciembre y marzo) y de invierno (entre junio y agosto) de forma separada (Tabla 4.31; EULA, 2017).

Tabla 4.31 Datos DGA de caudal medio mensual en m<sup>3</sup>/s. Valores mínimos en cada estación se representan con la celda azul, valores intermedios con la celda amarilla y valores máximos con la celda naranja. Extraído de EULA (2017).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2012	14.31	14.25	24.90	6.04	19.77	150.86	106.96	48.51	57.96	55.27	38.07	<b>65.65</b>
2013	49.57	15.94	6.60	3.98	23.93	107.18	136.84	89.06	143.75	59.74	60.19	<b>26.33</b>
2014	14.24	18.86	5.27	21.18	59.37	127.33	78.66	<b>185.59</b>	96.54	91.45	73.36	40.16
2015	14.77	2.48	<b>0.12</b>	0.09	2.24	128.18	<b>93.52</b>	160.36	129.38	86.69	89.06	59.65
2016	23.03	5.00	0.94	0.24	0.81	<b>2.24</b>	11.38	67.17	76.78	78.00	65.60	36.31
2017	29.40	10.38	9.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Para adicionar el volumen de agua que aportaría el río Fui durante los meses de verano e invierno, se considera la distancia que recorre el río hasta llegar al punto de desfogue de cada cuenca: Punahue, Huilo, Triful y Triful SN (solo en el escenario de generación de CDP). En seguida, se considera un rango de velocidades entre 5 y 16 m/s, basado en la recopilación bibliográfica de Pierson (1998) de los volcanes Mt. Yakedake (Japón), Mt. Pinatubo (Filipinas) y Mt. Ruapehu (Nva. Zelanda) que permite obtener el tiempo que demora el río hasta el punto (Tabla 4.32: Verano;

Tabla 4.33: Invierno) y por último se multiplica el caudal del río por el tiempo que tarda y se obtiene el volumen (EULA, 2017).

Tabla 4.32      Mínimo: caudal igual a 0,12 m<sup>3</sup>/s y velocidad igual a 5 m/s; Mediana: caudal igual a 26,33 m<sup>3</sup>/s y velocidad igual a 10 m/s; Máximo: caudal igual a 65,65 m<sup>3</sup>/s y velocidad igual a 10 m/s. Extraído de EULA (2017).

Cuenca	Distancia [m]	Tiempo [s]			Volumen adicional [m <sup>3</sup> ]		
	Medida	Mínimo	Mediana	Máxima	Mínimo	Mediana	Máxima
Punahue	8088	1618	809	506	194	21.296	33.186
Huilo	9275	1855	928	580	223	24.421	38.056
Triful	8887	1777	889	555	213	23.399	36.464
Triful SN	7722	1544	772	483	185	20.332	31.684

Tabla 4.33      Mínimo: caudal igual a 2,24 m<sup>3</sup>/s y velocidad igual a 5 m/s; Mediana: caudal igual a 93,52 m<sup>3</sup>/s y velocidad igual a 10 m/s; Máximo: caudal igual a 185,59 m<sup>3</sup>/s y velocidad igual a 10 m/s. Extraído de EULA (2017).

Cuenca	Distancia [m]	Tiempo [s]			Volumen adicional [m <sup>3</sup> ]		
	Medida	Mínimo	Mediana	Máximo	Mínimo	Mediana	Máxima
Punahue	8088	1618	809	506	3.623	75.639	93.816
Huilo	9275	1855	928	580	4.155	86.740	107.584
Triful	8887	1777	889	555	3.981	83.111	103.084
Triful SN	7722	1544	772	483	3.459	72.216	89.570

Finalmente, estos valores se suman a los obtenidos anteriormente con los diferentes porcentajes de detritos para los dos escenarios (A partir de un flujo de lava: Tabla 4.34 y a partir de un CDP: Tabla 4.35) (EULA, 2017).



Tabla 4.34 Nuevos volúmenes por aporte del caudal del río Fui, bajo escenario de emisión de lavas.  
Extraído de EULA (2017).

Recalculo de volumen en temporada de verano						
Cuenca	Volumen mínimo con 20% detritos [m3]	Volumen intermedio con 20% detritos [m3]	Volumen máximo con 20% detritos [m3]	Volumen mínimo con 60% detritos [m3]	Volumen intermedio con 60% detritos [m3]	Volumen máximo con 60% detritos [m3]
Punahue	2.387.019	12.104.597	23.899.466	4.773.844	24.187.899	47.765.745
Huilo	1.143.323	5.811.365	16.368.056	2.286.423	11.598.309	32.698.056
Triful	1.127.213	5.728.837	16.136.464	2.254.213	11.434.274	32.236.464
Recalculo de volumen en temporada de invierno						
Cuenca	Volumen mínimo con 20% detritos [m3]	Volumen intermedio con 20% detritos [m3]	Volumen máximo con 20% detritos [m3]	Volumen mínimo con 60% detritos [m3]	Volumen intermedio con 60% detritos [m3]	Volumen máximo con 60% detritos [m3]
Punahue	2.390.448	12.158.941	23.960.095	4.777.273	24.242.242	47.826.375
Huilo	1.147.255	5.873.684	16.437.584	2.290.355	11.660.627	32.767.584
Triful	1.130.981	5.788.549	16.203.084	2.257.981	11.493.986	32.303.084

Tabla 4.35 Nuevos volúmenes por aporte del caudal del río Fui, bajo escenario de generación de CDP. Extraído de EULA (2017).

Recalculo de volumen en temporada de verano						
Cuenca	Volumen mínimo con 60% detritos [m3]	Volumen intermedio con 60% detritos [m3]	Volumen máximo con 60% detritos [m3]	Volumen mínimo con 75% detritos [m3]	Volumen intermedio con 75% detritos [m3]	Volumen máximo con 75% detritos [m3]
Punahue	136.584	1.146.513	2.760.986	218.418	1.821.644	4.397.666
Huilo	65.543	563.311	1.344.456	104.735	886.645	2.128.296
Triful	64.613	554.699	1.324.464	103.253	873.479	2.097.264
Triful SN	43.425	377.062	896.484	69.369	591.100	1.415.364

Tabla 4.35 Nuevos volúmenes por aporte del caudal del río Fui, bajo escenario de generación (continuación) de CDP. Extraído de EULA (2017).

Recalculo de volumen en temporada de invierno						
Cuenca	Volumen mínimo con 60% detritos [m3]	Volumen intermedio con 60% detritos [m3]	Volumen máximo con 60% detritos [m3]	Volumen mínimo con 75% detritos [m3]	Volumen intermedio con 75% detritos [m3]	Volumen máximo con 75% detritos [m3]
Punahue	140.013	1.200.856	2.821.616	221.847	1.875.987	4.458.296
Huilo	69.475	625.630	1.413.984	108.667	948.964	2.197.824
Triful	68.381	614.411	1.391.084	107.021	933.191	2.163.884
Triful SN	46.699	428.946	954.370	72.643	642.984	1.473.250

#### 4.4.3. Modelado de inundación con LaharZ

##### 4.4.3.1. Modelación volúmenes generados por emisión de lavas

Para este escenario se utilizaron algunos de los volúmenes obtenidos en la Tabla 4.28, que fueron considerados más representativos (Tabla 4.36) y que muestran diferencias significativas bajo un mismo escenario (EULA, 2017).

Tabla 4.36 Mínimo: espesor de lava igual a 5 m, factor igual a 2, ancho igual a 70 m, 20% detritos; Intermedio: espesor de lava igual a 10 m, factor igual a 5, ancho igual a 200 m, 20% detritos; Máximo: espesor de lava igual a 10 m, factor igual a 5, ancho igual a 200 m, 60% detritos. Extraído de EULA (2017).

H/L	Cuenca	Volumen mínimo [m3]	Volumen intermedio [m3]	Volumen máximo [m3]
0.32	Punahue 1	756.700	5.831.734	11.663.469
0.32	Punahue 2	788.900	6.017.045	12.034.090
0.32	Punahue 3	841.225	12.017.500	24.035.000
0.32	Huilo	1.143.100	16.330.000	32.660.000
0.32	Triful	1.127.000	16.100.000	32.200.000
0.4; 0.32; 0.24	Blanco W	2.334.500	33.350.000	66.700.000

Los resultados (Figura 4.18) sugieren que es posible que algunos de los volúmenes considerados se amplifiquen por la generación simultánea de flujos laháricos dentro de la misma cuenca, y la unión de éstos en ciertos puntos en la dirección del flujo. Para el caso de Punahue, como ya se explicó, se considera la sumatoria volúmenes Punahue 1, 2 y 3, mientras que para la cuenca Blanco W se considera el volumen de la cuenca amplificado arbitrariamente x 3, como una posibilidad (Tabla 4.37; Figura 4.19) (EULA, 2017).

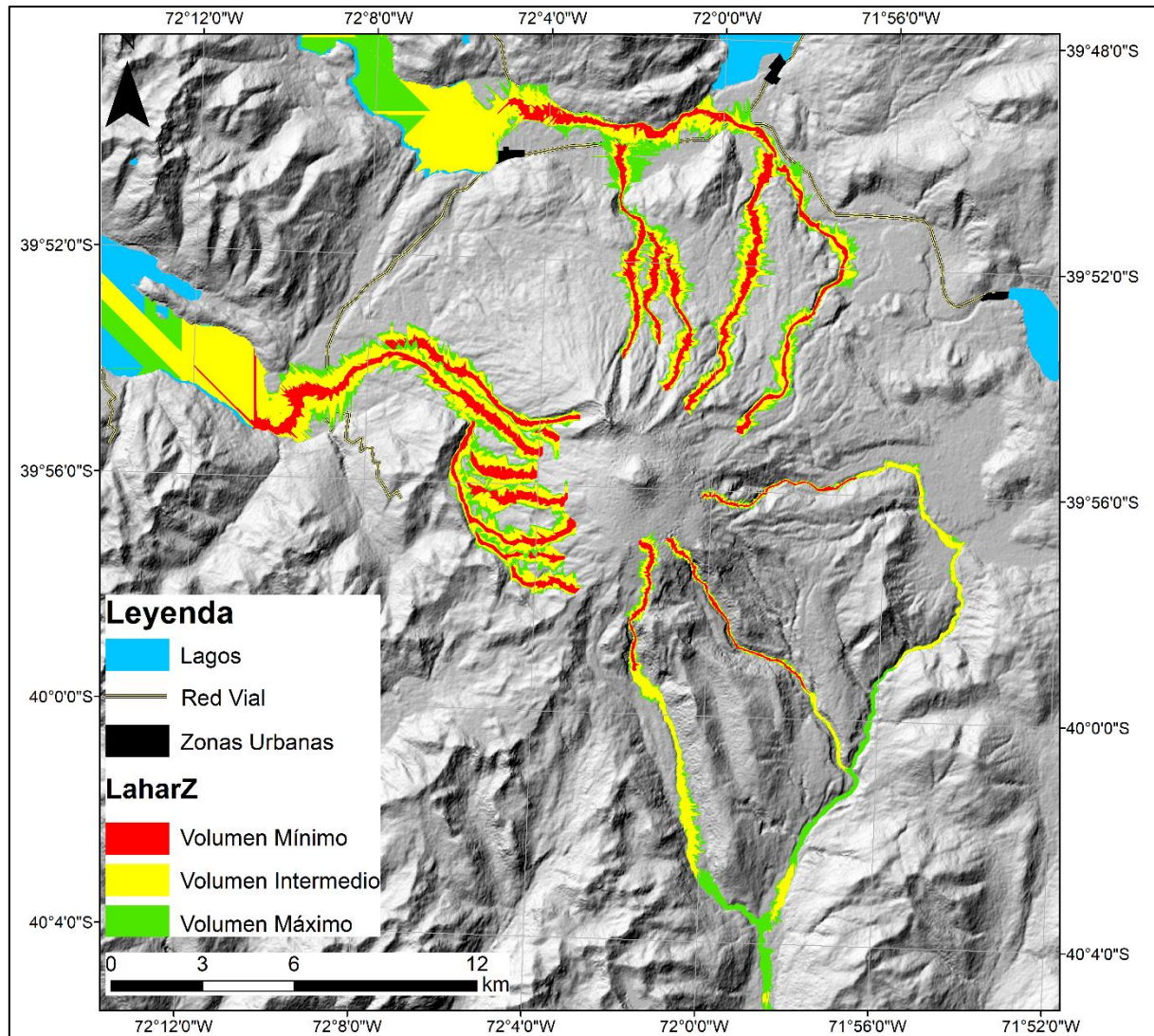


Figura 4.18 Resultados del modelado con LaharZ para el volcán Mocho-Choshuenco en el caso de lahares generados por lavas. El volumen mínimo es de  $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ , el volumen intermedio de  $9 \times 10^7 \text{ m}^3$ , y el volumen máximo de  $1,8 \times 10^8 \text{ m}^3$ .



Tabla 4.37 Mínimo: espesor de lava igual a 5 m, factor igual a 2, ancho igual a 70 m, 20% detritos; Intermedio: espesor de lava igual a 10 m, factor igual a 5, ancho igual a 200 m, 20% detritos; Máximo: espesor de lava igual a 10 m, factor igual a 5, ancho igual a 200 m, 60% detritos. Extraído de EULA (2017).

H/L	Cuenca	Volumen mínimo [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo [m <sup>3</sup> ]
0.24	Punahue	2.386.825	23.866.280	47.732.559
0.32	Blanco W	7.003.500	100.050.000	200.100.000

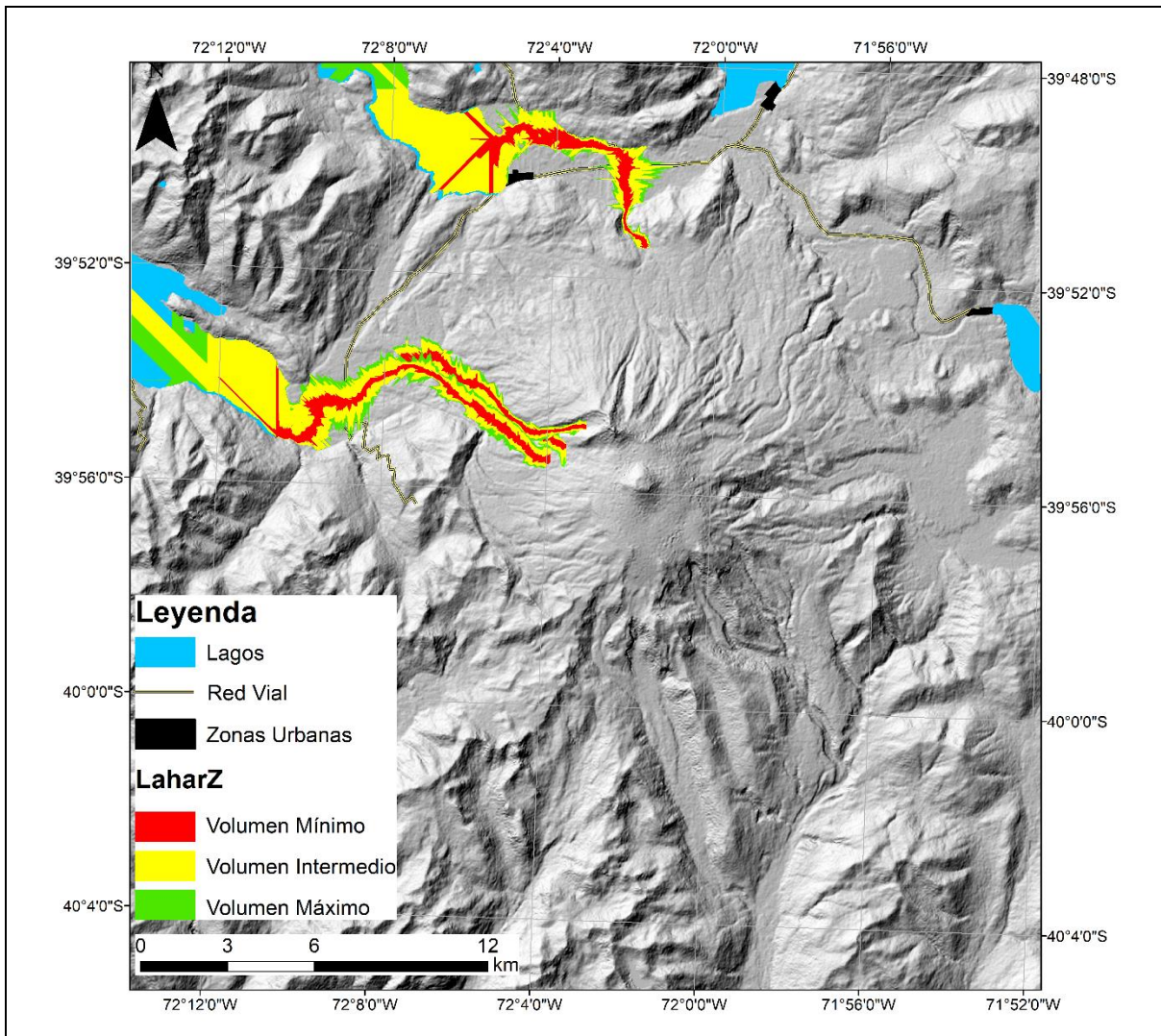


Figura 4.19 Resultados del modelado con LaharZ para lahares que se forman por flujos de lava, en parte inferior de las cuencas Punahue y Blanco W. El volumen mínimo es de  $9,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ , el volumen intermedio de  $1,2 \times 10^8 \text{ m}^3$ , y el volumen máximo de  $2,5 \times 10^8 \text{ m}^3$ .

#### 4.4.3.2. Modelación volúmenes generados por CDP

Para este escenario se utilizaron algunos de los volúmenes obtenidos en la Tabla 4.30, que fueron considerados más representativos (Tabla 4.38) y que muestran diferencias significativas bajo un mismo escenario (EULA, 2017).

Tabla 4.38 Volúmenes generados por CDP. Mínimo: espesor de 2 m y ancho de 10 m, 60% detritos; Intermedio: espesor de 3 m y ancho de 55 m, 75% detritos; Máximo: espesor de 4 m y ancho de 100 m, 75% detritos. Extraído de EULA (2017).

H/L	Cuenca	Volumen mínimo [m3]	Volumen intermedio [m3]	Volumen máximo [m3]
0.32	Punahue 1	43240	570768	1383680
0.32	Punahue 2	45080	595056	1442560
0.32	Punahue 3	48070	634524	1538240
0.32	Huilo	65320	862224	2090240
0.32	Truful	64400	850080	2060800
0.32	TrufulSN	43240	570768	1383680
0.4; 0.32; 0.24	Blanco W	133400	1760880	4268800
0.32	Blanco E	86480	1141536	2767360
0.32	Mocho	149040	1967328	4769280
0.32	Chico	82800	1092960	2649600

Los resultados (Figura 4.20) sugieren que es posible que algunos de los volúmenes considerados se amplifiquen por la generación simultánea de flujos laháricos dentro de la misma cuenca, y la unión de éstos en ciertos puntos en la dirección del flujo. Para Punahue se considera la sumatoria de los volúmenes Punahue 1, 2 y 3. Para Blanco W, se considera el volumen de la cuenca amplificado arbitrariamente x 7 (dado el número de subcuencas dentro de la cuenca mayor) y Truful y Truful SN, la sumatoria de ambos volúmenes (Tabla 4.39; Figura 4.21). Cabe destacar, que para ambos escenarios se descarta la modelación con los volúmenes que consideran el volumen



adicional del río Fui, pues los resultados obtenidos no revelan cambios significativos en el volumen final (EULA, 2017).

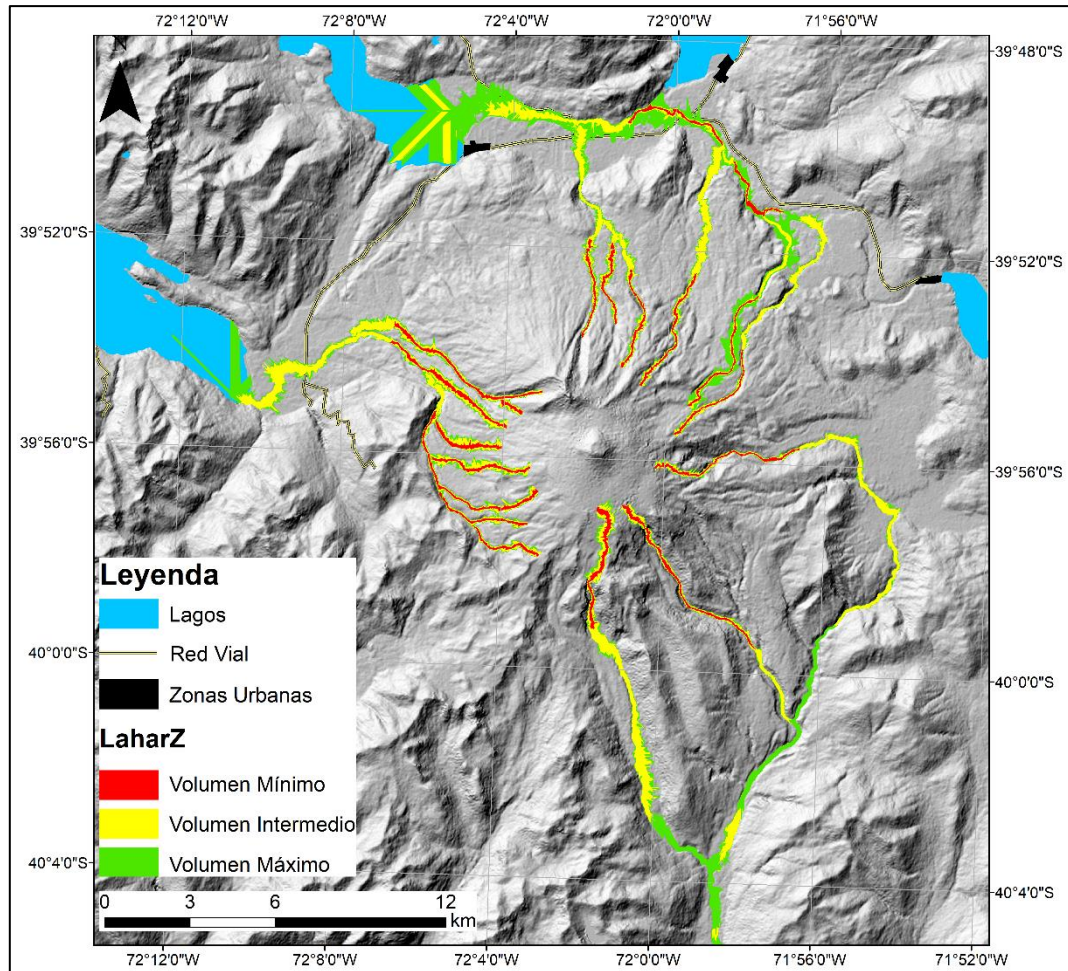


Figura 4.20 Resultados del modelado con LaharZ para lahares que se forman por la acción de corrientes de densidad piroclástica. El volumen mínimo es de  $4,4 \times 10^5 \text{ m}^3$ , el volumen intermedio de  $5,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ , y el volumen máximo de  $1,4 \times 10^7 \text{ m}^3$ .

Tabla 4.39 Mínimo: espesor de 2 m y ancho de 10 m, 60% detritos; Intermedio: espesor de 3 m y ancho de 55 m, 75% detritos; Máximo: espesor de 4 m y ancho de 100 m, 75% detritos. Extraído de EULA (2017).

H/L	Cuenca	Volumen mínimo [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo [m <sup>3</sup> ]
0.24	Punahue	136390	1800348	4364480
0.21	Triful y Triful SN	107640	1420848	3444480
0.32	Blanco W	1067200	14087040	34150400

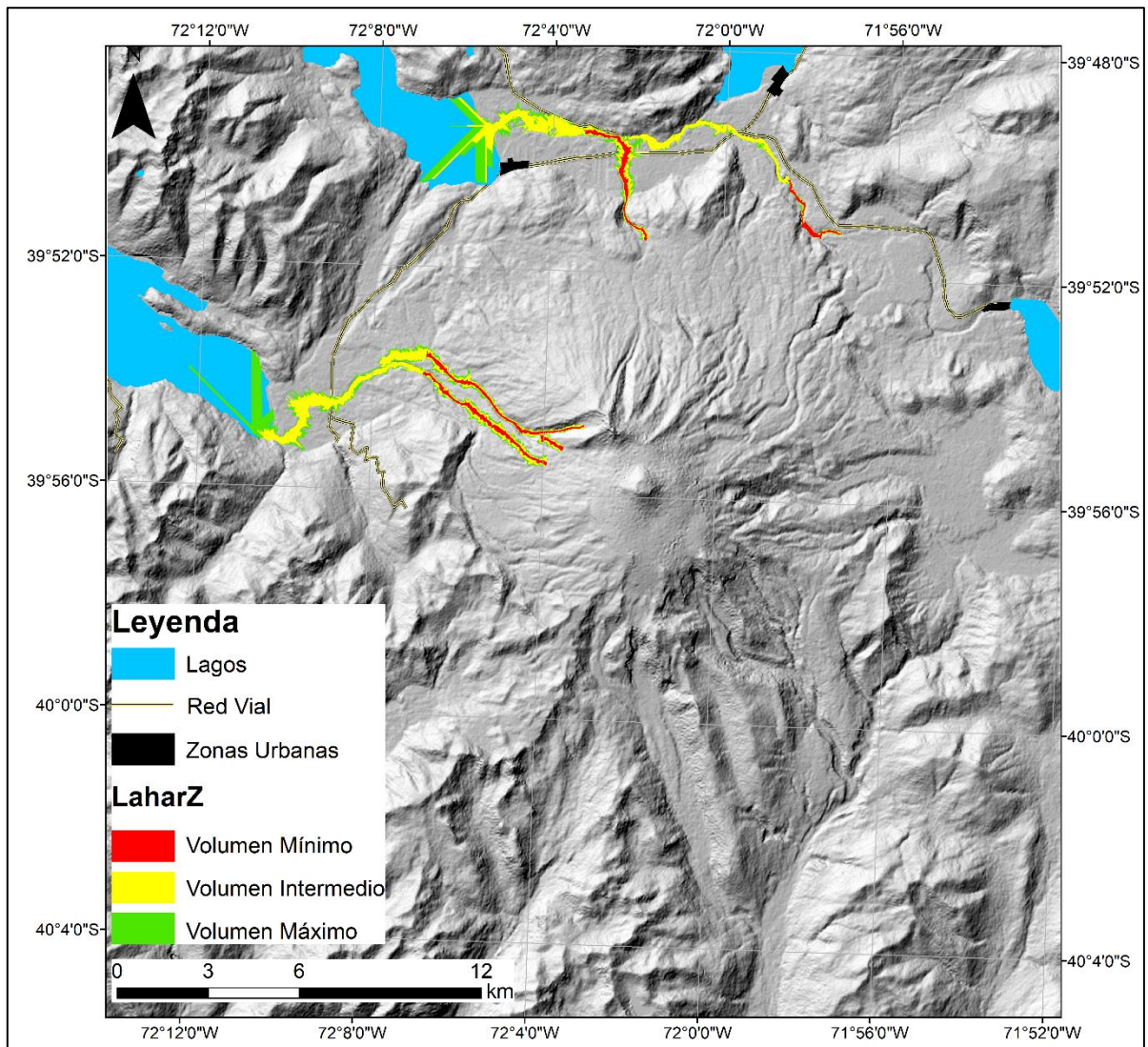


Figura 4.21 Resultados del modelado con LaharZ para lahares que se forman por corrientes de densidad piroclástica, en la parte inferior de las cuencas Blanco W, Punahue y Triful. El volumen mínimo es de  $1,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ , el volumen intermedio de  $1,7 \times 10^7 \text{ m}^3$ , y el volumen máximo de  $4,2 \times 10^7 \text{ m}^3$ .

#### 4.4.3.3. Tolerancia de sección transversal en puentes:

Según las dimensiones obtenidas en terreno, el área transversal de los principales puentes se puede observar en la Tabla 4.40. Según los diferentes escenarios, y sus respectivas variaciones en el volumen de lahar, es posible obtener el área de inundación transversal del lahar, mediante la ecuación definida anteriormente ( $A = 0.02 V^{2/3}$ ). Esto valores revelan que, bajo escenarios con

volumen intermedios y máximos, la mayoría de los puentes se ve superado por el lahar (Tabla 4.41) (EULA, 2017).

Tabla 4.40 Área transversal de los principales puentes en vías de evacuación.  
Extraído de EULA (2017).

Puente	Área transversal del puente (m <sup>2</sup> )	Cuenca asociada
Pte Blanco	133	Blanco W
Pte Huilo Huilo	1520	Huilo
Pte Llanquihue	462	Punahue
Pte Pirinel	37	Cercano blanco W
Pte Punahue	109	Punahue
Pte Triful	150	Huilo

Tabla 4.41 Evaluación de las áreas transversales que alcanzarían los flujos laháricos. En rojo se muestran las áreas transversales que superan las respectivas áreas de los puentes, indicando daño al puente o interrupción de la vía de evacuación. Extraído de EULA (2017).

Escenario de flujo lahárico por emisión de lava						
Puente	Volumen mínimo [m <sup>3</sup> ]	A [m <sup>2</sup> ]	Volumen intermedio [m <sup>3</sup> ]	A [m <sup>2</sup> ]	Volumen máximo [m <sup>3</sup> ]	A [m <sup>2</sup> ]
Pte Blanco	2.334.500	<b>352</b>	33.350.000	<b>2072</b>	66.700.000	<b>3289</b>
Pte Huilo Huilo	1.143.100	219	16.330.000	1287	3.2660.000	<b>2043</b>
Pte Llanquihue	2.386.825	357	23.866.280	<b>1658</b>	47.732.559	<b>2632</b>
Pte Pirinel	2.334.500	<b>352</b>	33.350.000	<b>2072</b>	66.700.000	<b>3289</b>
Pte Punahue	2.386.825	<b>357</b>	23.866.280	<b>1658</b>	47.732.559	<b>2632</b>
Pte Triful	1.143.100	<b>219</b>	16.330.000	<b>1287</b>	32.660.000	<b>2043</b>
Escenario de flujo lahárico por generación de CDP						
Puente	Volumen mínimo [m <sup>3</sup> ]	A [m <sup>2</sup> ]	Volumen intermedio [m <sup>3</sup> ]	A [m <sup>2</sup> ]	Volumen máximo [m <sup>3</sup> ]	A [m <sup>2</sup> ]
Pte Blanco	133400	52	1760880	<b>292</b>	4268800	<b>526</b>
Pte Huilo Huilo	65320	32	862224	181	2090240	327
Pte Llanquihue	136390	53	1800348	296	4364480	<b>534</b>
Pte Pirinel	133400	<b>52</b>	1760880	<b>292</b>	4268800	<b>526</b>
Pte Punahue	136390	53	1800348	<b>296</b>	4364480	<b>534</b>
Pte Triful	65320	32	862224	<b>181</b>	2090240	<b>327</b>

#### 4.4.4. Zonas de peligro por flujos laháricos

Como se mencionó en la sección anterior, los volúmenes de los lahares modelados están relacionados directamente con los escenarios eruptivos definidos y sus productos, por lo que se definen las zonas de peligro según el alcance que pueden tener los lahares bajo determinadas condiciones de generación y sus volúmenes asociados (Figura 4.22). En el caso de este volcán, se definen 2 zonas, cada una representando los escenarios definidos previamente que representan el escenario 1, con el objetivo de hacer una distinción entre los distintos centros de emisión que puede tener una erupción y como la ubicación de este determinará el comportamiento del lahar.

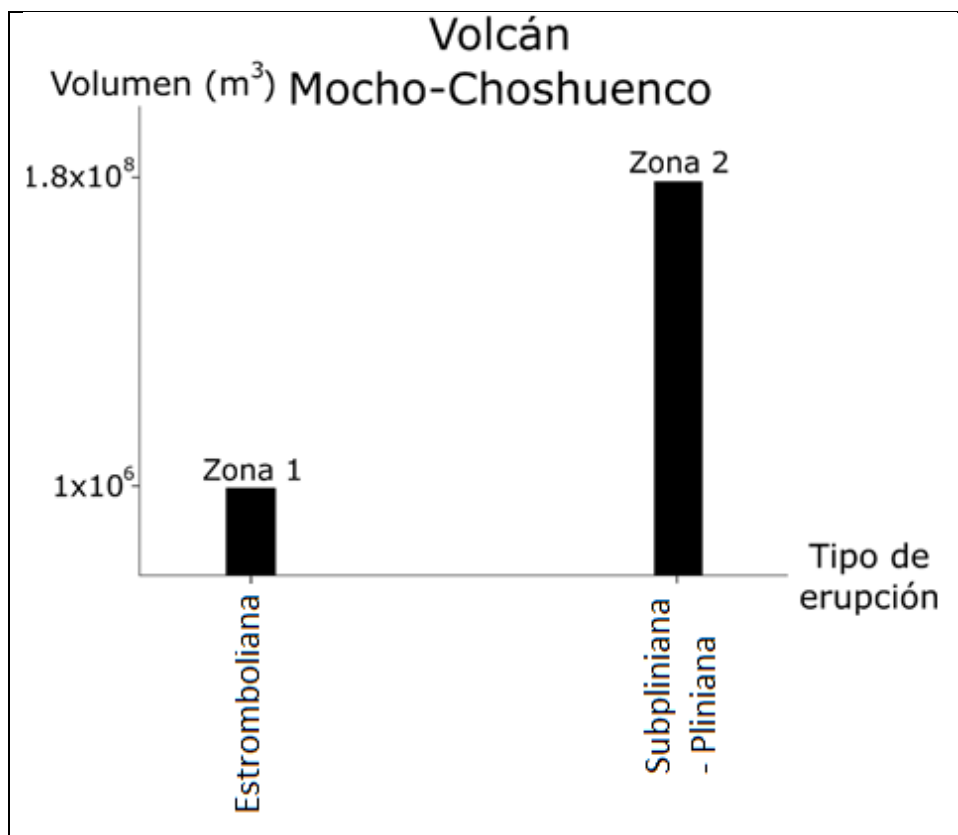


Figura 4.22 Relación entre escenarios eruptivos y volúmenes determinados.

Según los volúmenes de lahares definidos anteriormente, su relación con los escenarios eruptivos, la modelación con LaharZ y el análisis de la bibliografía e información recopilada durante este trabajo se definen 2 zonas de peligros para el Volcán Mocho-Choshuenco (Figura 4.23):

Se definen 2 zonas de peligros para el Volcán Mocho-Choshuenco según los escenarios y volúmenes definidos anteriormente (Figura 4.22; Figura 4.23):



Zona 1. Áreas más probables de inundación de lahares para erupciones de baja magnitud. Corresponde al volumen intermedio de los lahares por CDP (EULA, 2017). Incluye la zona proximal de peligro volcánico en la cual se genera la fusión de hielo/nieve por lavas o CDPs y comienzan los lahares.

Zona 2. Zonas inundables por grandes lahares, generados por CDP o por lavas, donde en este último caso se generarían por una acumulación de agua en la cuenca del glaciar (caldera) y serían liberados repentinamente. Corresponden a los lahares de mayor volumen calculado anteriormente (EULA, 2017).

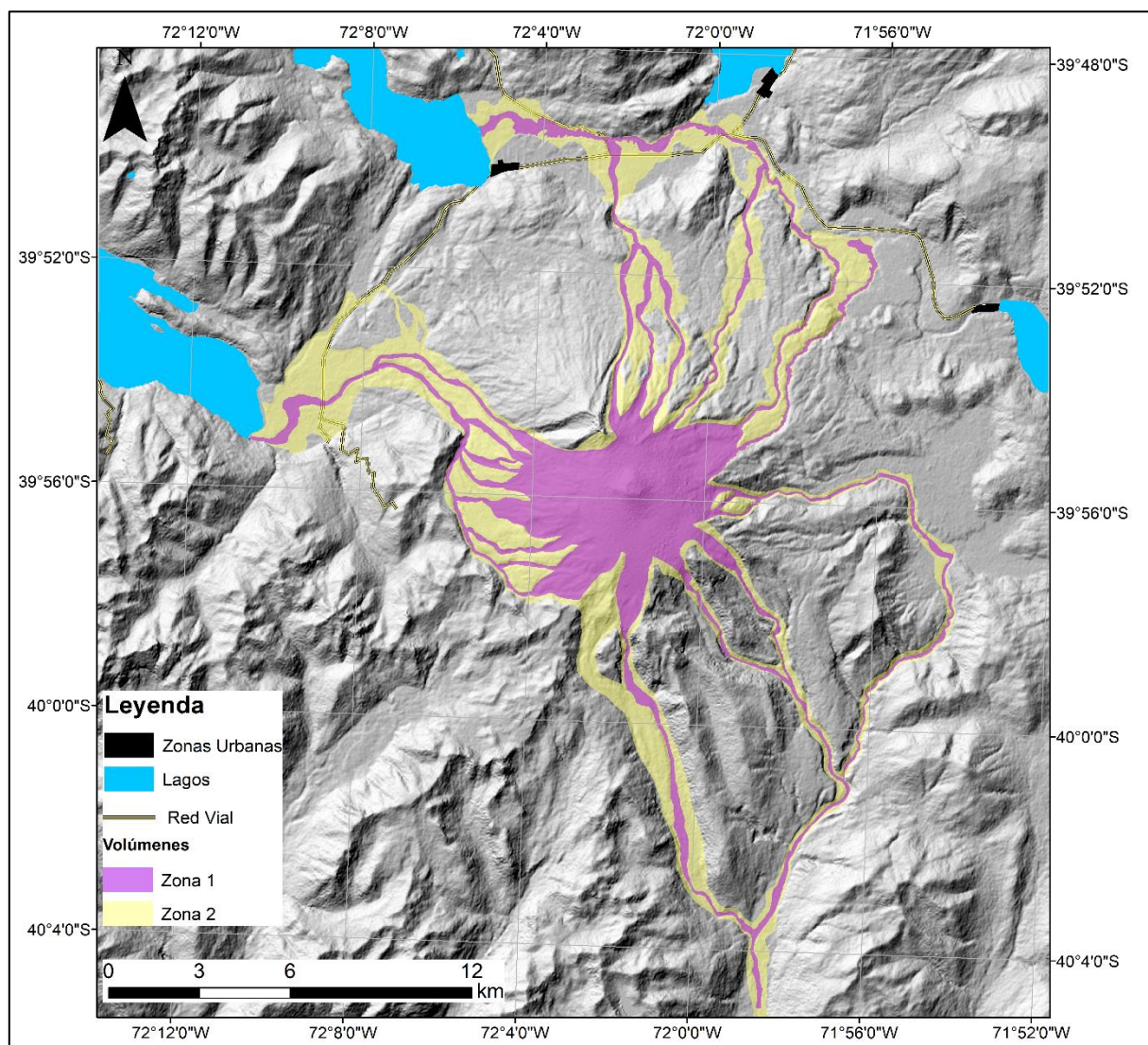


Figura 4.23 Zonas de peligro por flujos lahéricos en el Volcán Mocho – Choshuenco.



## 4.5. Volcán Tolhuaca

### 4.5.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares

La actividad eruptiva Holocena del volcán Tolhuaca incluye sólo tres eventos relativamente antiguos entre 8.050 y 6.590 A.P., pero de explosividad importante (IEV = 3 - 4), y actualmente su única anomalía ha sido actividad fumarólica débil en la cima (Polanco *et al.*, 2000). Además, sus depósitos corresponden en su mayoría a lavas andesíticas y basálticas, depósitos fragmentados como tobas, pómez, escoria y brechas volcánicas, además de depósitos laháricos y aluviales.

Según el “Catastro de Glaciares” de la DGA en el Vn. Tolhuaca existen 6 glaciares relativamente pequeños y a gran altura (> 2000 m s.n.m.), denominados: “Indio Tolhuaca”, “Caracol Tolhuaca”, “Pemehue Tolhuaca”, “Nalcas Tolhuaca”, “Panquehue Tolhuaca” y “Caracol Tolhuaca”, cuyas áreas suman 3,6 km<sup>2</sup>.

Dada la falta de información disponible de la actividad eruptiva de este volcán, se realiza una comparación con otros volcanes de similares características en cuanto a composición, morfología, actividad histórica, cantidad de agua disponible, entre otros. Dada la incertidumbre que plantea una futura erupción del volcán Tolhuaca se recurre a la información de volcanes de composición y morfología similar, pero con estilos eruptivos distintos, como son los volcanes Mt. Rainier, Mt. Adams y Mt. Shasta (Tabla 4.42).

Tabla 4.42 Tabla comparativa entre el Vn. Tolhuaca, Mt. Rainier, Mt. Adams y Mt. Shasta.

Nombre	Tipo	Composición	Altura (m)	IEV (frecuente)
Tolhuaca	Estratovolcán	Andesítico, andesítico-basálticos	2739	3 - 4
Mt. Rainier	Estratovolcán	Andesítico-dacítico	4392	2 - 3
Mt. Adams	Estratovolcán	Andesítico, andesítico-basáltico	3742	2
Mt. Shasta	Estratovolcán	Andesítico, andesítico-basáltico	4317	4(?)

El Mt. Rainier es un estratovolcán de composición andesítica-dacítica de 4392 m s.n.m. de altura y está cubierto por un glaciar de 4.4 km<sup>3</sup> (Driedgerd y Kennard, 1986 en Lescinsky y Sisson, 1998). Además de la similitud en la composición entre los volcanes, ambos poseen alteración hidrotermal en su edificio. Ha presentado erupciones de IEV entre 1 a 4, siendo más frecuente un IEV de 2 en los últimos 200 años de actividad (Global Volcanism Program, 2013). Sisson y Vallance (2008)

indican que en los últimos 2600 años el Mt. Rainier ha generado ~14 episodios eruptivos, con valores del IEV de 2 en su gran mayoría, y eventos más explosivos con IEV 2-3 y 4, este último relacionado al “National Lahar”. Sus depósitos desde la última edad de hielo (~10.000 años) comprenden flujos de lava, flujos y oleadas piroclásticas, caída de tefra y proyectiles balísticos, además de avalanchas de escombros, flujos de escombros e inundaciones que acompañan a menudo las erupciones (Hobblit *et al.*, 1995).

Uno de los principales peligros para este volcán son los lahares, los que comúnmente se producen por actividad no volcánica, como lluvias intensas. Sin embargo, también se han generado por actividad volcánica (Hobblit *et al.*, 1998). Durante los últimos 10.000 años, al menos 60 flujos de detritos (y lahares) de diferentes tamaños han bajado por los valles del Mt. Rainier. Hace 1.200 años, flujos laháricos llenaron los valles de ambas bifurcaciones del río “White”, con espesores de 20 a 30 m y con una extensión longitudinal de 100 km. Fragmentos de roca caliente fluyendo sobre los glaciares y nieve generaron grandes cantidades de agua, la cual se mezcló con restos de rocas, formando el lahar. Hace 800 – 1.000 años atrás, otros lahares de origen similar, denominado “National Lahar”, inundó los valles del río “Nisqually” con espesores de 10 a 40 m y longitud aproximada de 70 km (Hobblit *et al.*, 1998). Más de una docena de este tipo de flujos ha ocurrido en el Mt. Rainier durante períodos de volcanismo en los pasados 6.000 años. Sin embargo, la generación de estos no necesariamente ocurre en contexto de una erupción volcánica, pero la posibilidad de formar un lahar se ve indudablemente incrementada por fenómenos eruptivos (Crandell, 1971).

El Monte Adams es un estratovolcán de composición andesítica-basáltica. Ha registrado ~15 erupciones holocenas con un IEV de 1 a 2, siendo el valor 2 el más frecuente (Global Volcanism Program, 2013). Desde la última glaciación, ha entrado en erupción al menos nueve veces, la última de estas el año 1482, produciendo flujos de lava periféricos y conos de ceniza en la cumbre, pero no flujos piroclásticos. Al menos cinco lahares se han generado desde este volcán en los últimos 12.000 años. Los depósitos de estos poseen un volumen que va desde los 4 -  $66 \times 10^6 \text{ m}^3$ , y se han desplazado hasta 60 km por los valles, inundando valles de hasta 50 m de profundidad. Los dos mayores lahares registrados se originaron por el colapso de un flanco alterado hidrotermalmente, lo cual causó un debilitamiento de la estructura (Vallance, 1999).

Finalmente, el Mt. Shasta es un estratovolcán mixto de composición andesítica-basáltica compuesto por cuatro aberturas principales (Miller, 1980). Ha generado ~23 eventos eruptivos históricos, sin embargo, sólo en uno de estos se conoce su IEV, cuyo valor es 4 (Global Volcanism Program, 2013). El cono ha sido reconstruido varias veces en un período de 100.000 años y durante este tiempo ha producido flujos de lava andesítica, domos, flujos piroclásticos, flujos de block-and-ash y lahares. Ha entrado en erupción por lo menos 1 vez cada 600-800 años durante los últimos 10.000 años (Miller, 1980).

A pesar de que no existe registro de actividad eruptiva en el Vn. Tolhuaca durante los últimos 6.500 años (Polanco, 1998), siempre existe la posibilidad de que se vuelva a producir. Sumado a esto, las erupciones registradas han sido predominantemente explosivas (Polanco *et al.*, 2000), por lo que una nueva erupción causaría un gran daño en los alrededores del volcán. Estudiando volcanes similares, como el Mt. Rainier, Adams y Shasta, y asumiendo un nuevo episodio eruptivo en este volcán, flujos laháricos de importancia pueden ocurrir, debido a que este presenta glaciares en su cima, y nieve en los períodos de invierno.

Finalmente, en base a la actividad histórica del Vn. Tolhuaca y de volcanes de características similares, se definen 3 posibles escenarios eruptivos, que se presentan en la Tabla 4.43. El primer escenario (1) se fundamenta en el comportamiento del Mt. Adams, el cual produce principalmente flujos de lava y presenta erupciones de IEV = 2 en su mayoría. El segundo escenario (2) es de moderada explosividad (IEV = 3) y concuerda con la actividad histórica de menor energía que ha tenido el volcán Tolhuaca (Subcapítulo 2.5.4) y su comparación con el Mt. Rainier, el cual ha generado flujos de lava y CDPs. Finalmente, el tercer escenario (3) se define en base a la actividad histórica más explosiva del volcán Tolhuaca y su comparación con el Mt. Shasta, el cual registra actividad de gran energía con IEV = 4 y la destrucción de su edificio volcánico en variadas ocasiones en los últimos 100.000 años (Miller, 1980).

Tabla 4.43 Síntesis de las características de los escenarios definidos.

Escenario	IEV	Tipo de Actividad	Fenómenos Eruptivos
1 Bajo-Moderado	2	Estromboliana	Caída de tefra, balísticos, flujos piroclásticos y flujos de lava
2 Moderado	3	Subpliniana	Caída de tefra, balísticos y flujos piroclásticos
3 Grande	4	Subpliniana - Pliniana	Caída de tefra, balísticos y flujos piroclásticos

#### 4.5.2. Estimación de volumen de lahares

##### 4.5.2.1. Subdivisión de cuencas y estimación del volumen glaciar

Las cuencas del volcán Tolhuaca fueron subdivididas realizando un análisis detallado de la red hidrográfica de la zona de estudio, a partir del modelo de elevación digital (DEM) de resolución de 12,5 m. Se identificaron 8 cuencas hidrográficas, de las cuales sólo 6 reciben aporte directo desde el glaciar, por lo que estas se consideran para la modelación de flujos laháricos. Las cuencas analizadas se denominan: Tolhuaca 1, Tolhuaca 2, Nalcas, Blanco, Blanca y Caracoles.

Considerando el glaciar definido por Rivera (2011), se identifican 6 subdivisiones glaciares de acuerdo con las cuencas hidrográficas que recibirían aportes del casquete (Figura 4.24), cuyas áreas, volúmenes de glaciares y volúmenes de agua equivalente disponible en el glaciar, calculados mediante las ecuaciones descritas en el Capítulo 3 de metodología se indican en la Tabla 4.44. El espesor utilizado para el cálculo de volumen de este volcán es de 20 m y fue definido según a Rivera (2011).

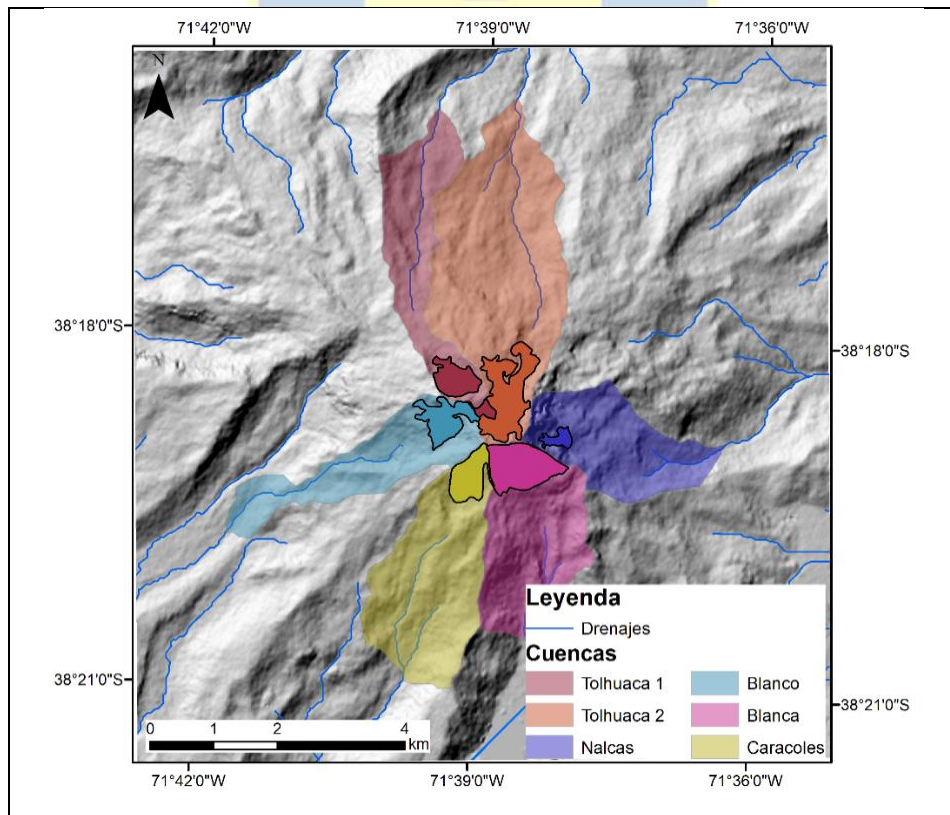


Figura 4.24 Red hídrica, subdivisión de cuencas y glaciar del volcán Tolhuaca. Elaboración propia basándose en Rivera (2011) para el área del glaciar.

Tabla 4.44 Área y volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas.

Cuenca	Área de glaciar (m <sup>2</sup> )	Volumen de glaciar (m <sup>3</sup> )	Volumen de glaciar EQ agua (m <sup>3</sup> )
Tolhuaca 1	369.296	7.385.924	6.795.050
Tolhuaca 2	793.871	15.877.428	14.607.233
Nalcas	99.120	1.982.408	1.823.815
Blanco	391.974	7.839.488	7.212.328
Blanca	675.096	13.501.926	12.421.771
Caracoles	377.233	7.544.668	6.941.094

#### 4.5.2.2. Volumen de lahar por acción de coladas de lava

Se considera la emisión probable de flujos de lava entre 5 y 20 m de espesor y anchos que varían entre 10 – 80 m, sobre la base de la similitud de sus depósitos con los del Volcán Lonquimay. Para el cálculo del volumen mínimo de agua se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de lava de 5 m y 10 m, respectivamente. En el caso del volumen intermedio se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de 12 m y 45 m, respectivamente. Finalmente, para el cálculo del volumen máximo se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de 20 m y 80 m, respectivamente (Tabla 4.45).

Tabla 4.45 Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Tolhuaca por lavas.

Cuenca	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]
Tolhuaca 1	78.200	703.800	1.251.200
Tolhuaca 2	138.000	1.242.000	2.208.000
Nalcas	44.160	397.440	706.560
Blanco	78.200	703.800	1.251.200
Blanca	119.600	1.076.400	1.913.600
Caracoles	94.760	852.840	1.516.160

Mediante el recálculo del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.46).



Tabla 4.46 Volúmenes recalculados de lahares con detritos que pueden generarse por interacción de lava con el glaciar Tolhuaca.

Cuenca	Volumen mínimo con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen mínimo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]
Tolhuaca 1	97.750	879.750	1.564.000	195.500	1.759.500	3.128.000
Tolhuaca 2	172.500	1.552.500	2.760.000	345.000	3.105.000	5.520.000
Nalcas	55.200	496.800	883.200	110.400	993.600	1.766.400
Blanco	97.750	879.750	1.564.000	195.500	1.759.500	3.128.000
Blanca	149.500	1.345.500	2.392.000	299.000	2.691.000	4.784.000
Caracoles	118.450	1.066.050	1.895.200	236.900	2.132.100	3.790.400

#### 4.5.2.3. Volumen de lahar por acción de CDPs

Se considera la emisión probable de CDP de 1 a 8 m de espesor y anchos que varían entre 10 – 100 m, según Pierson *et al* (1990), recálculo de volúmenes con incorporación de detritos del Volcán Tolhuaca, información obtenida en terreno e imágenes satelitales del área. Para el cálculo se utilizan valores de espesor y ancho de 1 m y 10 m, 4 m y 55 m, y 8 m y 100 m, entregando resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos de hielo fundido para el Volcán Tolhuaca (Tabla 4.47).

Tabla 4.47 Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Tolhuaca por CDP.

Cuenca	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]
Tolhuaca 1	7.820	172.040	625.600
Tolhuaca 2	13.800	303.600	1.104.000
Nalcas	4.416	97.152	353.280
Blanco	7.820	172.040	625.600
Blanca	11.960	263.120	956.800
Caracoles	9.476	208.472	758.080

Mediante el recálculo del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.48).

Tabla 4.48 Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Tolhuaca.

Cuenca	Volumen mínimo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen mínimo con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]
Tolhuaca 1	19.550	430.100	1.564.000	31.280	688.160	2.502.400
Tolhuaca 2	34.500	759.000	2.760.000	55.200	1.214.400	4.416.000
Nalcas	11.040	242.880	883.200	17.664	388.608	1.413.120
Blanco	19.550	430.100	1.564.000	31.280	688.160	2.502.400
Blanca	29.900	657.800	2.392.000	47.840	1.052.480	3.827.200
Caracoles	23.690	521.180	1.895.200	37.904	833.888	3.032.320

#### 4.5.3. Modelado de inundación con LaharZ

Se realizan 4 modelaciones para el volcán Tolhuaca en el software LaharZ, cuyos volúmenes de entrada para el modelo son obtenidos desde la Tabla 4.48 y 4.46, y corresponden a i) lahares generados por lavas con un 20% de detritos (Figura 4.25), ii) lahares generados por lavas con un 60% de detritos, iii) lahares generados por CDP con 60% de detritos, iv) lahares generados por CDP con un 75% de detritos, y v) lahares generados por una erupción fisural (Figura 4.4). En esta sección se presenta un ejemplo del resultado obtenido con la modelación en LaharZ, los mapas restantes se encuentran en el Anexo 1.

El escenario 1 se ve representado por los volúmenes mínimos calculados para lahares generados por acción de coladas de lava, con la respectiva variación en el volumen final dependiendo del porcentaje de detritos (20% y 60%; subcapítulo 3.3). El escenario 2 se representa por los volúmenes

intermedios calculados para lahares generados por coladas de lava o CDPs y el escenario 3 corresponde a los volúmenes máximos de lahares generados por lavas o CDPs.

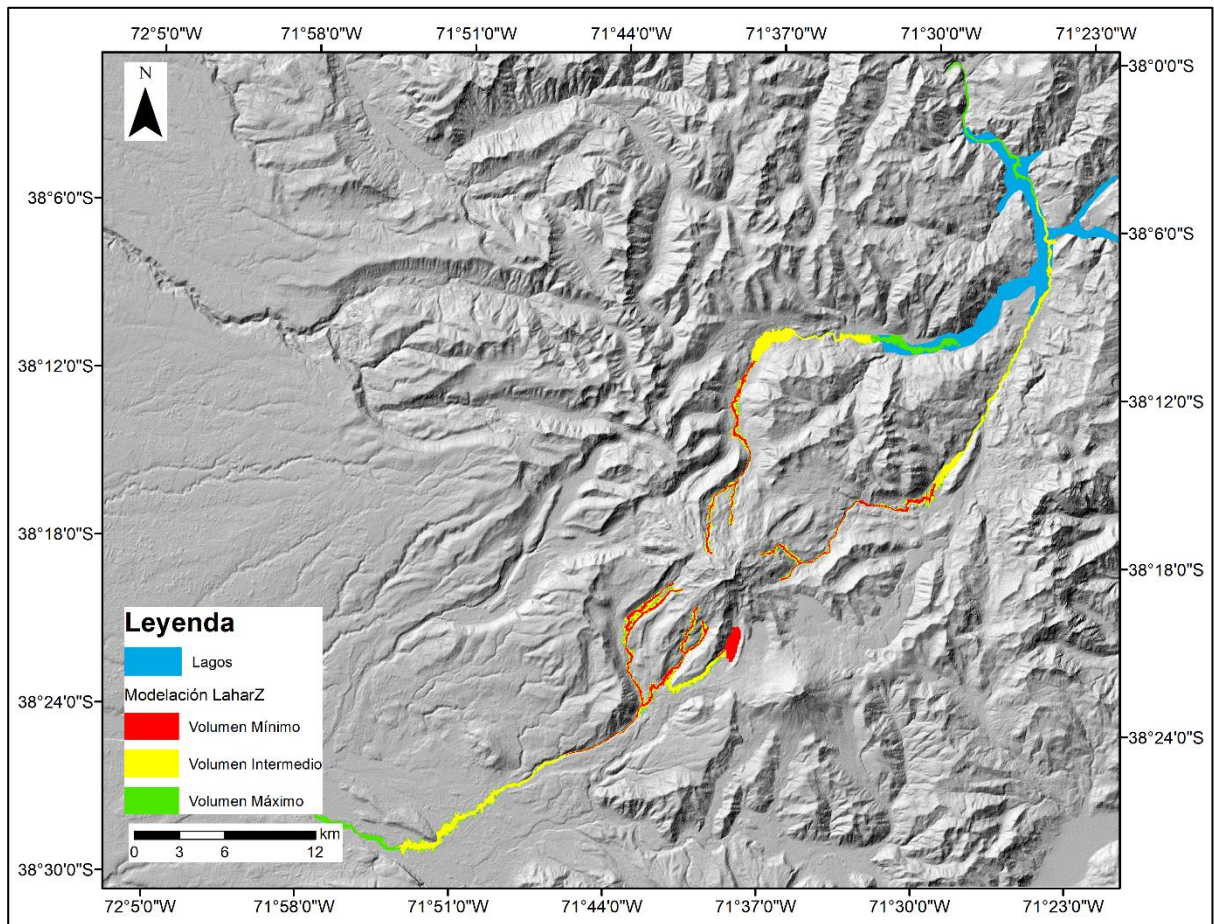


Figura 4.25 Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Tolhuaca, en el caso de lahares generados por lavas con un 20% de detritos. El volumen mínimo es de  $6,9 \times 10^5 \text{ m}^3$ , el volumen intermedio de  $1,3 \times 10^7 \text{ m}^3$ , y el volumen máximo de  $5,2 \times 10^7 \text{ m}^3$ .

#### 4.5.4. Zonas de peligro por flujos lahéricos

Como se mencionó en la sección anterior, los volúmenes de los lahares modelados están relacionados directamente con los escenarios eruptivos definidos y sus productos, por lo que se definen las zonas de peligro según el alcance que pueden tener los lahares bajo determinadas condiciones de generación y sus volúmenes asociados (Figura 4.26).

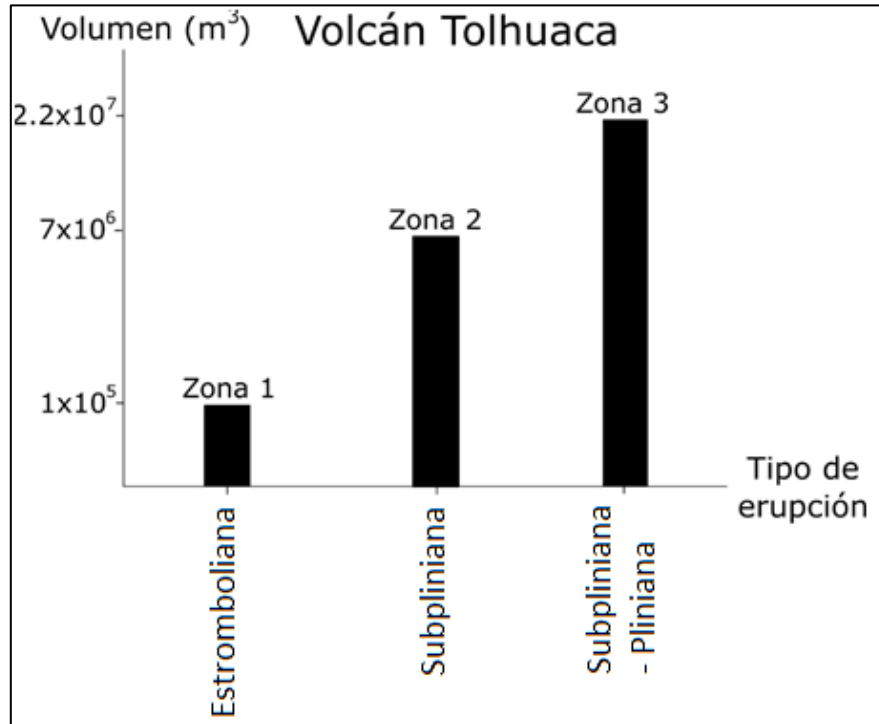


Figura 4.26 Relación entre escenarios eruptivos y volúmenes determinados.

Según los volúmenes de lahares definidos anteriormente, su relación con los escenarios eruptivos, la modelación con LaharZ y el análisis de la bibliografía e información recopilada durante este trabajo se definen 3 zonas de peligros para el Volcán Tolhuaca (Figura 4.27):

**Zona 1:** Áreas de máxima probabilidad de inundación por lahares para erupciones de baja magnitud, con un IEV entre 2 y 3. Corresponde al volumen mínimo de lahares generados por la interacción entre los glaciares con CDP. Incluye la zona proximal de peligro volcánico en la cual se genera la fusión de hielo/nieve por lavas o CDPs y comienzan los lahares.

**Zona 2:** Áreas susceptibles a ser inundadas por lahares generados por la interacción entre hielo o nieve con lavas o CDP, durante erupciones desde una magnitud moderada (IEV entre 3 y 4). Corresponde a los volúmenes intermedios de lahares generados por lavas y CDP.

**Zona 3:** Zonas inundables por grandes lahares generados por la interacción entre hielo o nieve con lavas o CDP, en erupciones de gran magnitud ( $IEV \geq 4$ ), ocasionando la rápida fusión del hielo o nieve disponible. Corresponden a los lahares de mayor volumen calculado anteriormente, tanto de lahares generados por lavas y CDP.



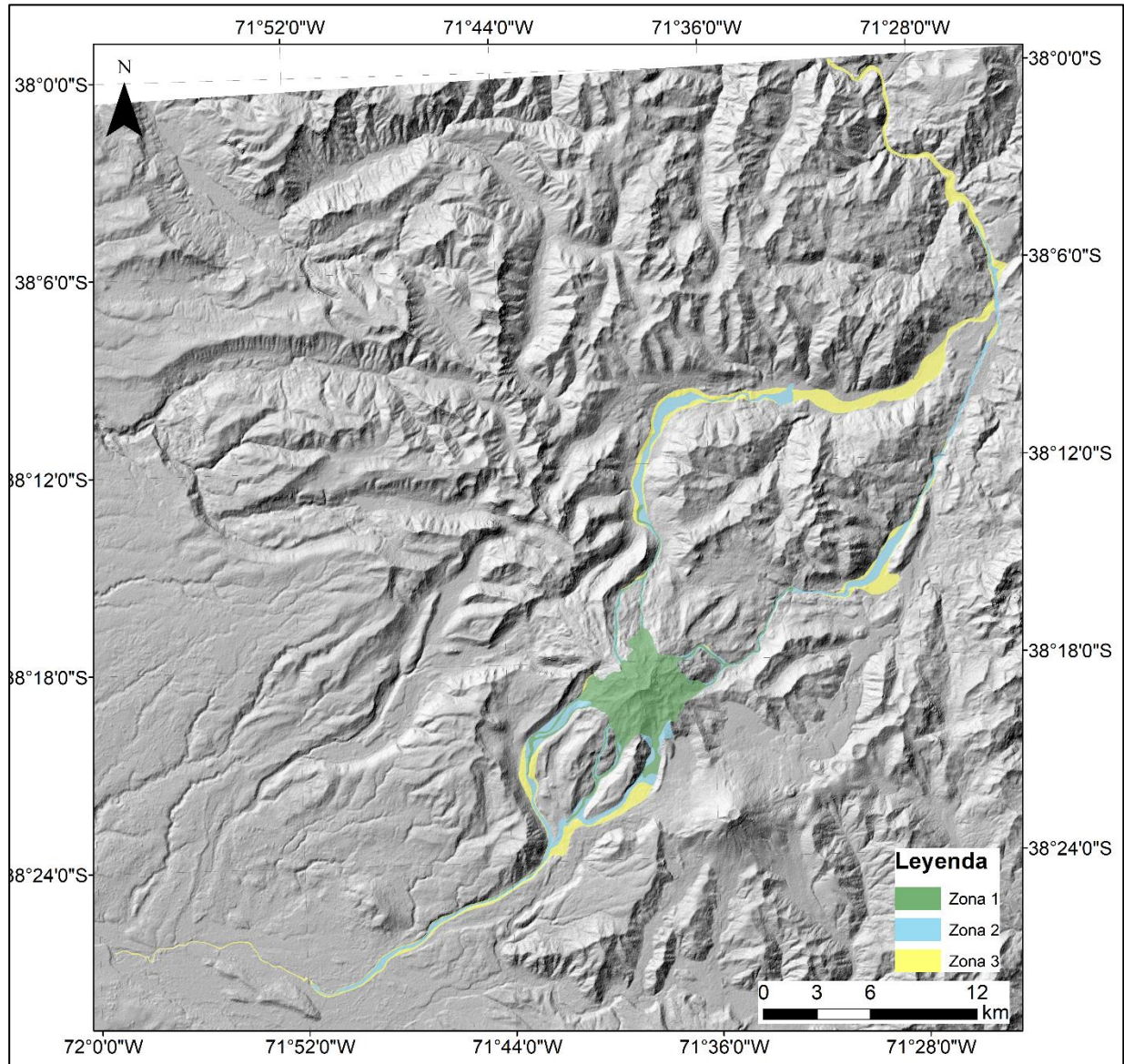


Figura 4.27 Zonación del peligro volcánico de lahares en el Volcán Tolhuaca.

## 4.6. Volcán Villarrica

### 4.6.1. Escenarios eruptivos y generación de lahares

Según Petit-Breuilh y Lobato (1994), desde el año 1558 a la fecha, al menos 10 erupciones han sido acompañadas de flujos laháricos (Tabla 2.4; Subcapítulo 2.6.3). Además de lo anterior, según la misma fuente, sólo hay certeza de que no se produjeron lahares asociados a erupciones en 4 de estas, mientras que en el resto de las erupciones la ocurrencia de este producto no fue descrita.



Naranjo y Moreno (2004) plantean que casi la totalidad de las erupciones efusivas en el volcán han producido lahares, las cuales han causado la mayoría de los desastres alrededor de este. Lo anterior se ve favorecido por el glaciar que cubre el macizo sobre los 1900 m s.n.m., con un área que alcanza  $\sim 40 \text{ km}^2$  y un volumen de  $\sim 8 \text{ km}^3$  de hielo, lo que equivale a  $\sim 6.5 \text{ km}^3$  de agua (Moreno, 1993, 2000 en Naranjo y Moreno, 2004).

Los principales sistemas hídricos que se ven afectados por estos fenómenos son los ríos Turbio – Pedregoso y Zanjón Seco (Naranjo y Moreno, 2004). En estos, la mayoría de los depósitos laháricos son pobres en arcillas, por lo que son generalmente inducidos por súbitas descargas de agua (Scott, 1988), donde la fuente corresponde a glaciares y nieve. Adicionalmente, el volcán Villarrica presenta pendientes pronunciadas y un abrupto relieve en su cima. En consecuencia, la rápida fusión de nieve y hielo son el principal mecanismo gatillante de flujos laháricos, la cual ocurre, principalmente, por la interacción de lava con estos elementos. La dirección de un flujo lahárico está estrictamente relacionada a la dirección de los productos generados en las erupciones (coladas de lava, CDPs, avalanchas mixtas, etc.), al igual que existe una estrecha relación en sus magnitudes, en términos de la tasa de efusión y descarga de agua (Vera, 2019; Naranjo y Moreno, 2004).

Al menos 5 erupciones acompañadas de lahares han cobrado la vida de más de 100 personas, la desaparición de un número determinado de estas, y daños graves a la infraestructura, durante el siglo XX. Por lo tanto, los flujos laháricos han sido el peligro más riesgoso y recurrente en la historia del Volcán Villarrica (Naranjo y Moreno, 2004).

Adicionalmente, en volcanes con características similares, como es el caso del Volcán Llaima en la misma región, cuya actividad es principalmente de tipo estromboliano, con fases subplinianas, y en ocasiones de tipo hawaiiana (González-Ferrán, 1995), la generación de lahares es un evento recurrente, con al menos 12 erupciones históricas que han sido acompañados de estos (Petit-Breuilh y Lobato, 1994). Al igual que en el Vn. Villarrica, el origen de estos flujos laháricos se debe a una rápida fusión de nieve o hielo durante las etapas álgidas de una erupción, propiciando una súbita descarga de agua subglacial (Naranjo y Moreno, 2005).

El volcán Villarrica posee un amplio registro de sus erupciones en tiempos históricos, con IEV que varía de 1 a 3 según Petit-Breuilh y Lobato (1994). Considerando lo anterior y a toda la información recopilada en el Subcapítulo 2.6, se definen 3 escenarios eruptivos para el volcán Villarrica, presentados en la Tabla 4.49, siendo el escenario 2 el más probable (IEV = 2), mientras que el 3 el

más desfavorable, pero menos probable. El primer escenario (1) se fundamenta en la actividad histórica de baja explosividad (VEI = 1) registrada en el volcán, ejemplificada por las erupciones de los años 1983, 1980, 1977, 1958-1959, entre otras (Petit-Breuilh y Lobato, 1994). El segundo escenario (2) refleja el comportamiento del volcán en la erupción más reciente (2015) y en las erupciones de los años 1984-1985, 1971-1972, 1964, 1963, entre otros (Petit-Breuilh y Lobato, 1994), en las cuales el IEV fue de 2 y se generaron flujos de lava acompañados de lahares que bajaron por los flancos del volcán, este tipo de actividad es frecuente en el volcán y Van Daele *et al* (2014) indica que el volcán ha presentado 112 erupciones en los últimos 600 años con un IEV mayor o igual a 2. El tercer y último escenario (3) es de mayor explosividad (IEV = 3-4) y se fundamenta en la actividad histórica explosiva que ha registrado el volcán, cuyo ejemplo más reciente es la erupción de 1948-1949, la cual generó coladas de lava, flujos piroclásticos y lahares. Además de esto, el volcán presenta depósitos que evidencian grandes erupciones en tiempo prehistóricos, como son la Ignimbrita Licán e Ignimbrita Curacautín (Subcapítulo 2.6.3), por lo que escenarios de mayor explosividad como los ocurridos en el pasado (IEV mayor o igual a 4) pueden volver a ocurrir.

Tabla 4.49 Síntesis de las características de los escenarios definidos.

Escenario	IEV	Tipo de Actividad	Fenómenos Eruptivos
1 Pequeño	1	Hawaiana - Estromboliana	Caída de tefra, balísticos y flujos de lava
2 Moderado	2	Estromboliana	Caída de tefra, balísticos y flujos de lava
3 Grande	3-4	Subpliniana – Pliniana	Caída de tefra, balísticos y flujos piroclásticos

#### 4.6.2. Estimación de volumen de lahares

##### 4.6.2.1. Subdivisión de cuencas y estimación del volumen glaciar

Las cuencas del volcán Villarrica fueron subdivididas sobre la base de un análisis detallado de la red hidrográfica de la zona de estudio, a partir del modelo de elevación digital (DEM) de resolución de 12,5 m. Se identificaron 13 cuencas hidrográficas, de las cuales 10 reciben aporte directo desde el glaciar, por lo que estas se consideran para la modelación de flujos laháricos. Las cuencas

analizadas se denominan: Turbio, Comonahue, Seco, Voipir, Huichatío, Molco, Correntoso, Zanjón Seco, Pedregoso 1 y Pedregoso 2 (Figura 4.28).

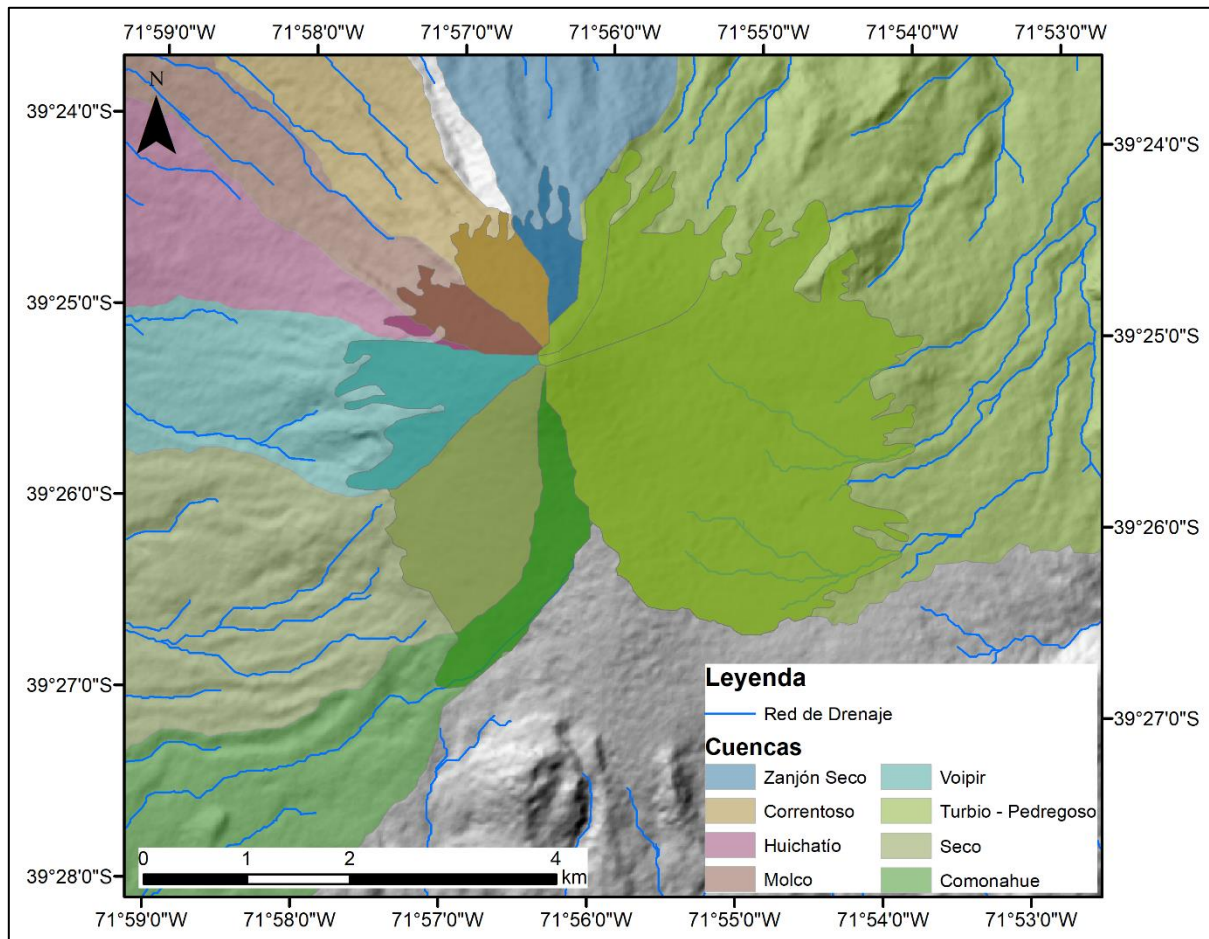


Figura 4.28 Red hídrica, subdivisión de cuencas y glaciar del volcán Villarrica. Elaboración propia con base en Rivera (2011) para el área del glaciar.

Considerando el glaciar definido por Rivera (2011), se identifican 10 subdivisiones glaciares de acuerdo con las cuencas hidrográficas que recibirían aportes del casquete (Figura 4.28), cuyas áreas, volúmenes de glaciares y volúmenes de agua equivalente disponible en el glaciar, calculados mediante las ecuaciones descritas en el Capítulo 3 de metodología se indican en la Tabla 4.50. El espesor utilizado para el cálculo de volumen de este volcán es de 43 m y fue definido según GEOESTUDIOS (2014).

Tabla 4.50 Volumen de cada fracción de glaciar según subdivisiones de cuencas.

Cuenca	Área de glaciar (m <sup>2</sup> )	Espesor del glaciar (m)	Volumen de glaciar (m <sup>3</sup> )	Volumen de glaciar EQ agua (m <sup>3</sup> )
Turbio	9.098.523	43	391.236.514	359.937.593
Comonahue	1.183.683		50.898.386	46.826.515
Seco	2.311.627		99.399.961	91.447.964
Voipir	1.347.783		57.954.677	53.318.303
Huichatío	67.442		2.900.006	2.668.005
Molco	547.486		23.541.932	21.658.577
Correntoso	650.176		27.957.593	25.720.986
Zanjón Seco	428.702		18.434.186	16.959.451
Pedregoso 1	498.966		21.455.559	19.739.114
Pedregoso 2	1.288.235		55.394.109	50.962.580

#### 4.6.2.2. Volumen de lahar por acción de coladas de lava

Se considera la emisión probable de flujos de lava entre 1 y 15 m de espesor y anchos que varían entre 20 – 80 m, según el trabajo de Moreno y Clavero (2006), Bono (2014) e imágenes satelitales del área. Debido a la gran extensión que poseen los glaciares en este volcán, se define y utiliza un factor para cada cuenca, el cual depende del porcentaje en área del glaciar que se ve potencialmente afectado por flujos de lava, para así no derretir la totalidad de la superficie del glaciar en cuencas donde los flujos de lava se canalizan por valles preferenciales y generar una exageración en los volúmenes calculados. Para el cálculo del volumen mínimo se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de lava de 1 m y 20 m, respectivamente. En el caso del volumen intermedio se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de 8 m y 50 m, respectivamente. Finalmente, para el cálculo del volumen máximo se utilizan valores de espesor y ancho de la colada de 15 m y 80 m, respectivamente (Tabla 4.51).

Tabla 4.51 Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Villarrica por lavas.

Cuenca	Factor	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m <sup>3</sup> ]
Turbio	0.56	61.824	1.236.480	3.709.440
Comonahue	1	73.600	1.472.000	4.416.000
Seco	1	84.640	1.692.800	5.078.400
Voipir	1	66.240	1.324.800	3.974.400
Huichatío	1	29.440	588.800	1.766.400
Molco	0.63	32.458	649.152	1.947.456
Correntoso	1	47.840	956.800	2.870.400
Zanjón Seco	1	55.200	1.104.000	3.312.000
Pedregoso 1	1	77.280	1.545.600	4.636.800
Pedregoso 2	0.7	56.672	1.133.440	3.400.320

Mediante el recálculo del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.52).

Tabla 4.52 Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de lava con el glaciar Villarrica.

Cuenca	Volumen mínimo con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 20% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen mínimo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]
Turbio	77.280	1.545.600	4.636.800	154.560	3.091.200	9.273.600
Comonahue	92.000	1.840.000	5.520.000	184.000	3.680.000	11.040.000
Seco	105.800	2.116.000	6.348.000	211.600	4.232.000	12.696.000
Voipir	82.800	1.656.000	4.968.000	165.600	3.312.000	9.936.000
Huichatío	36.800	736.000	2.208.000	73.600	1.472.000	4.416.000
Molco	40.572	811.440	2.434.320	81.144	1.622.880	4.868.640
Correntoso	59.800	1.196.000	3.588.000	119.600	2.392.000	7.176.000
Zanjón Seco	69.000	1.380.000	4.140.000	138.000	2.760.000	8.280.000
Pedregoso 1	96.600	1.932.000	5.796.000	193.200	3.864.000	11.592.000
Pedregoso 2	70.840	1.416.800	4.250.400	141.680	2.833.600	8.500.800



#### 4.6.2.3. Volumen de lahar por acción de CDPs

Se considera la emisión probable de CDP de 0.3 a 15 m de espesor y anchos que varían entre 10 – 100 m, según Pierson *et al* (1990), Moreno y Clavero (2006), Análisis de peligros del volcán Mocho - Choshuenco e imágenes satelitales. Debido a la gran extensión que posee el glaciar en este volcán, se define y utiliza un factor para cada cuenca, el cual depende del porcentaje en área del glaciar que se ve potencialmente afectado por CDPs, para así no derretir la totalidad de la superficie del glaciar en cuencas donde los CDPs se canalizan por valles preferenciales y generar una exageración en los volúmenes calculados. Para el cálculo se utilizan valores de espesor y ancho de 0.3 m y 10 m, 7 m y 55 m, y 15 m y 100 m, y el factor antes mencionado para cada cuenca, entregando resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos de hielo fundido para el Volcán Villarrica (Tabla 4.53).

Tabla 4.53 Volúmenes mínimos, intermedios y máximos de cantidad de agua disponible por cuenca, debido a la fusión del glaciar Villarrica por CDP.

Cuenca	Factor	Volumen mínimo de hielo fundido EQ agua [m3]	Volumen intermedio de hielo fundido EQ agua [m3]	Volumen máximo de hielo fundido EQ agua [m3]
Turbio	0.56	4.637	595.056	2.318.400
Comonahue	1	5.520	708.400	2.760.000
Seco	1	6.348	814.660	3.174.000
Voipir	1	4.968	637.560	2.484.000
Huichatío	1	2.208	283.360	1.104.000
Molco	0.63	2.434	312.404	1.217.160
Correntoso	1	3.588	460.460	1.794.000
Zanjón Seco	1	4.140	531.300	2.070.000
Pedregoso 1	1	5.796	743.820	2.898.000
Pedregoso 2	0.7	4.250	545.468	2.125.200

Mediante el recálculo del volumen por la fracción de detritos contenido en el lahar, dependiendo del tipo de este, se obtienen resultados de volúmenes mínimos, intermedios y máximos para cada escenario mencionado (Tabla 4.54).

Tabla 4.54 Volúmenes recalculados con detritos de lahares que pueden generarse por interacción de CDP con el glaciar Villarrica.

Cuenca	Volumen mínimo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 60% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen mínimo con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen intermedio con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]	Volumen máximo con 75% detritos [m <sup>3</sup> ]
Turbio	11.592	1.487.640	5.796.000	18.547	2.380.224	9.273.600
Comonahue	13.800	1.771.000	6.900.000	22.080	2.833.600	11.040.000
Seco	15.870	2.036.650	7.935.000	25.392	3.258.640	12.696.000
Voipir	12.420	1.593.900	6.210.000	19.872	2.550.240	9.936.000
Huichatío	5.520	708.400	2.760.000	8.832	1.133.440	4.416.000
Molco	6.085	781.011	3.042.900	9.737	1.249.617	4.868.640
Correntoso	8.970	1.151.150	4.485.000	14.352	1.841.840	7.176.000
Zanjón Seco	10.350	1.328.250	5.175.000	16.560	2.125.200	8.280.000
Pedregoso 1	14.490	1.859.550	7.245.000	23.184	2.975.280	11.592.000
Pedregoso 2	10.626	1.363.670	5.313.000	17.001	2.181.872	8.500.800

#### 4.6.3. Modelado de inundación con LaharZ

Se realizan 4 modelaciones para el volcán Villarrica en el software LaharZ, cuyos volúmenes de entrada para el modelo son obtenidos desde la Tabla 4.52 y 4.54. Las modelaciones corresponden a i) lahares generados por lavas con un 20% de detritos (Figura 4.29), ii) lahares generados por lavas con un 60% de detritos, iii) lahares generados por CDP con 60% de detritos, iv) lahares generados por CDP con un 75% de detritos. En esta sección se presenta un ejemplo del resultado obtenido con la modelación en LaharZ, los mapas restantes se encuentran en el Anexo 1.

En el caso del presente volcán, el escenario 1 se ve representado por los volúmenes mínimos calculados para lahares generados por acción de coladas de lava, con la respectiva variación en el volumen final dependiendo del porcentaje de detritos (20% y 60%; subcapítulo 3.3). El escenario 2 se representa por los volúmenes intermedios calculados para lahares generados por coladas de lava o CDPs y el escenario 3 corresponde a los volúmenes máximos de lahares generados por lavas o CDPs.

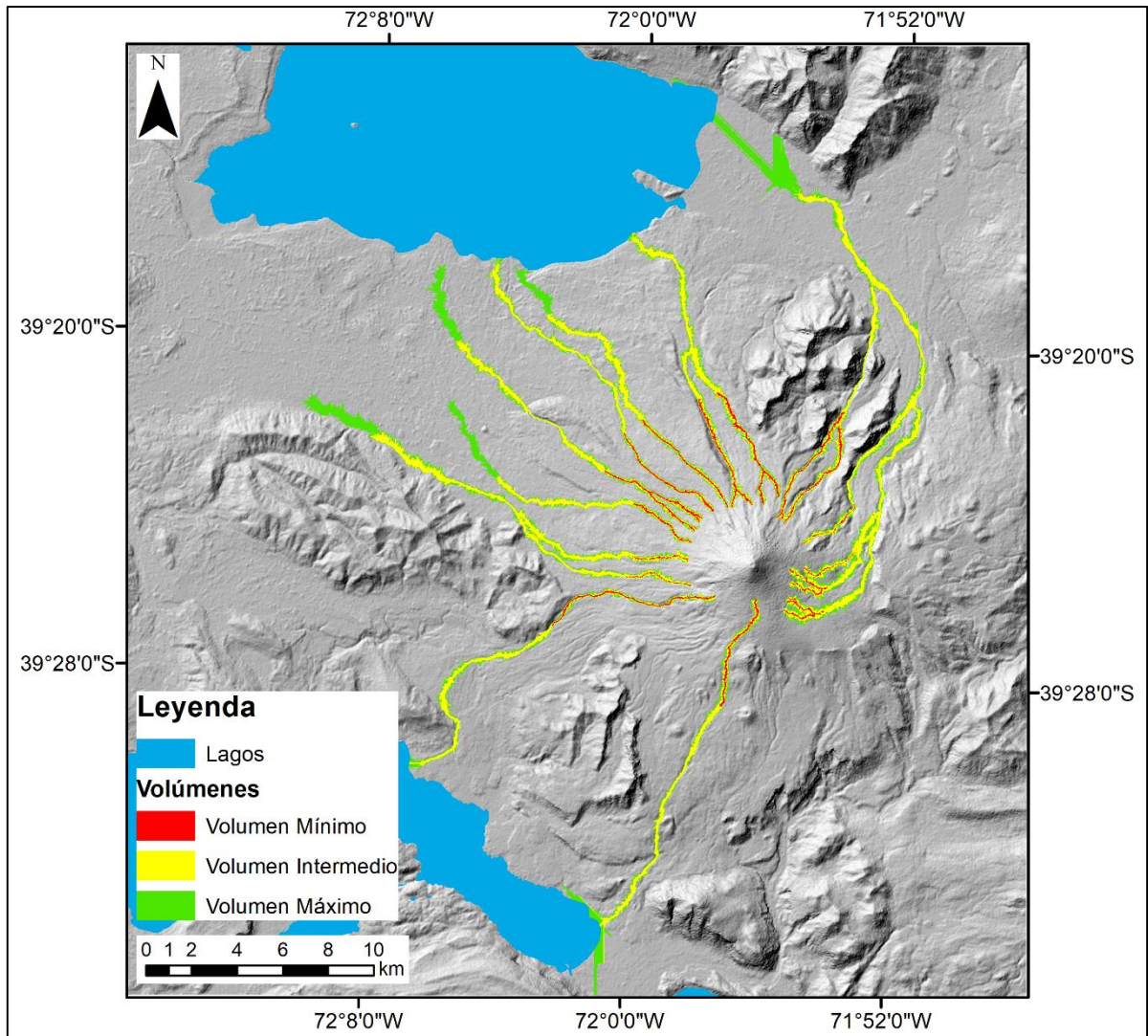


Figura 4.29 Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Villarrica, en el caso de lahares generados por lavas con un 20% de detritos.

#### 4.6.3.1. Modelación detallada respecto a la ciudad de Pucón

Debido a la cercanía de la ciudad de Pucón con el volcán, el gran aumento de su demografía por el turismo en la zona, principalmente en la época de verano, y la cantidad de trabajos y estudios que contemplan la ciudad dentro de la zona de máxima probabilidad de inundación por lahares (Subcapítulo 6.1) se realiza un estudio en detalle de los cauces aledaños a Pucón que tienen posibilidad de desbordarse, y así ramificar los flujos hacia la zona urbana.

Se realizan perfiles transversales en puntos críticos aledaños a Pucón, donde los lahares que bajan por los cauces principales definidos anteriormente puedan desbordarse e inundar la ciudad (Figura

4.30; Figura 4.31). Estos cauces corresponden a los valles del Zanjón Seco y del sistema Turbio-Pedregoso, en el sector oeste y este de la ciudad, respectivamente. Los perfiles se realizan en ArcMap utilizando la información de elevación proporcionada por el DEM de 12,5 m de resolución.

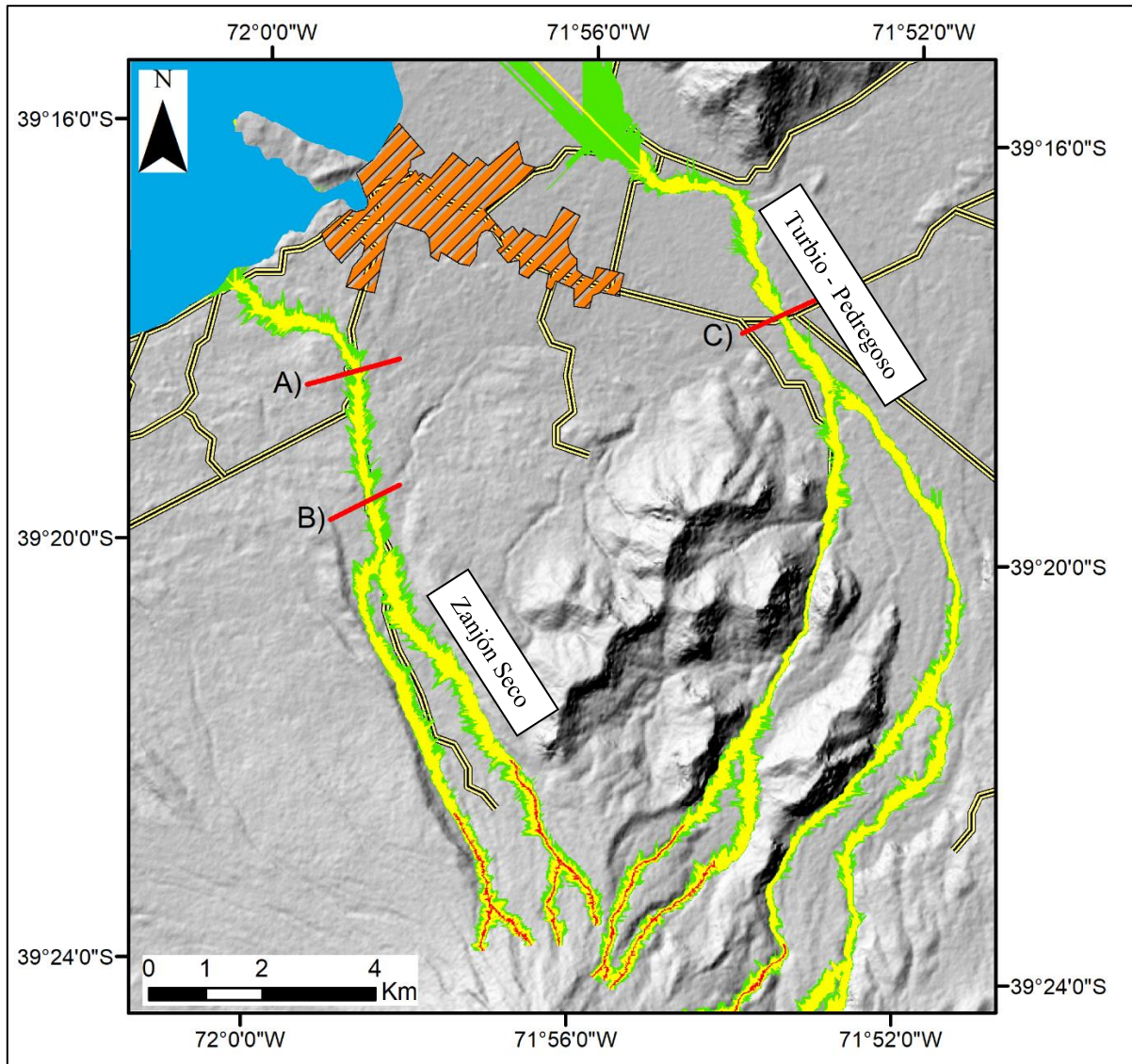


Figura 4.30 Lugares donde se realizan perfiles transversales (líneas rojas). La ciudad de Pucón se destaca en color naranja.

De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 4.55), se observa en el Perfil C que este valle podría ser superado para el volumen máximo de lahar, mientras que en los perfiles A y B, las áreas transversales de lahares no alcanzan a rebalsar los valles. Por lo tanto, según estos resultados se decide establecer puntos de inicio de flujo para la modelación en LaharZ en el sector este de Pucón,



donde el valle podría ser superado por el lahar, para así graficar de mejor manera los escenarios probables en una futura erupción (Figura 4.32). El volumen utilizado para la modelación en este punto corresponde al equivalente al área desbordada en el escenario de mayor volumen, y se determina mediante la ecuación de LaharZ para la sección transversal  $A = 0.02 * V^{2/3}$ , dicho volumen corresponde a  $156.170 \text{ m}^3$ .

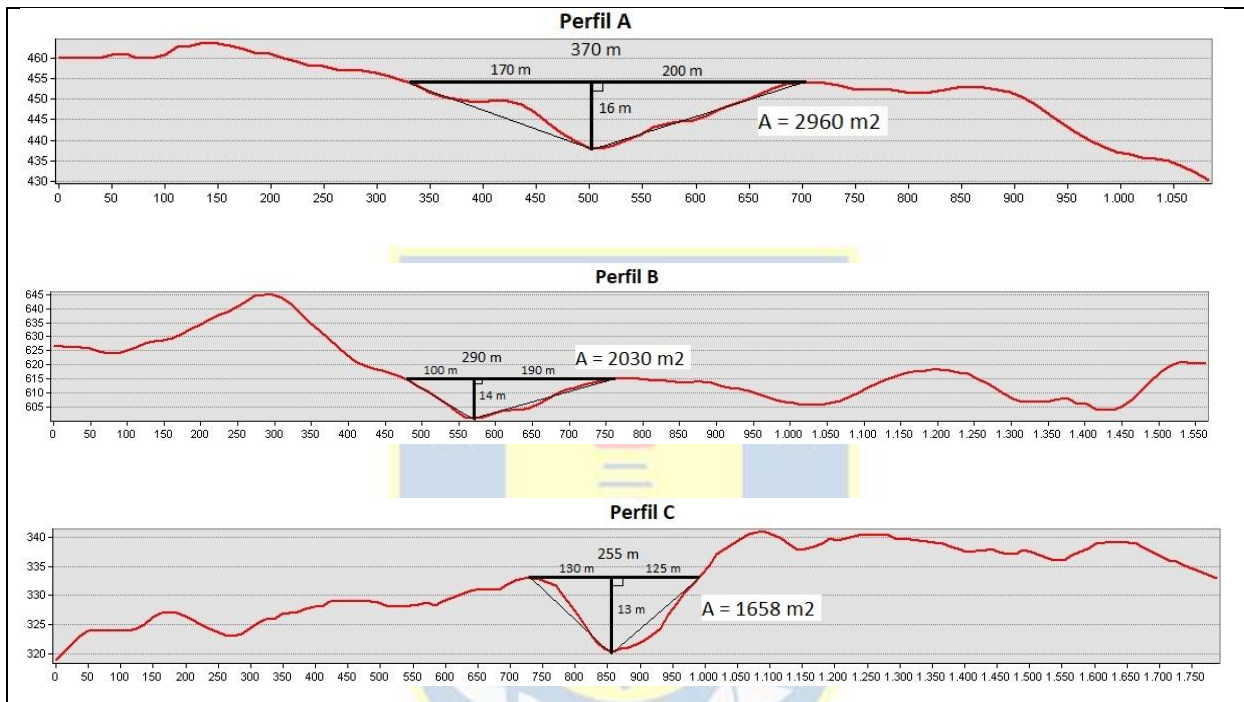


Figura 4.31 Perfiles y áreas transversales calculadas.

Tabla 4.55 Áreas transversales de flujos laháricos y valles aledaños a la ciudad de Pucón. En rojo se muestra el área transversal del valle que podría ser superado por un lahar.

Perfil Transversal	Área transversal lahar (vol. mín.) [ $\text{m}^2$ ]	Área transversal lahar (vol. int.) [ $\text{m}^2$ ]	Área transversal lahar (vol. máx.) [ $\text{m}^2$ ]	Área transversal del valle [ $\text{m}^2$ ]
Perfil A)	21	691	1843	2960
Perfil B)	21	691	1843	2030
Perfil C)	20	643	1716	<b>1658</b>



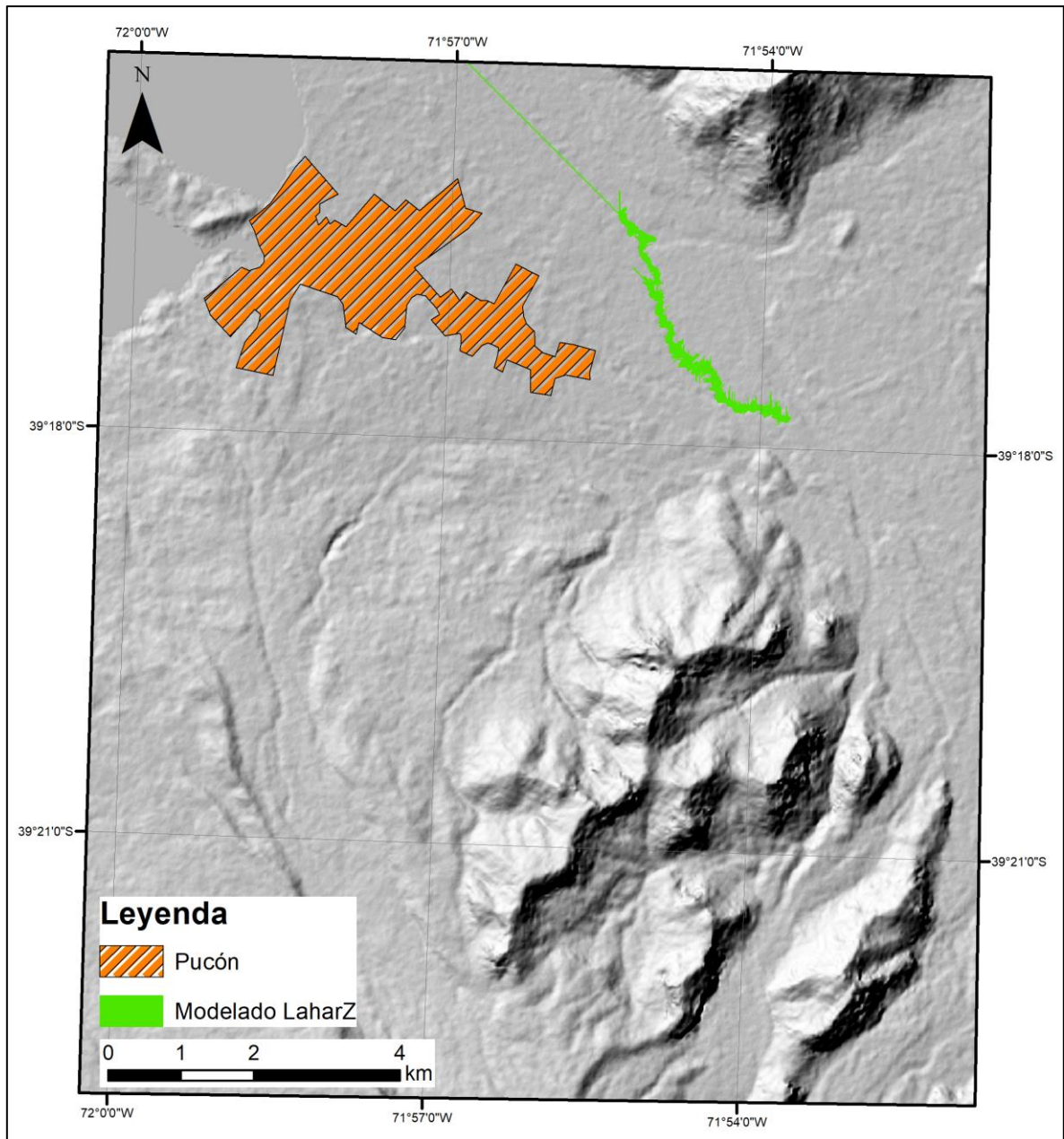


Figura 4.32 Resultados de la modelación en detalle con respecto a la ciudad de Pucón.

#### 4.6.4. Zonas de peligro por flujos laháricos

Como se mencionó en la sección anterior, los volúmenes de los lahares modelados están relacionados directamente con los escenarios eruptivos definidos y sus productos, por lo que se definen las zonas de peligro según el alcance que pueden tener los lahares bajo determinadas condiciones de generación y sus volúmenes asociados (Figura 4.33).

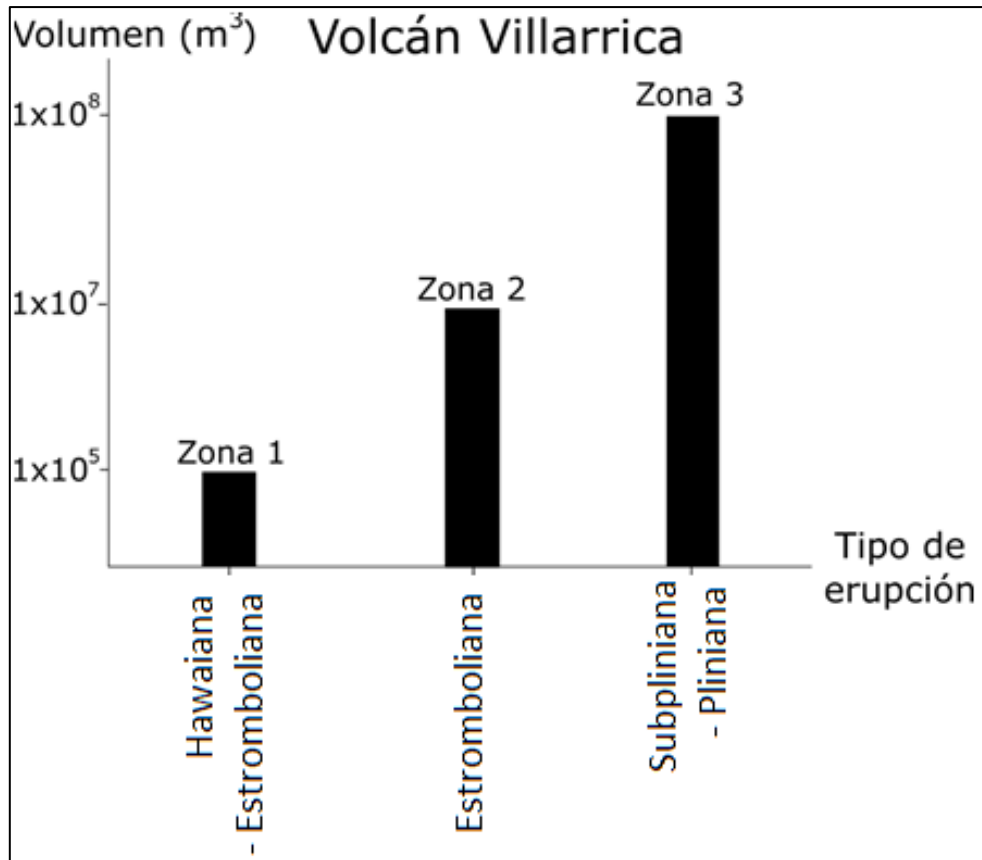


Figura 4.33 Relación entre escenarios eruptivos y volúmenes determinados.

Según los volúmenes de lahares definidos anteriormente, su relación con los escenarios eruptivos, la modelación con LaharZ y el análisis de la bibliografía e información recopilada durante este trabajo se definen 3 zonas de peligros para el Volcán Villarrica (Figura 4.34):

Zona 1: Áreas de máxima probabilidad de inundación por lahares desde erupciones de baja magnitud, con IEV = 1, y volúmenes de lahares del orden de  $1 \times 10^5 \text{ m}^3$  o mayor, además del área de inundación de los lahares generados en la erupción del 2015. Incluye la zona proximal de peligro volcánico (H/L) en la cual se genera la fusión de hielo/nieve por lavas o CDPs y comienzan los lahares.

Zona 2: Áreas susceptibles a ser inundadas por lahares desde erupciones de mediana magnitud (IEV entre 1 y 2) y volúmenes de lahares del orden de  $1 \times 10^7 \text{ m}^3$  o mayor.

Zona 3: Zonas inundables por grandes lahares generados en erupciones de gran magnitud (IEV  $\geq$  2) y volúmenes de lahares del orden de  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$  o mayor.

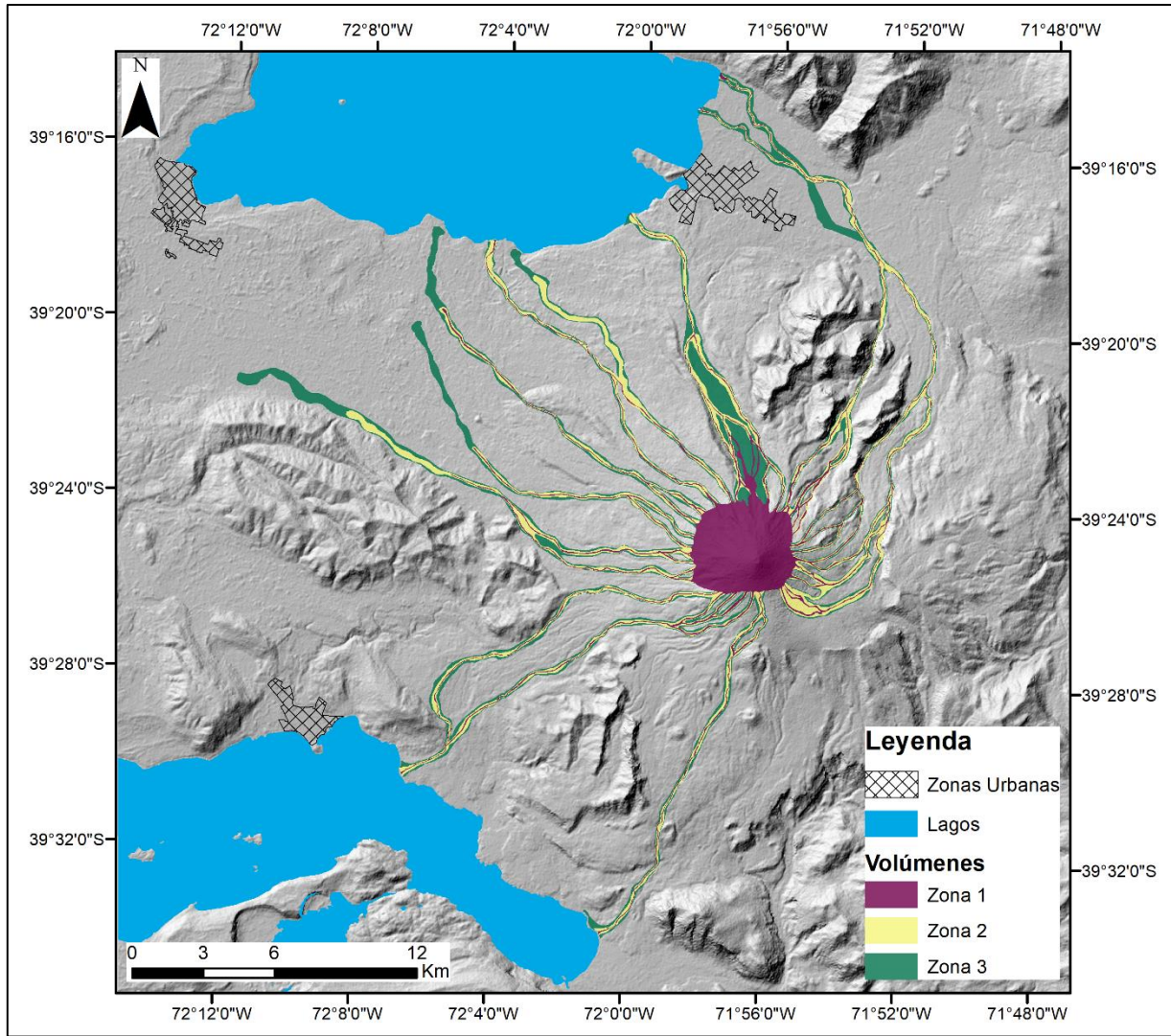


Figura 4.33

Zonación del peligro volcánico de lahares en el Volcán Villarrica.

## 5. INTEGRACIÓN DE PELIGROS

### 5.1. Introducción

En una erupción volcánica se generan distintos productos, cuyos efectos sobre el territorio y la población tienen distintos grados de impacto y nocividad. Para evaluar de forma correcta el peligro ante un determinado evento, se deben analizar en forma conjunta los distintos peligros existentes. Con este objetivo, se realiza un análisis semi – cuantitativo con una metodología innovadora, considerando una gran parte de los peligros que se pueden generar en una erupción (flujos de lava, corrientes de densidad piroclástica y lahares).

### 5.2. Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs

Para realizar la integración de los peligros volcánicos se utiliza la matriz modificada de evaluación de peligros utilizada en el trabajo “Estudio de Riesgo de Volcán Mocho – Choshuenco” (inédito; EULA, 2017), “Estudio de Identificación de Riesgos en la Comuna de Curacautín” (inédito; EULA, 2018) y la memoria de título “Análisis de Peligro Volcánico por Flujos de Lava y Corrientes de Densidad Piroclástica en los Estratovolcanes Activos Callaqui, Llaima, Lonquimay, Tolhuaca, Villarrica y Mocho-Choshuenco” (Jorquera, 2019), la cual se basa en la asignación de puntajes a diferentes categorías predefinidas para cada zona de peligro determinada con anterioridad (Tabla 5.1). Las categorías generales en las cuáles se basa esta metodología son: (i) la recurrencia de los peligros en las zonas determinadas, (ii) el alcance de los peligros expresados en términos de su velocidad y de la dificultad que puede tener una persona para evadir el peligro, y (iii) el potencial de impacto que tiene cada peligro cuando este alcanza poblados e infraestructuras.

Los ítems de cada categoría fueron escogidos por su significancia en la preparación de un plan de emergencia y plan de manejo del riesgo por emergencia volcánica. Para el caso de los ítems de recurrencia, estos dependen del tipo de peligro y de la zona analizada; el alcance también puede tener esta dependencia, aunque en muchos casos el total de alcance será igual para cada zona en un peligro determinado. El impacto, sin embargo, es el mismo para todas las zonas y depende solamente del tipo de peligro.

Los valores de cada ítem por zona de peligro definida se obtienen mediante su categorización en la Tabla 5.1. Por otro lado, para obtener la recurrencia total, los valores son sumados; mientras que



para el alcance y el impacto, los valores son promediados (Tabla 5.1). Los tres valores totales obtenidos son multiplicados entre sí para obtener la puntuación o peligro total. Finalmente, la puntuación total para cada peligro y zona se utilizó para generar un ranking de peligrosidad que permitió la categorización de cada peligro. Con estos resultados se construyeron mapas integrados de peligrosidad volcánica para cada volcán.

Tabla 5.1. Matriz de evaluación de peligro volcánico (Modificada de “Estudio de identificación de riesgos en la comuna de Curacautín” (inédito; EULA, 2018)

	Ítem	Valores Posibles
Recurrencia conocida	Últimos 500 años	0 = No
	Últimos 2500 años	1 = Poco Probable
	Holoceno	2 = Incierto
	Nivel de ocurrencia (últimos 500 años)	3 = Probable
	Total (suma de los ítems)	4 = Cierto
Alcance Zonal	Velocidad (tiempo de arribo a zona distal)	0 = No se ha reconocido
	Dificultad de protección	1 = Se ha reconocido
	Total (promedio de los ítems)	2 = Es frecuente
Potencial de Impacto Directo	Daño a la salud	1 = Días
	Interrumpe vía de evacuación	2 = Hrs. – Días
	Daño a infraestructura o servicios	3 = Min. – Hrs.
	Total (promedio de los ítems)	4 = Seg. – Min.
Total Peligro (Recurrencia conocida * Alcance Zonal * Potencial de Impacto Directo)		0 = Fácil escapar
		1 = Con condiciones
		2 = Muy difícil
		0 - 3
		1 - 3
		0 - 126

En la presente memoria se evalúa el peligro de lahares en cada volcán, y se incluye a esto la evaluación del peligro de coladas de lava y corrientes de densidad piroclástica desarrollada en el trabajo de Jorquera (2019), la cual siguió la misma metodología para esos fenómenos.

Además, mediante un script de “Python” se generaron matrices de peligro en cada volcán estudiado, para representar gráficamente el valor del peligro obtenido para cada zona. En esta matriz, el eje x corresponde al ítem de “recurrencia”, mientras que el eje y corresponde al “impacto total”, el cual se obtiene multiplicando los valores totales de los ítems de “alcance zonal” y “potencial de impacto directo”.



A continuación, se presentan las tablas de integración de los peligros analizados por cada volcán (Tabla 5.2 a 5.7), y sus respectivas matrices de “recurrencia” por “impacto” (Figura 5.1 a 5.6).

5.2.1. Volcán Callaqui

Tabla 5.2 Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Callaqui.

		Recurrencia conocida					Alcance zonal			Potencial de impacto directo				Total Peligro
		En últimos 500 años	En últimos 2500 años	Holoceno	Ocurrencia (<500 años)	Total Frecuencia	Velocidad (tiempo de llegada a parte distal)	Dificultad de protección	Total Alcance	Provoca daño a la	Interrumpe vía de evacuación	Daño a infraestructura o servicios	Total Impacto	
CDPs	Zona 1	0	2	4	0	6	4	2	3	3	3	3	3	54
	Zona 2	0	1	3	0	4	3	2	2.5	3	3	3	3	30
	Zona 3	0	0	2	0	2	3	2	2.5	3	3	3	3	15
Lahares	Zona 1	3	3	3	0	9	3	1	2	3	3	2	2.67	48
	Zona 2	2	3	3	0	8	3	1	2	3	3	2	2.67	42.7
	Zona 3	1	2	3	0	6	3	1	2	3	3	2	2.67	32
	Zona 4	3	3	3	0	9	3	1	2	3	3	2	2.67	48
Lavás	Zona 1	0	2	4	0	6	2	0	1	3	3	3	3	18
	Zona 2	0	3	4	0	7	3	0	1.5	3	3	3	3	31.5
	Zona 3	0	2	4	0	6	3	0	1.5	3	3	3	3	27

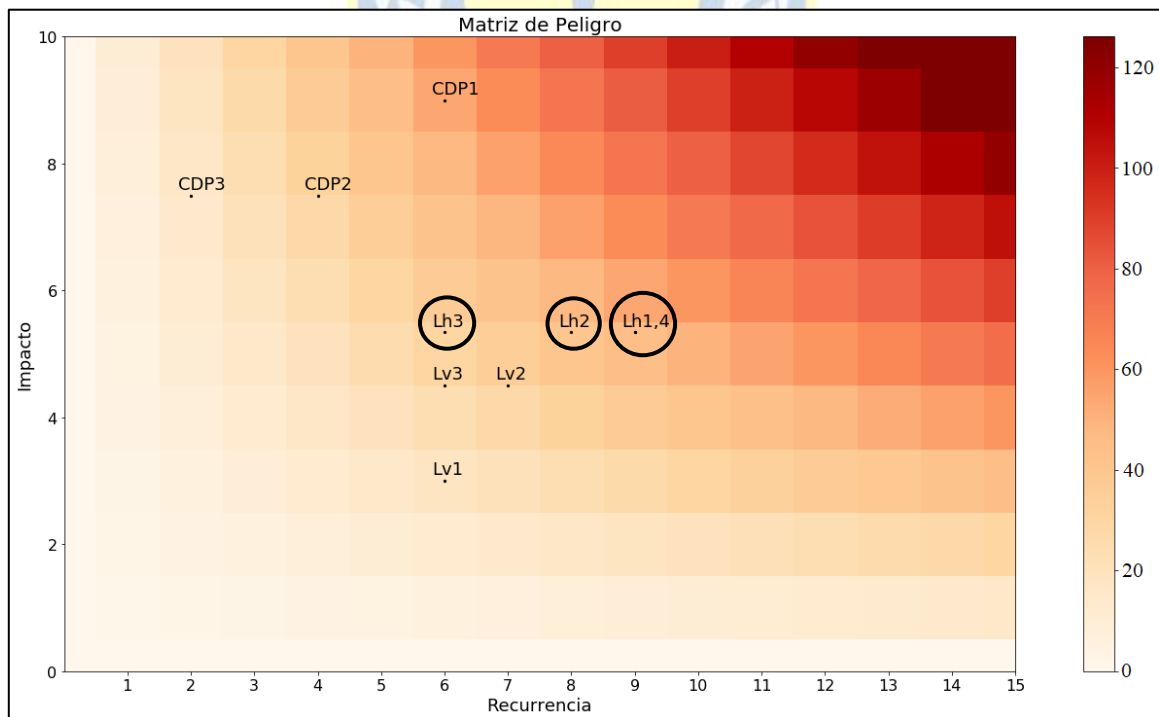


Figura 5.1 Matriz de peligros para el Volcán Callaqui.

5.2.2. Volcán Llaima

Tabla 5.3 Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Llaima.

		Recurrencia conocida					Alcance zonal			Potencial de impacto directo				Total Peligro
		En últimos 500 años	En últimos 2500 años	Holoceno	Ocurrencia (<500 años)	Total Frecuencia	Velocidad (tiempo de llegada a parte distal)	Dificultad de protección	Total Alcance	Provoca daño a la salud	Interrumpe vía de evacuación	Daño a infraestructura o servicios	Total Impacto	
CDPs	Zona 1	4	4	4	1	13	4	2	3	3	3	3	3	117
	Zona 2	4	4	4	1	13	3	2	2.5	3	3	3	3	97.5
	Zona 3	0	1	4	0	5	3	2	2.5	3	3	3	3	37.5
Lahares	Zona 1	4	4	4	2	14	4	1	2.5	3	3	2	2.67	93.3
	Zona 2	4	4	4	2	14	3	1	2	3	3	2	2.67	74.7
	Zona 3	3	3	4	1	11	3	1	2	3	3	2	2.67	58.7
Lavas	Zona 1	4	4	4	1	13	2	0	1	3	3	3	3	39
	Zona 2	4	4	4	1	13	2	0	1	3	3	3	3	39
	Zona 3	4	4	4	2	14	2	0	1	3	3	3	3	42
	Zona 4	4	4	4	2	14	2	0	1	3	3	3	3	42
	Zona 5	4	4	4	1	13	2	0	1	3	3	3	3	39
	Zona 6	2	4	4	1	11	2	0	1	3	3	3	3	33

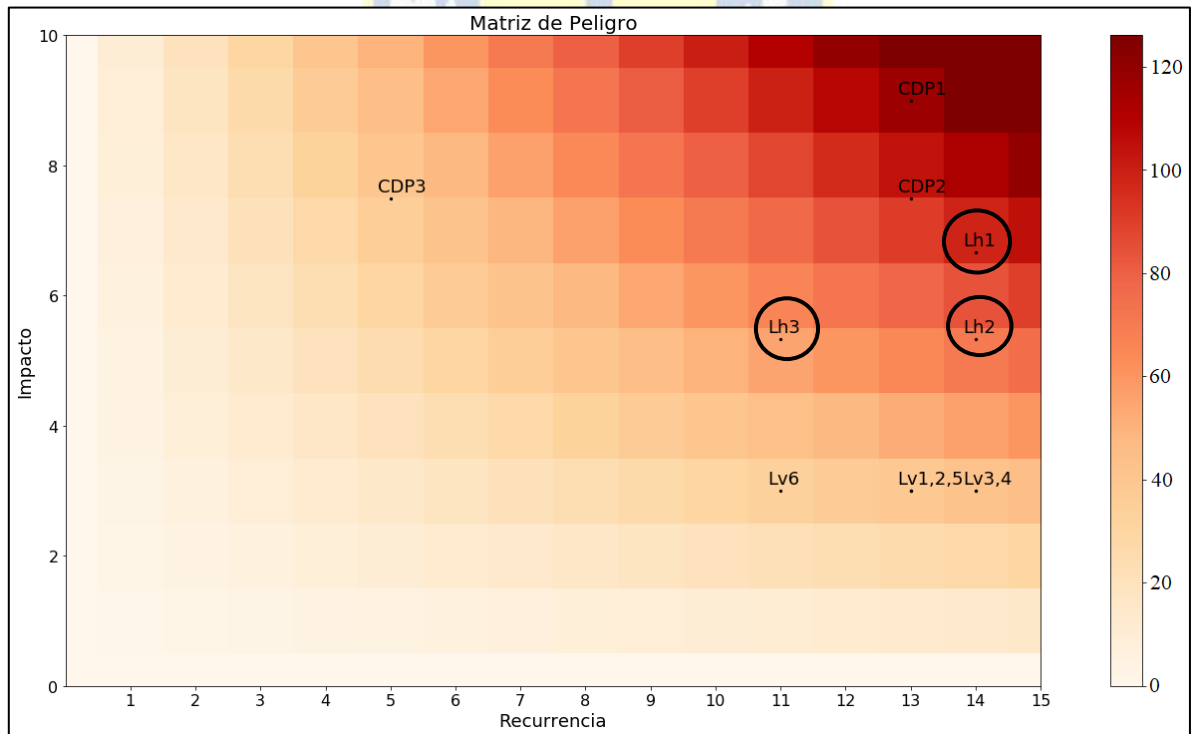


Figura 5.2 Matriz de peligros para el Volcán Llaima.

5.2.3. Volcán Lonquimay

Tabla 5.4 Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Lonquimay.

		Recurrencia conocida					Alcance zonal			Potencial de impacto directo				Total Peligro
		En últimos 500 años	En últimos 2500 años	Holoceno	Ocurrencia (<500 años)	Total Frecuencia	Velocidad (tiempo de llegada a parte distal)	Dificultad de protección	Total Alcance	Provoca daño a la salud	Interrompe vía de evacuación	Daño a infraestructura o servicios	Total Impacto	
CDPs	Zona 1	4	4	4	1	13	4	2	3	3	3	3	3.00	117
	Zona 2	2	2	2	0	6	3	2	2.5	3	3	3	3.00	45
	Zona 3	0	2	2	0	4	3	2	2.5	3	3	3	3.00	30
Lahares	Zona 1	3	3	3	0	9	3	1	2	3	3	2	2.67	48
	Zona 2	1	2	3	0	6	3	1	2	3	3	2	2.67	32
	Zona 3	0	2	2	0	4	3	1	2	3	3	2	2.67	21.3
Lavas	Zona 1	4	4	4	1	13	3	0	1.5	3	3	3	3.00	58.5
	Zona 2	2	3	4	0	9	2	0	1	3	3	3	3.00	27
	Zona 3	0	2	4	0	6	2	0	1	3	3	3	3.00	18
	Zona 4	0	2	4	0	6	2	0	1	3	3	3	3.00	18
	Zona 5	4	4	4	1	13	2	0	1	3	3	3	3.00	39
	Zona 6	2	3	4	0	9	3	0	1.5	3	3	3	3.00	40.5

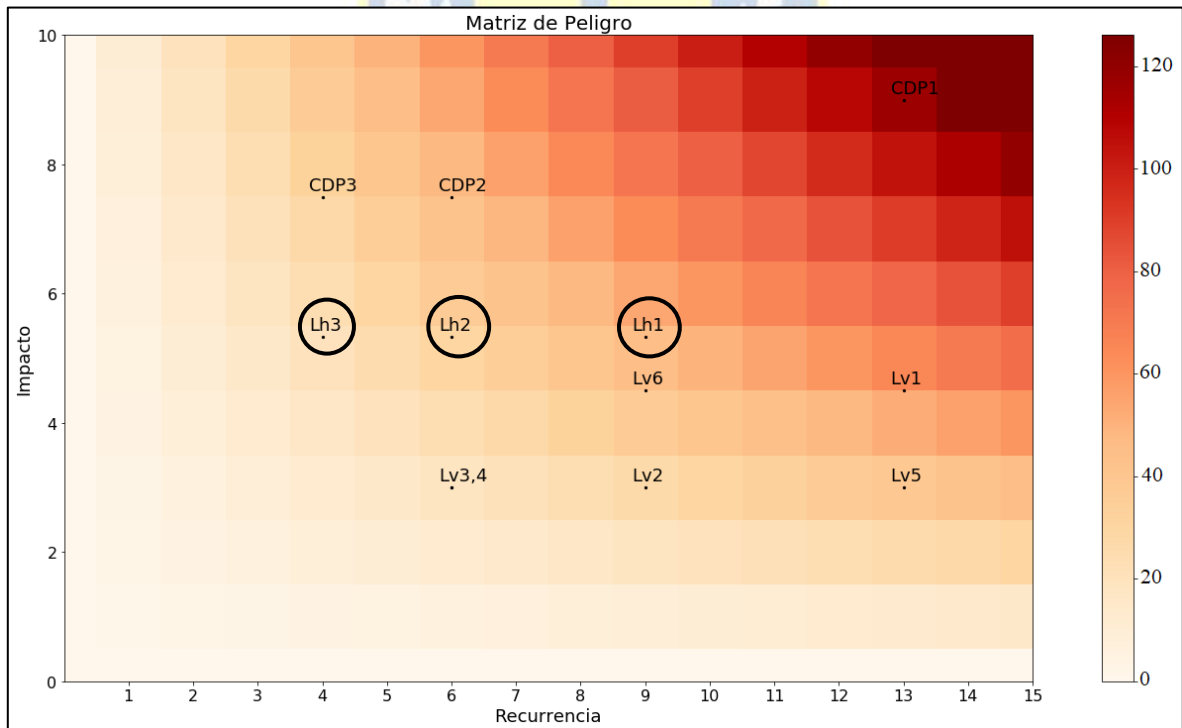


Figura 5.3 Matriz de peligros para el volcán Lonquimay.

5.2.4. Volcán Mocho – Choshuenco

Tabla 5.5 Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Mocho-Choshuenco.

		Recurrencia conocida					Alcance zonal			Potencial de impacto directo				Total Peligro
		En últimos 500 años	En últimos 2500 años	Holoceno	Ocurrencia (<500 años)	Total Frecuencia	Velocidad (tiempo de llegada a parte distal)	Dificultad de protección	Total Alcance	Provoca daño a la salud	Interrumpe vía de evacuación	Daño a infraestructura o servicios	Total Impacto	
CDPs	Zona 1	4	4	4	1	13	4	2	3	3	3	3	3	117
	Zona 2	3	4	4	1	12	3	2	2.5	3	3	3	3	90
	Zona 3	1	4	4	0	9	3	2	2.5	3	3	3	3	67.5
Lahares	Zona 1	4	4	4	1	13	3	1	2	3	3	2	2.67	69.3
	Zona 2	3	3	3	1	10	3	1	2	3	3	2	2.67	53.3
Lavas	Zona 1	4	4	4	1	13	1	0	0.5	3	3	3	3	19.5
	Zona 2	0	0	1	0	1	1	0	0.5	3	3	3	3	1.5
	Zona 3	1	3	4	0	8	2	0	1	3	3	3	3	24
	Zona 4	1	2	4	0	7	1	0	0.5	3	3	3	3	10.5
	Zona 5	4	4	4	1	13	1	0	0.5	3	3	3	3	19.5

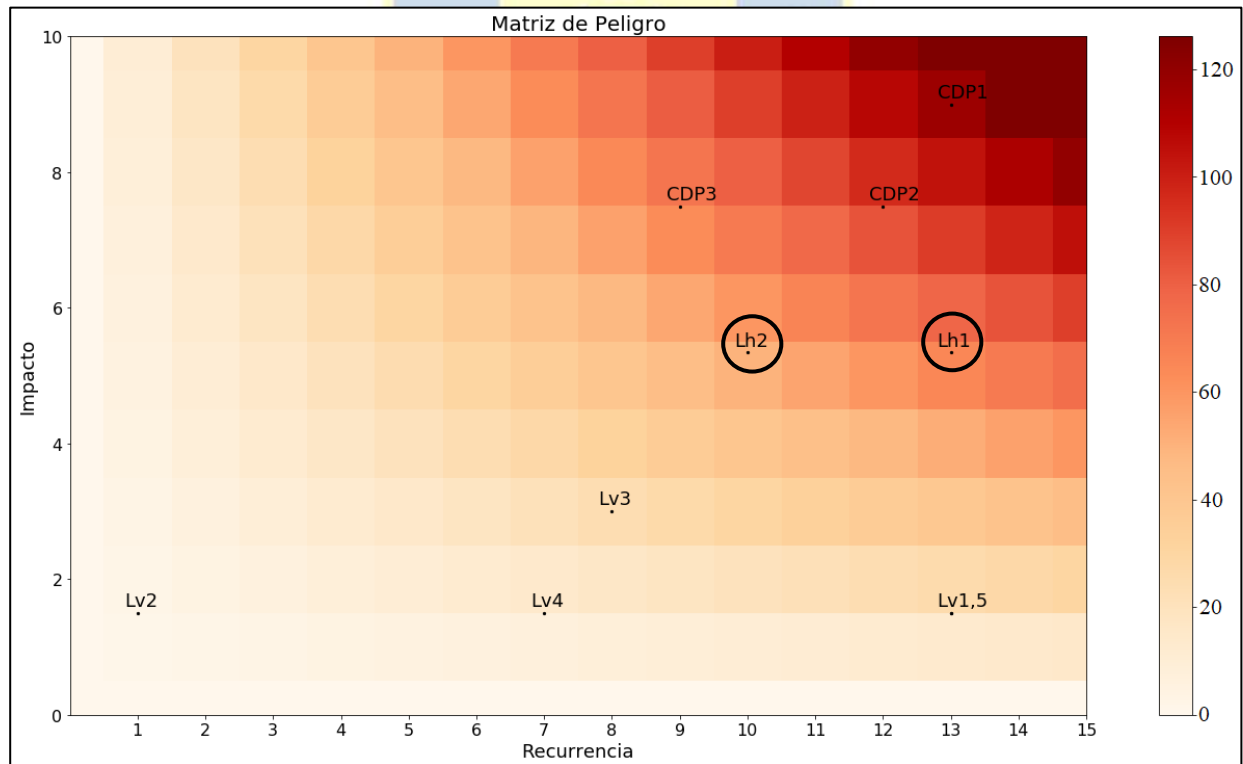


Figura 5.4 Matriz de peligros para el volcán Mocho-Choshuenco.

5.2.5. Volcán Tolhuaca

Tabla 5.6 Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Tolhuaca.

		Recurrencia conocida					Alcance zonal			Potencial de impacto directo				Total Peligro
		En últimos 500 años	En últimos 2500 años	Holoceno	Ocurrencia (<500 años)	Total Frecuencia	Velocidad (tiempo de llegada a parte distal)	Dificultad de protección	Total Alcance	Provoca daño a la salud	Interrumpe vía de evacuación	Daño a infraestructura o servicios	Total Impacto	
CDPs	Zona 1	0	0	4	0	4	4	2	3	3	3	3	3	36
	Zona 2	0	0	4	0	4	3	2	2.5	3	3	3	3	30
	Zona 3	0	0	3	0	3	3	2	2.5	3	3	3	3	22.5
	Zona 4	0	0	2	0	2	3	2	2.5	3	3	3	3	15
Lahares	Zona 1	0	3	3	0	6	3	1	2	3	3	2	2.67	32
	Zona 2	0	2	3	0	5	3	1	2	3	3	2	2.67	26.7
	Zona 3	0	1	3	0	4	3	1	2	3	3	2	2.67	21.3
Lavas	Zona 1	0	2	4	0	6	2	0	1	3	3	3	3	18
	Zona 2	0	1	4	0	5	1	0	0.5	3	3	3	3	7.5
	Zona 3	0	1	4	0	5	1	0	0.5	3	3	3	3	7.5
	Zona 4	0	2	4	0	6	2	0	1	3	3	3	3	18
	Zona 5	0	1	4	0	5	1	0	0.5	3	3	3	3	7.5
	Zona 6	0	1	4	0	5	2	0	1	3	3	3	3	15

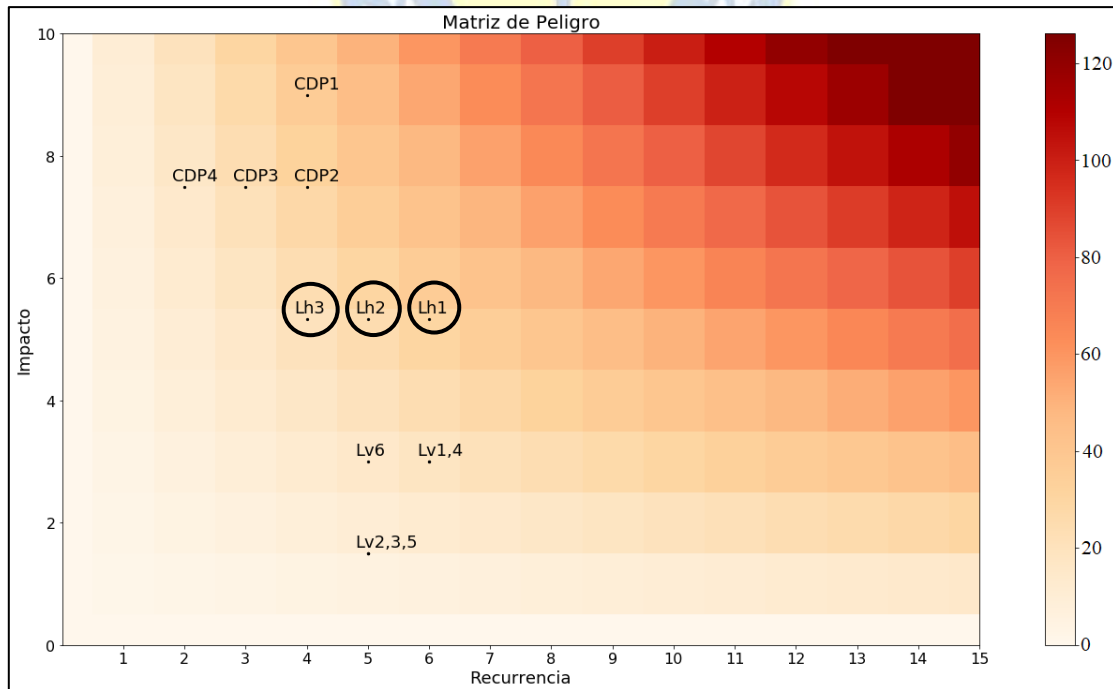


Figura 5.5 Matriz de peligros para el volcán Tolhuaca.



5.2.6. Volcán Villarrica

Tabla 5.7 Integración de peligros por lahares, flujos de lava y CDPs en el volcán Villarrica.

		Recurrencia conocida					Alcance zonal			Potencial de impacto directo				Total Peligro
		En últimos 500 años	En últimos 2500 años	Holoceno	Ocurrencia (<500 años)	Total Frecuencia	Velocidad (tiempo de llegada a parte distal)	Dificultad de protección	Total Alcance	Provoca daño a la salud	Interrumpe vía de evacuación	Daño a infraestructura o servicios	Total Impacto	
CDPs	Zona 1	4	4	4	1	13	4	2	3	3	3	3	3	117
	Zona 2	2	4	4	0	10	3	2	2.5	3	3	3	3	75
	Zona 3	0	4	4	0	8	3	2	2.5	3	3	3	3	60
Lahares	Zona 1	4	4	4	2	14	3	1	2	3	3	2	2.67	74.7
	Zona 2	4	4	4	1	13	3	1	2	3	3	2	2.67	69.3
	Zona 3	3	4	4	1	12	3	1	2	3	3	2	2.67	64
Lavas	Zona 1	0	4	4	1	9	2	0	1	3	3	3	3	27
	Zona 2	4	4	4	2	14	3	0	1.5	3	3	3	3	63
	Zona 3	4	4	4	2	14	3	0	1.5	3	3	3	3	63
	Zona 4	4	4	4	1	13	3	0	1.5	3	3	3	3	58.5
	Zona 5	1	4	4	1	10	3	0	1.5	3	3	3	3	45
	Zona 6	1	3	4	1	9	3	0	1.5	3	3	3	3	40.5
	Zona 7	4	4	4	2	14	4	0	2	3	3	3	3	84

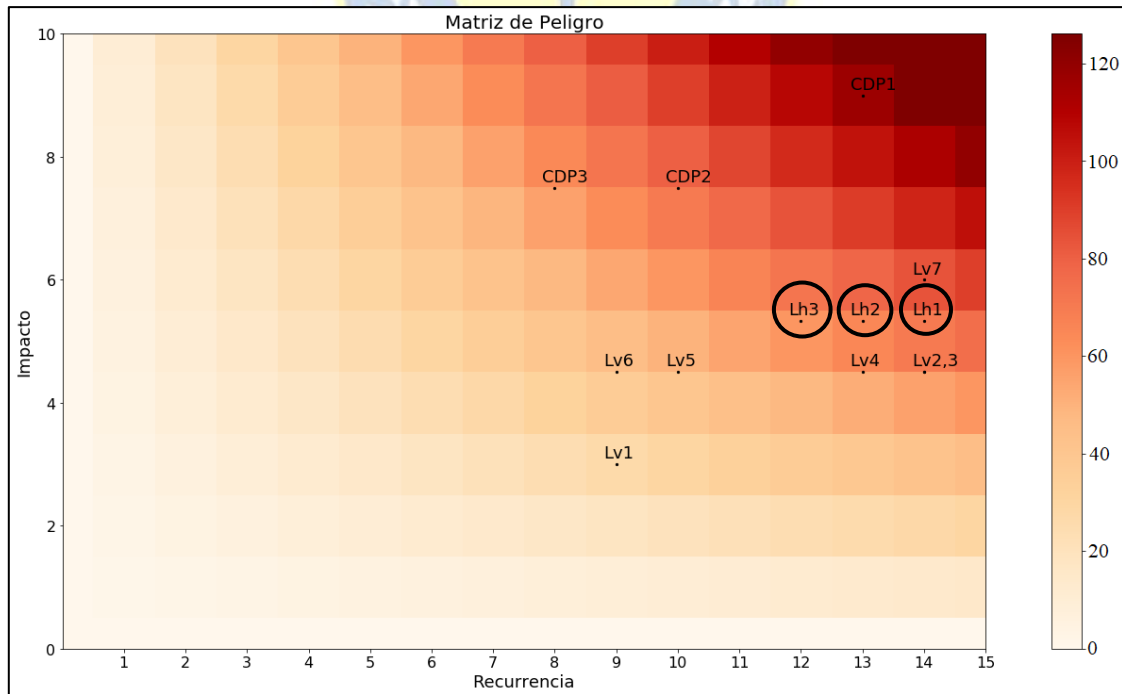


Figura 5.6 Matriz de peligros para el volcán Villarrica.

### 5.2.7. Análisis de las matrices de peligro

La principal diferencia observable en las matrices de peligros de impacto vs recurrencia de los volcanes se da entre los volcanes Callaqui/Tolhuaca y los 4 restantes. Los primeros presentan valores de peligro menores, debido a una menor recurrencia de sus erupciones con respecto al resto de los volcanes. Gráficamente se observa que la concentración de los puntos del gráfico que representan cada zona de peligro en el caso de los volcanes Llaima, Lonquimay, Mocho-Choshuenco y Villarrica se ubica en la esquina superior derecha, donde las zonas de CDPs ocupan las posiciones más altas, lo cual se traduce en zonas de alto impacto y recurrencia. Por el otro lado, en los volcanes Callaqui y Tolhuaca, los elementos del gráfico se concentran en la mitad izquierda del gráfico, con valores máximos de peligro de ~60-70, lo que se interpreta como zonas de baja o mediana recurrencia y de impacto variable dependiendo del tipo de peligro, donde nuevamente las CDPs presentan un alto impacto.

### 5.3. Categorización e integración global de peligros volcánicos por lahares, lavas y CDPs

Finalmente, para realizar los mapas de peligro integrado para cada volcán se utiliza un script de “Python”, el cual determina el valor máximo de peligro, para cada punto, y a ese valor le suma los valores de los otros peligros multiplicados por un factor de 0.1. Esto se realiza debido a que en las zonas donde intervienen más de un tipo de peligro, este se debería ver aumentado, ya que ese lugar específico se ve afectado por más de un tipo de fenómeno. El valor escogido para el factor utilizado en esta operación se definió arbitrariamente, con el objetivo de que los puntajes de las zonas originales donde no hay traslape no se vea minimizado significativamente en comparación a las zonas donde ocurre traslape.

Al determinar los valores finales luego de la integración de los peligros de lavas y CDPs los puntajes calculados anteriormente para cada zona se ven incrementados en caso de que exista traslape entre las zonas de los diferentes productos volcánicos. Por ejemplo, el puntaje asociado a la zona 1 de CDPs del volcán Villarrica es de 117, y luego de correr el script se ve aumentado hasta un valor de ~170. En general, en las zonas proximales al cráter de los volcanes se observa el mayor incremento de puntaje, debido a la cantidad de productos que interactúan, al contrario de las zonas alejadas, donde el peligro está dado principalmente por los flujos laháricos.

La escala de valores de peligro determinada según la tabla de integración varía entre 0 y 126, con 0 como peligro mínimo y 126 como máximo, sumado a esto, el traslape de peligros genera valores superiores a 126, por lo que se define a este valor como el límite inferior para la zona de “muy alto peligro”. En concordancia con lo anterior, se confecciona una categorización de bajo, medio, alto y muy alto peligro, delimitada por los valores posibles de la tabla de integración:

- Bajo peligro: 0 – 40
- Medio peligro: 41 – 80
- Alto peligro: 81 – 126
- Muy alto peligro: > 126

Para representar gráficamente la información y puntajes obtenidos luego del proceso detallado anteriormente, se confeccionan curvas de peligro para cada volcán y una escala de colores normalizada en el rango de puntajes comprendidos entre 0 y 126, y fija para los valores sobre 126.

### 5.3.1. Representación gráfica de la integración y categorización de peligros

Los peligros volcánicos se comunican mundialmente utilizando mapas. Sin embargo, esto no necesariamente se traduce en una concientización efectiva acerca de los peligros o en una ayuda a la toma de decisiones de forma informada, lo cual es un factor clave en la disminución del riesgo. Estos factores dependen de como el lector interpreta y entiende el mapa de peligros (Thompson *et al.*, 2015), por lo que lograr que este sea claro y de fácil entendimiento para las autoridades encargadas de implementar los planes de evacuación es de vital importancia.

Los colores utilizados para representar los peligros tienen como objetivo proporcionar un contraste visual, unificar elementos y captar la atención (Robinson, 1967; Wolfe y Horowitz, 2004 en Thompson *et al.*, 2015). Sin embargo, los colores proveen un alto margen de confusión, ya que estos están inherentemente imbuidos de distintos significados para el lector del mapa. Gran parte de los mapas de peligros utilizan escalas de colores de tipo “semáforo” (verde-amarillo-rojo) o “frío a cálido” (azul-amarillo-rojo), los cuales pueden otorgar a simple vista una interpretación sesgada e incorrecta. Por ejemplo, el color rojo puede ser asociado con algo “caliente” o “malo” y el color verde con “vegetación” o algo “bueno”, confusión que se suma a la posibilidad de que el lector posea dificultades para percibir ciertos colores (Thompson *et al.*, 2015).

De acuerdo con las conclusiones presentadas en el trabajo de Thompson *et al.* (2015), para la representación de los mapas integrados de peligro de la presente memoria se utilizará una escala de colores secuencial de tonos amarillos a rojizos; es decir, representando los datos utilizando variaciones en la luminosidad o saturación de estos colores; para los puntajes comprendidos entre 0 y 126, mientras que para los valores superiores a 126 se utilizará un color rojo oscuro, para acentuar las zonas de máximo peligro. La escala de colores es uniforme para cada volcán, sin embargo, en la leyenda de las figuras se muestran solo los valores y colores observados en cada uno.

En los siguientes subcapítulos se muestran las curvas de peligro (Figura 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12) y mapas integrados para cada volcán (Figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18), ambos con su escala de color normalizada. En el caso de las curvas de peligro, el eje Y del gráfico representa el valor del peligro combinado, mientras que en el eje X se observa el total en porcentaje de todas las zonas, tanto traslapadas como individuales.

### 5.3.1.1. Curvas de Peligro

#### *5.3.1.1.1 Volcán Callaqui*

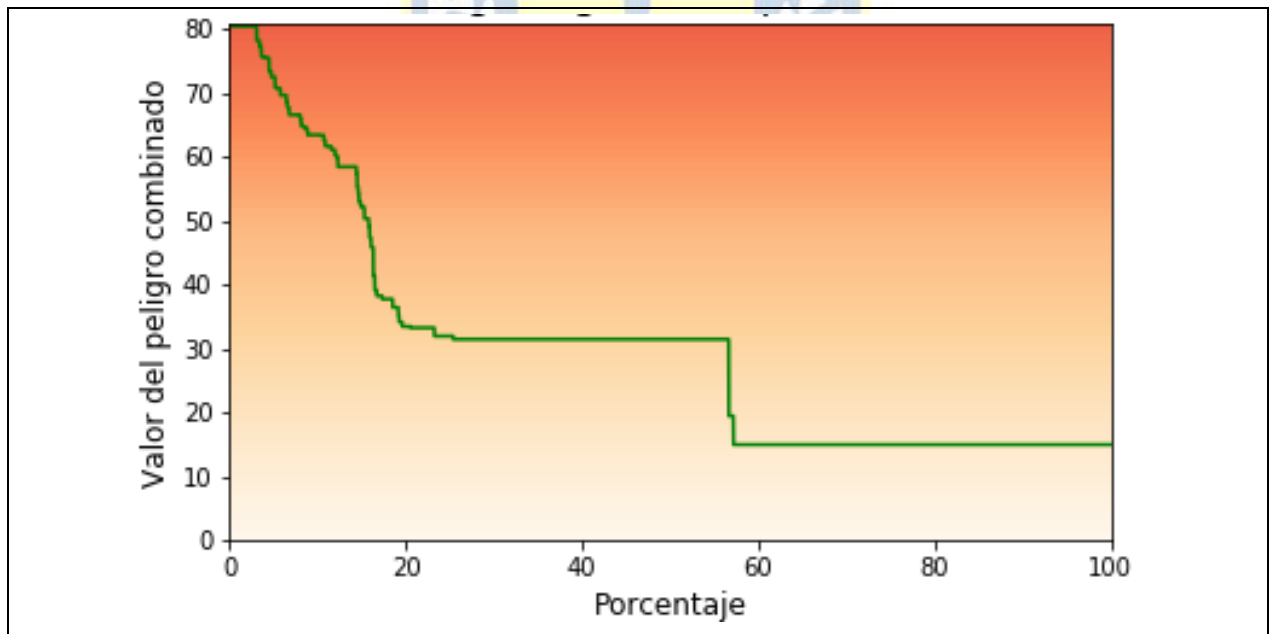


Figura 5.7 Curva de peligro para el Volcán Callaqui. Se incluyen todas las zonas originales y traslapadas aplicando el factor 0.1 para la suma.

### 5.3.1.1.2 Volcán Llaima

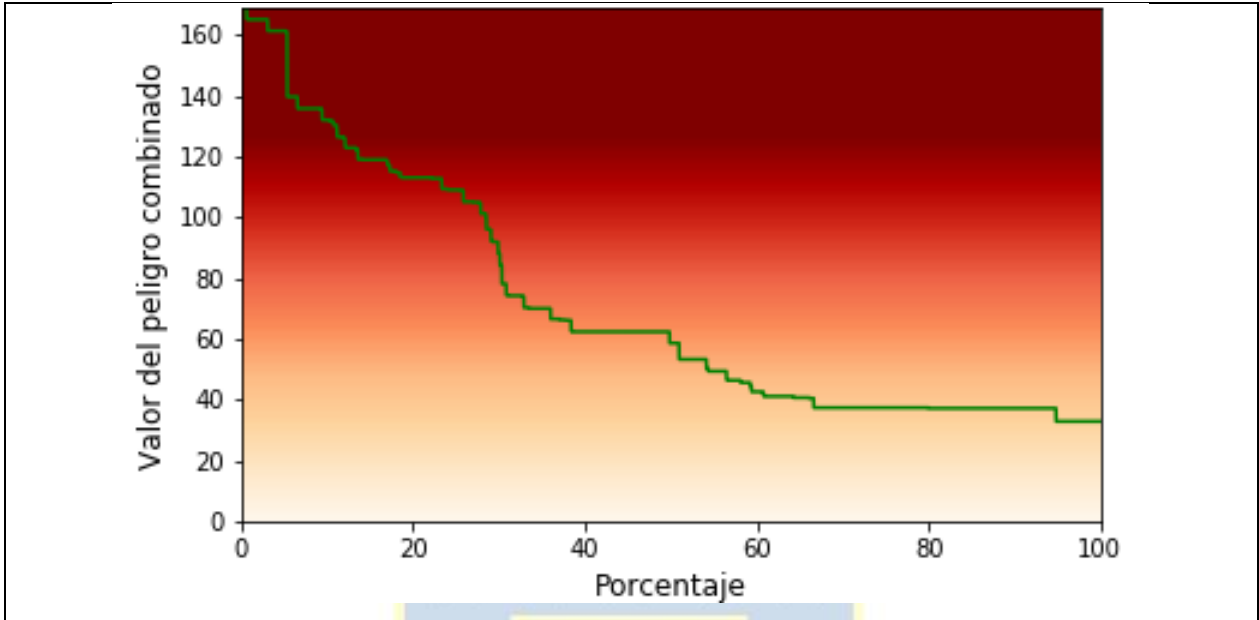


Figura 5.8 Curva de peligro para el Volcán Llaima. Se incluyen todas las zonas originales y traslapadas aplicando el factor 0.1 para la suma.

### 5.3.1.1.3 Volcán Lonquimay

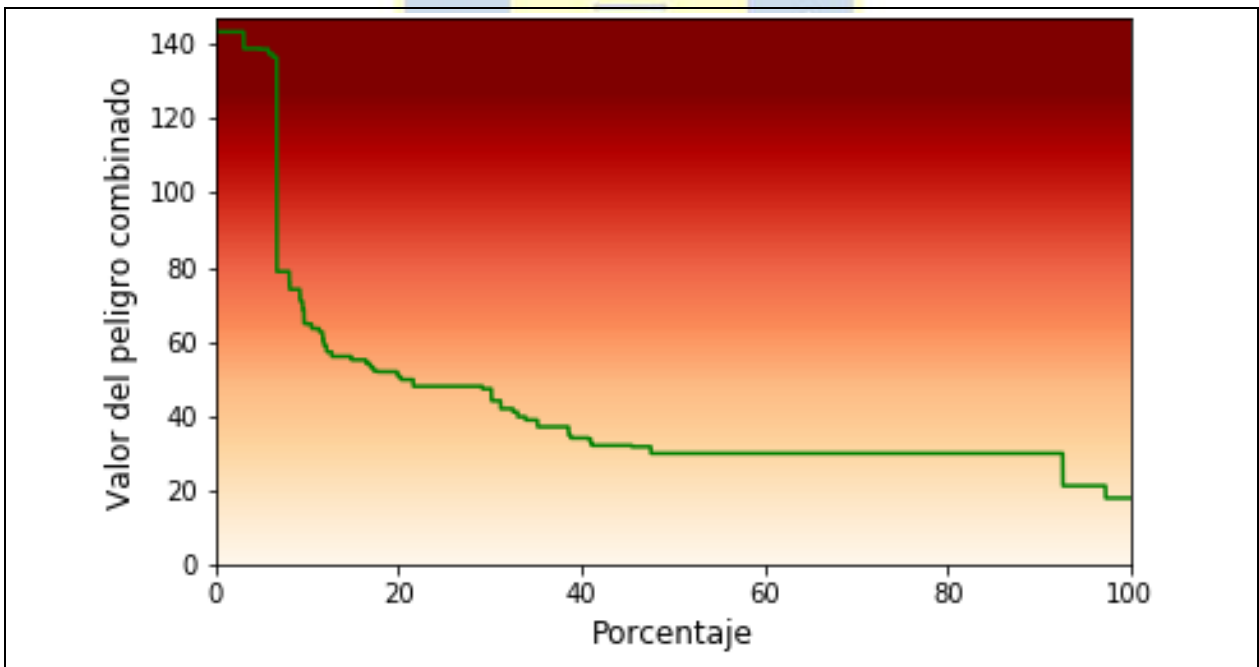


Figura 5.9 Curva de peligro para el volcán Lonquimay. Se incluyen todas las zonas originales y traslapadas aplicando el factor 0.1 para la suma.



#### 5.3.1.1.4. Volcán Mocho-Choshuenco

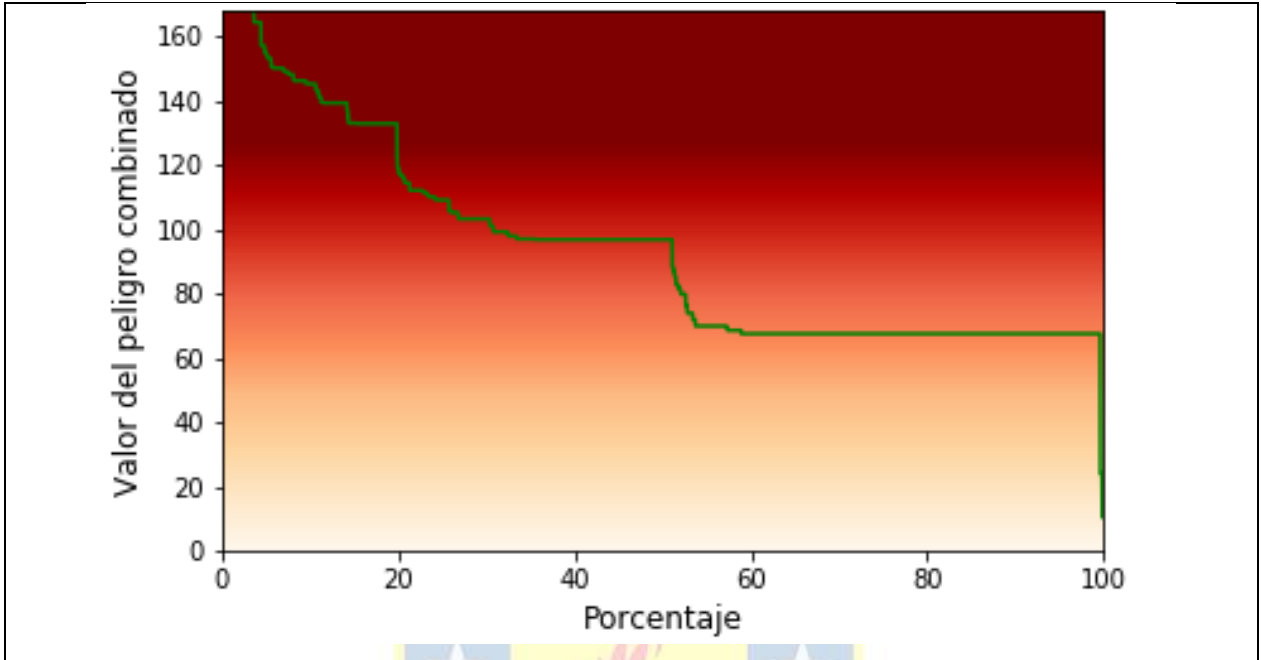


Figura 5.10 Curva de peligro para el Volcán Mocho-Choshuenco. Se incluyen todas las zonas originales y traslapadas aplicando el factor 0.1 para la suma.

#### 5.3.1.1.5. Volcán Tolhuaca

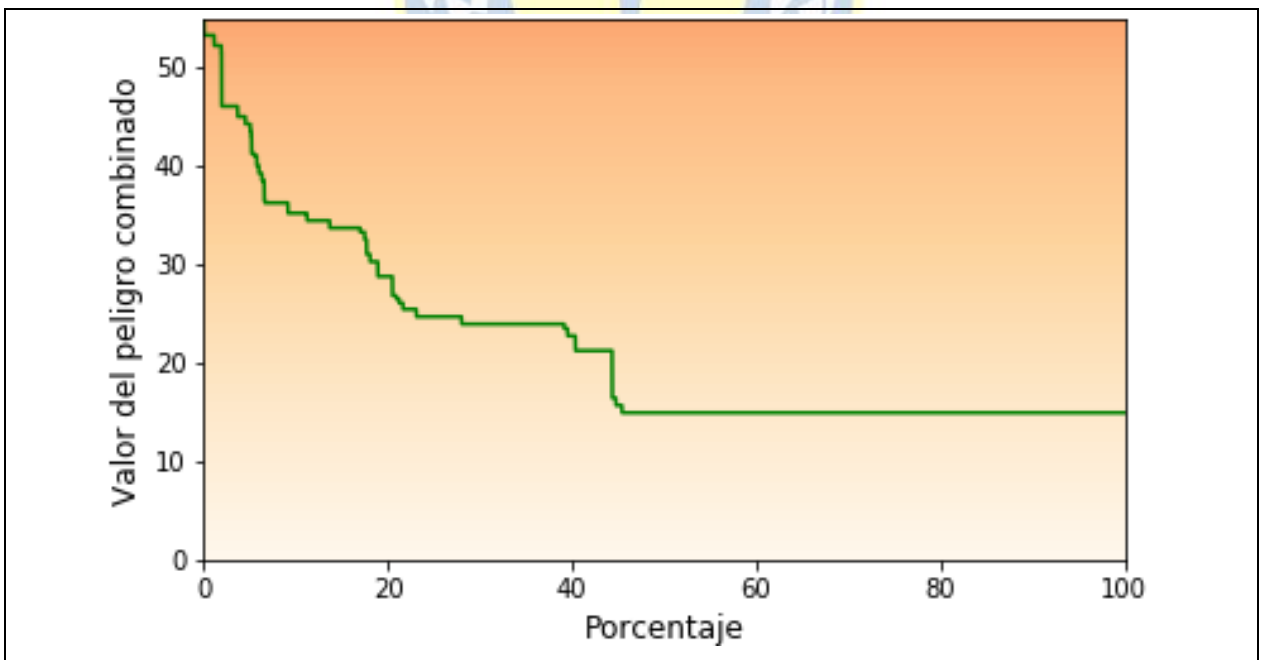


Figura 5.11 Curva de peligro para el Volcán Tolhuaca. Se incluyen todas las zonas originales y traslapadas aplicando el factor 0.1 para la suma.

### 5.3.1.1.6. Volcán Villarrica

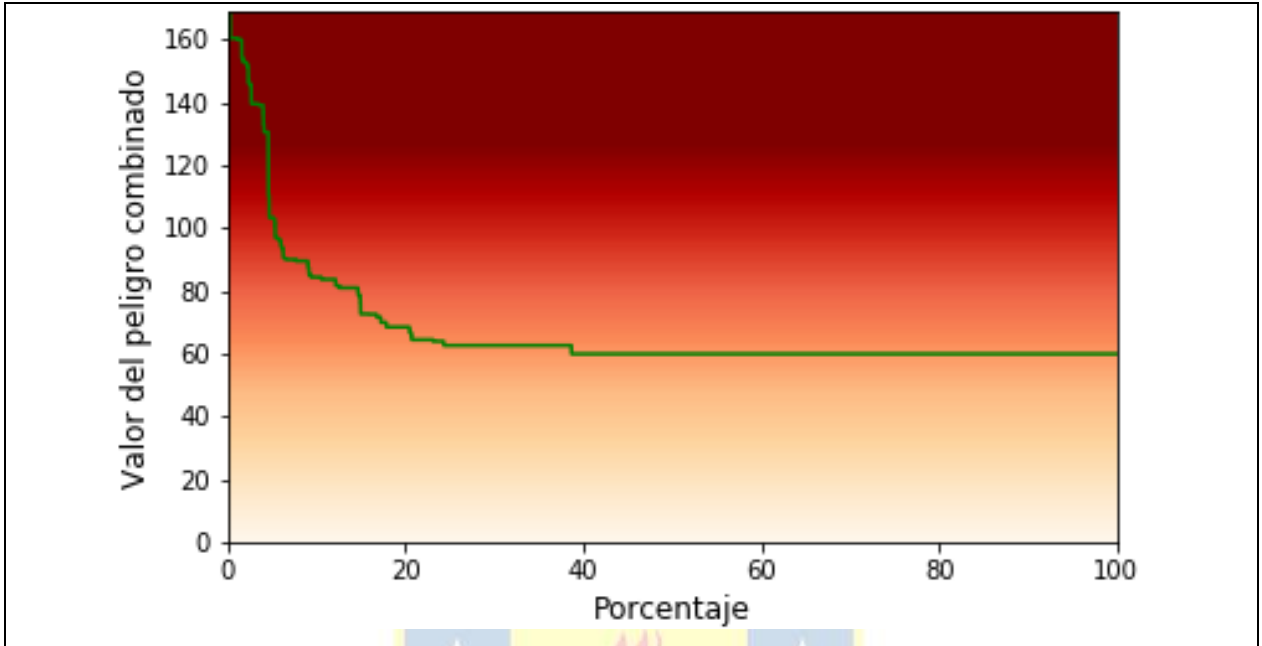


Figura 5.12 Curva de peligro para el Volcán Villarrica. Se incluyen todas las zonas originales y traslapadas aplicando el factor 0.1 para la suma.



### 5.3.1.2. Mapas Integrados de Peligro

#### 5.3.1.2.1. Volcán Callaqui

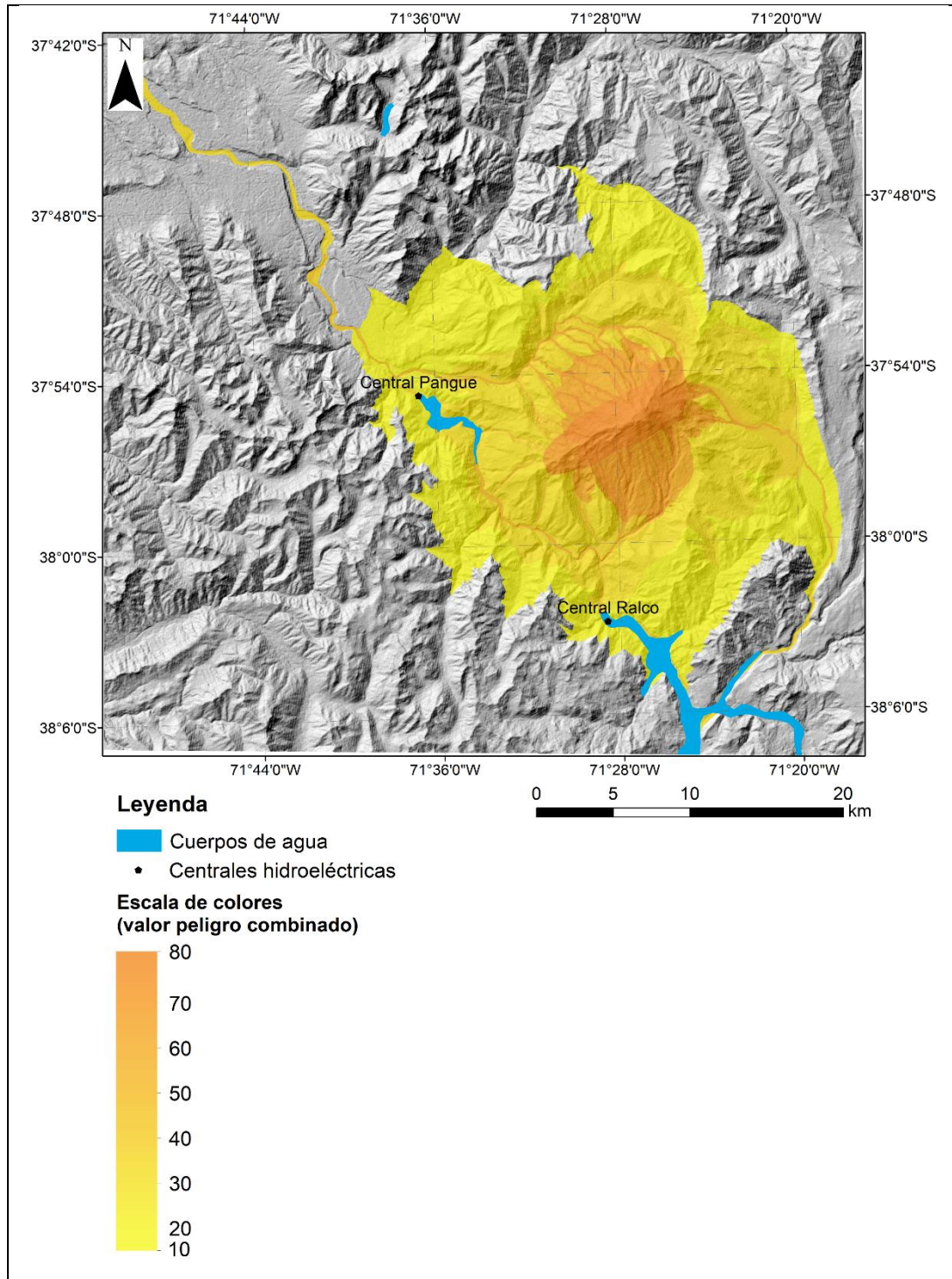


Figura 5.13 Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el Volcán Callaqui.

5.3.1.2.2. Volcán Llaima

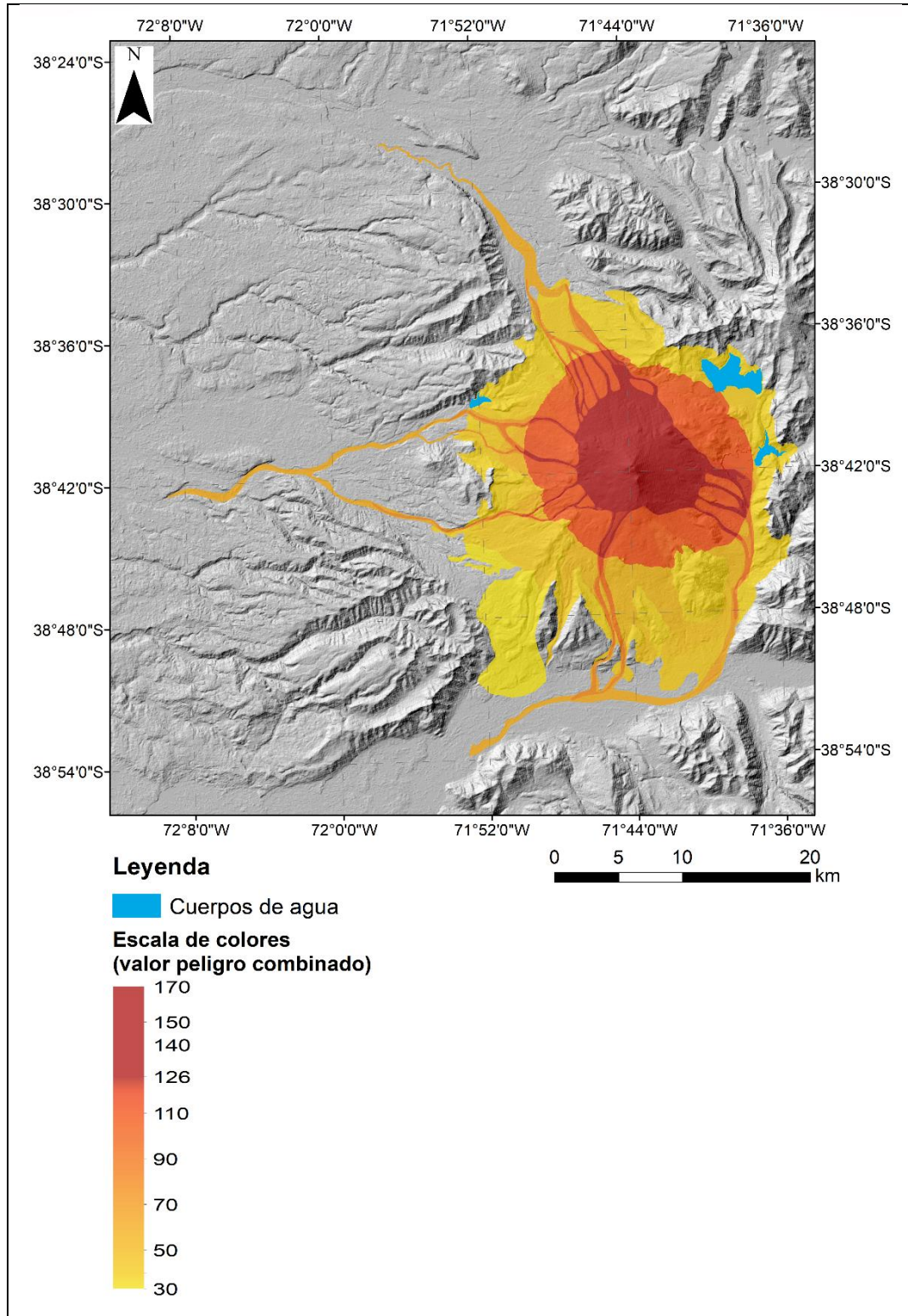


Figura 5.14 Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el Volcán Llaima.



### 5.3.1.2.3. Volcán Lonquimay

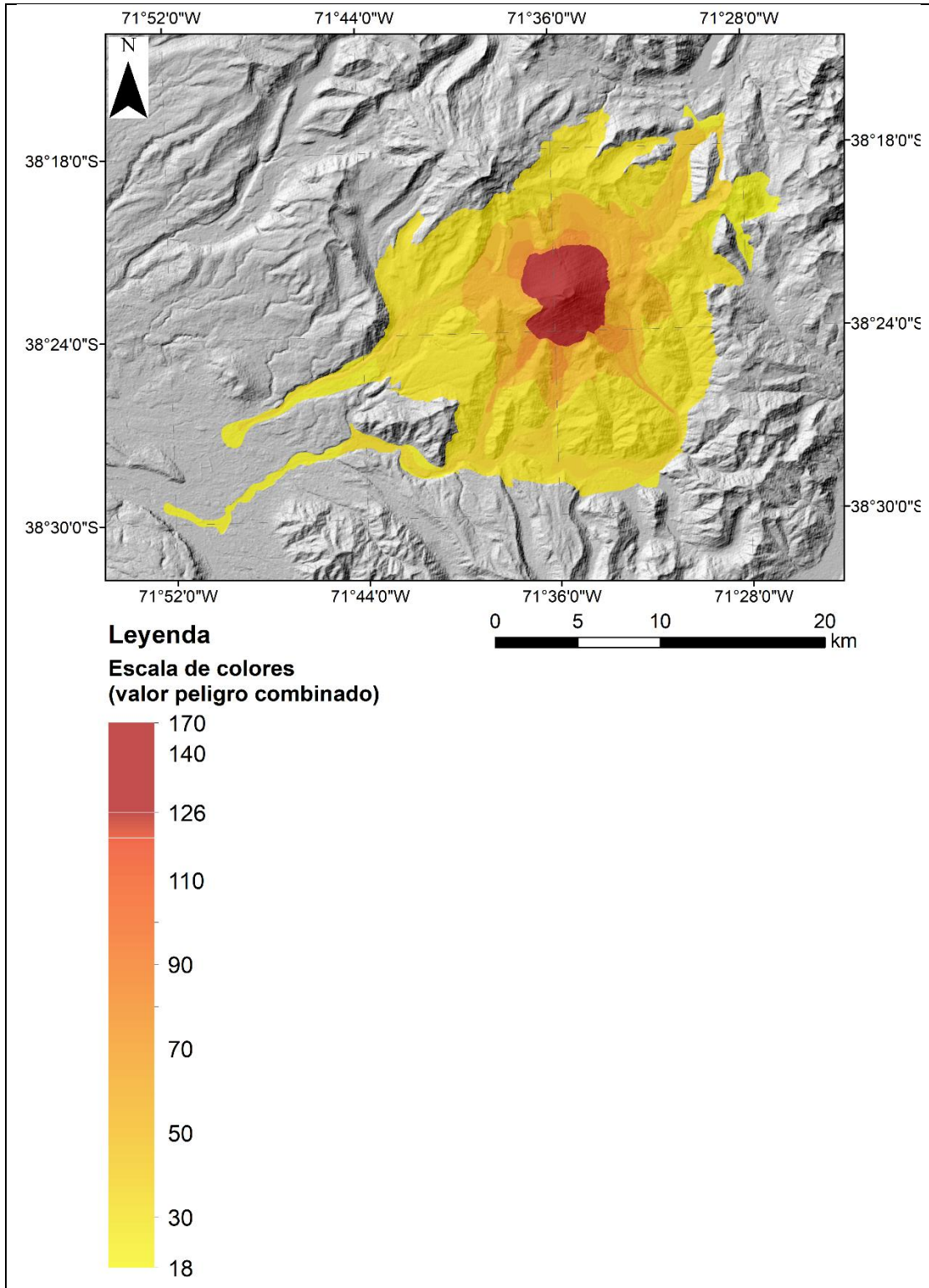


Figura 5.15 Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el Volcán Lonquimay.



#### 5.3.1.2.4. Volcán Mocho-Choshuenco

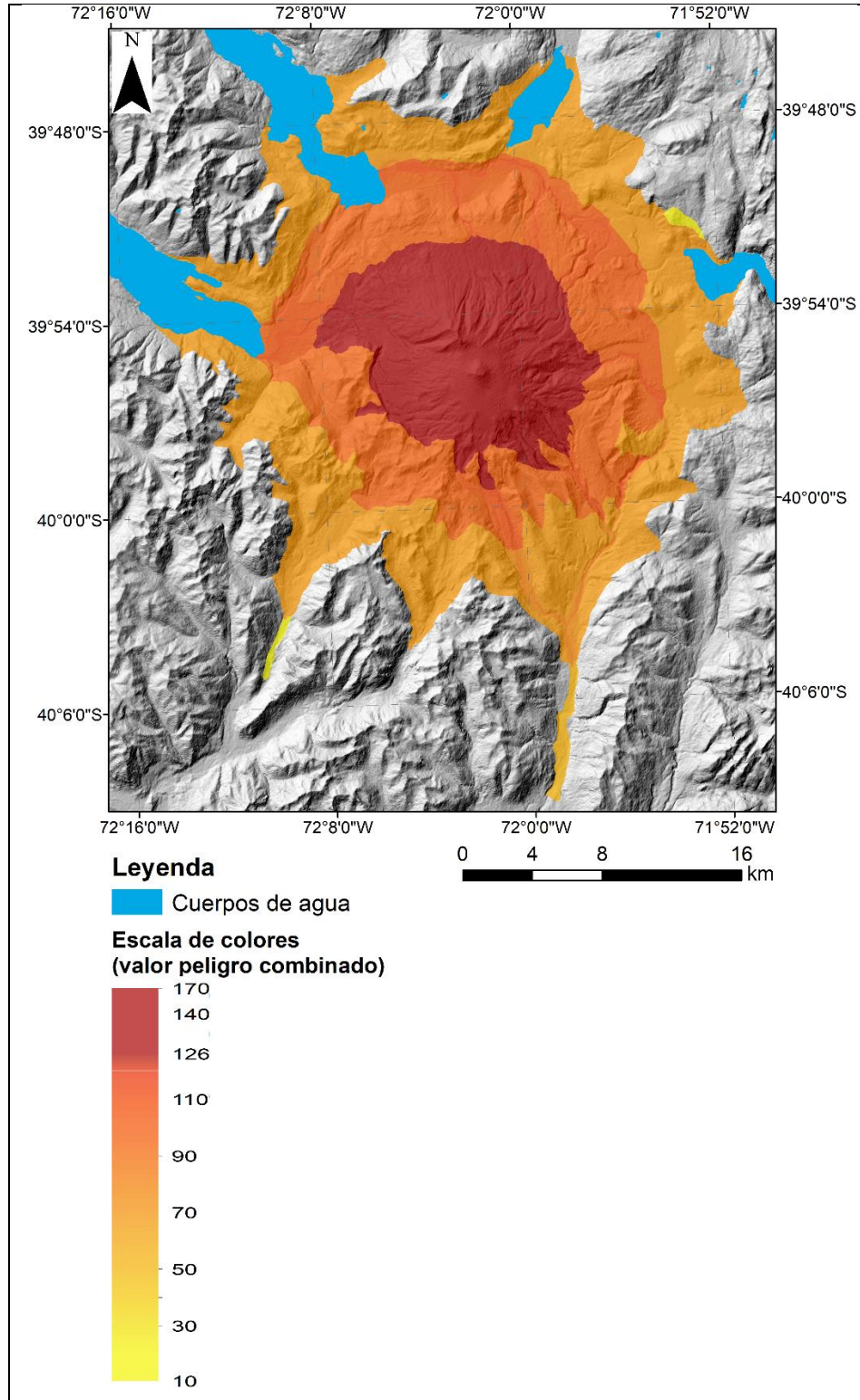


Figura 5.16 Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el Volcán Mocho-Choshuenco.

### 5.3.1.2.5. Volcán Tolhuaca

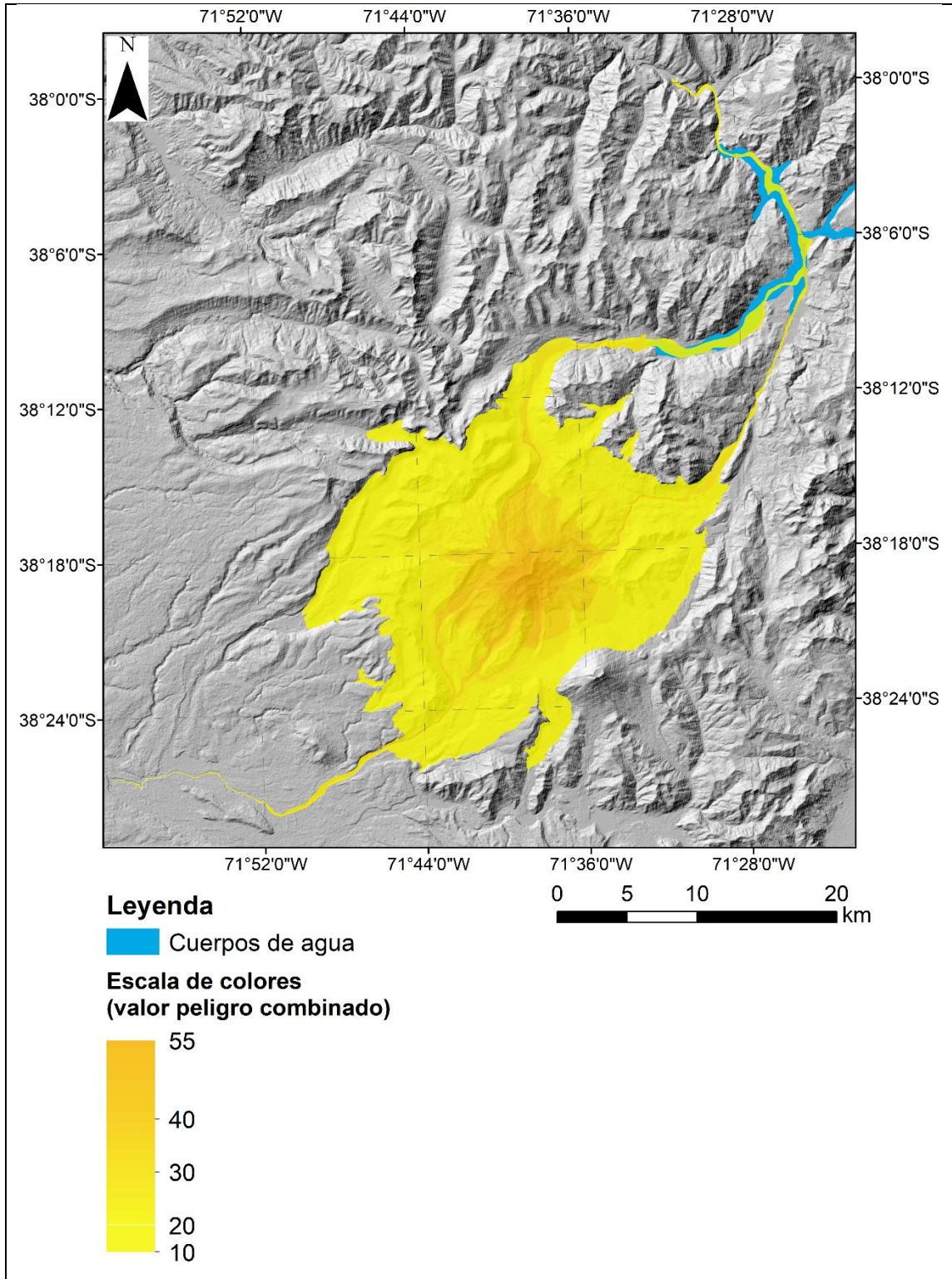


Figura 5.17 Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el Volcán Tolhuaca.

### 5.3.1.2.6. Volcán Villarrica

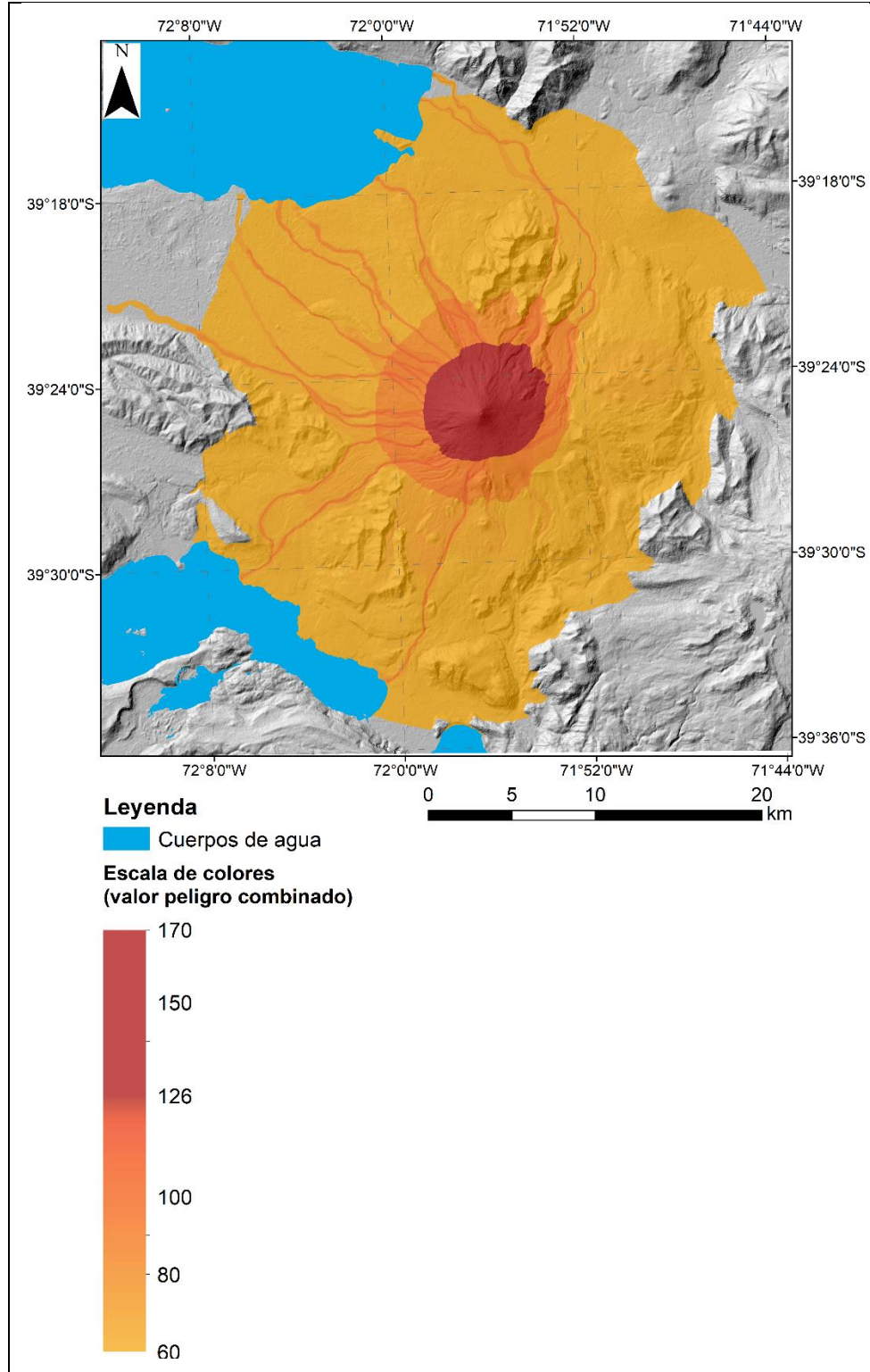


Figura 5.18 Mapa integrado de peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en el Volcán Villarrica.



### 5.3.2. Influencia de lahares en el peligro total y en el desarrollo de mapas de peligros integrados

Los flujos laháricos son uno de los fenómenos eruptivos más recurrentes en la actividad de los volcanes estudiados y de los pertenecientes a la ZVS, debido a la cubierta de hielo/nieve perenne y estacional que presentan. Además, debido a sus características físicas y de transporte (Subcapítulo 1.5.1.) alcanzan grandes distancias en cortos períodos de tiempo, pudiendo cortar vías de evacuación y sobrepasar puentes, convirtiendo a los lahares en uno de los peligros más importantes y destructivos en una erupción volcánica.

#### 5.3.2.1. Volcán Callaqui

Desde la tabla de integración de peligros para el volcán Callaqui (Tabla 5.2) se desprende que los lahares significan el mayor peligro para este macizo, siendo superados solo por la Zona 1 de CDPs. Esto se fundamenta en el hecho de que presentan una alta recurrencia en tiempos recientes y holocenos, además de su velocidad y potencial de impacto directo. Son los productos eruptivos más extensos en longitud desde el centro de emisión del volcán, encausándose por los valles de los ríos Pangue y Malla, avanzando hacia el NW por varios kilómetros, y alcanzando las represas Pangue y Ralco (Figura 4.6; Figura 5.13).

#### 5.3.2.2. Volcán Llaima

Los lahares ocupan el segundo lugar en la valorización del peligro integrado para el volcán Llaima, siendo superados levemente por la Zona 1 y 2 de CDPs (Tabla 5.3), debido a la ocurrencia de estos últimos en tiempos recientes y holocenos y su potencial de impacto directo que alcanza el valor máximo en la tabla de integración. No obstante, el peligro de lahares es significativo ya que se desplazan a mayor distancia que las lavas y CDPs y son los únicos que pueden llegar a afectar a los poblados de Curacautín y Cherquenco, mediante crecidas de ríos e inundaciones (Figura 4.10; Figura 5.14).

#### 5.3.2.3. Volcán Lonquimay

En este volcán el peligro de lahares ocupa la tercera posición en la valorización del peligro según la tabla de integración de peligros (Tabla 5.4), siendo superado por los fenómenos de coladas de lava y CDPs. Lo anterior se fundamenta en el casi nulo registro de lahares procedentes de erupciones del volcán Lonquimay, tanto en tiempos recientes como holocenos, lo cual se suma al amplio registro de coladas de lava y el desarrollo de CDPs registrados en los depósitos del volcán

(Subcapítulo 2.3.3.). Sin embargo, y al igual que en los volcanes anteriores, la gran velocidad y distancia que recorren los flujos laháricos (Figura 4.15; Figura 5.15), la cual es la más extensa de los productos que emite el volcán (exceptuando la caída de tefra), los convierten en un peligro de considerable importancia.

#### 5.3.2.4. Volcán Mocho-Choshuenco

En el volcán Mocho-Choshuenco el peligro de lahares es el segundo más significativo después de las CDPs según la valorización realizada en la tabla de integración de peligros (Tabla 5.5), lo cual se explica por la ocurrencia reciente de importantes erupciones explosivas (p. ej. 1864) con desarrollo de CDPs que han bajado por los flancos de volcán. Sin embargo, estas erupciones han sido acompañadas por flujos laháricos presentando la mayor extensión areal de todos los productos eruptivos del volcán (Figura 4.23; Figura 5.16), lo cual puede ocasionar el corte de puentes o rutas de evacuación.

#### 5.3.2.5. Volcán Tolhuaca

En el volcán Tolhuaca el peligro de lahares comparte el primer lugar junto a las CDPs, según la tabla de integración de peligro volcánico (Tabla 5.6). Sin embargo, en tiempos recientes e históricos los lahares han tenido mayor recurrencia que las CDPs, pero no poseen el potencial destructivo de estos últimos, lo cual equipara los puntajes en la asignación final de estos. Además, al igual que en todos los volcanes estudiados, el peligro de lahares es el más extenso desde el centro de emisión y es el que provee un mayor peligro para los poblados cercanos (Figura 4.27; Figura 5.17), debido al corte de las rutas de evacuación existentes.

#### 5.3.2.6. Volcán Villarrica

El peligro de lahares en el volcán Villarrica ocupa la segunda posición en la tabla de integración de peligro volcánico (Tabla 5.7), siendo superado por el peligro de CDPs debido a sus mayores valores en los ítems de alcance zonal y potencial de impacto directo. Sin embargo, la longitud que alcanzan los flujos laháricos son los más extensos (Figura 4.34; Figura 5.18) y su recurrencia en tiempo recientes es mucho mayor que las CDPs, lo cual sumado a la exposición y a la gran cantidad de personas que viven en valles utilizados por los lahares en su avance los convierten en el principal peligro para este volcán.



## 6. DISCUSIÓN

### 6.1. Elección de la constante en la ecuación del área transversal

Para evaluar el área transversal de inundación (y sus límites laterales) Iverson *et al.*, (1998) consideran a los lahares que avanzan aguas abajo como una onda en evolución de masa y densidad constante, y definen la ecuación del área transversal como (1)  $A = C \cdot V^{2/3}$ , donde A es el área inundada, C la constante de la ecuación y V el volumen de entrada del lahar. El valor de C es determinado mediante un análisis de datos de lahares conocidos de Estados Unidos y Canadá, además de datos de flujos de detritos no volcánicos experimentales, cuyo valor corresponde a 0.05, por lo que la ecuación (1) se define finalmente como  $A = 0.05 \cdot V^{2/3}$ . Sin embargo, Castruccio y Clavero (2015) plantea que esta constante no es apropiada para lahares generados en la Zona Volcánica Sur, por lo que utiliza datos de lahares generados en los volcanes Villarrica y Calbuco, sumado a los volcanes norteamericanos, para recalibrar la constante al valor de 0.02. Siguiendo la misma lógica anterior, Flores (2014) realiza el mismo procedimiento enfocándose en los lahares generados en el volcán Villarrica, obteniendo una constante de 0.013 para la ecuación. La constante elegida para este estudio fue de 0.02 (Castruccio y Clavero, 2015), ya que es la que mejor se adapta a los volcanes de la ZVS y no está enfocada en sólo un volcán, lo cual sumado a que uno de los objetivos planteados es comparar el peligro y la metodología utilizada entre volcanes es más útil utilizar la misma constante y la misma metodología para todos estos. Cabe destacar, que esta modificación a la constante significa una variación en los límites laterales de los lahares modelados por LaharZ, lo que trae consigo un aumento en la extensión final de los flujos. Además, dado que el volumen a modelar se mantiene constante, un cambio en la longitud de los flujos necesariamente trae consigo el cambio del ancho de estos, por lo que a menor valor de la constante de la sección transversal en LaharZ más angosto será el flujo modelado y viceversa. Por ejemplo, un lahar modelado con una constante de 0.02 será más angosto y extenso que uno modelado con una constante de 0.05.

Para comparar los resultados con diferentes índices se toma como referencia el volcán Villarrica, ya que es el que presenta mayor cantidad de estudios donde se ha modificado la constante de LaharZ para modelar posibles flujos laháricos con estos tres valores de constantes mencionadas anteriormente: 0.05 (Figura 6.6), 0.02 (Figura 6.7) y 0.013 (Figura 6.8). Desde las figuras se puede

observar gráficamente las diferencias en la utilización de distintos índices, principalmente en la parte oeste de volcán, en el valle del río Chaillupén, y hacia el noreste, en el valle donde confluyen los ríos Turbio y Pedregoso. En el caso de la comparación entre las constantes de 0.05 y 0.02, las extensiones varían hasta 6 km en el lado oeste del volcán, y casi 2 km hacia el sector noreste, lo cual es considerable para los planes de emergencia. Al comparar los resultados de la modelación con las constantes 0.02 y 0.013, se observa que la variación de la extensión en el sector oeste se aproxima a los 3 km, mientras que en la zona cercana a pucón no se observa una diferencia considerable de extensión en los flujos.

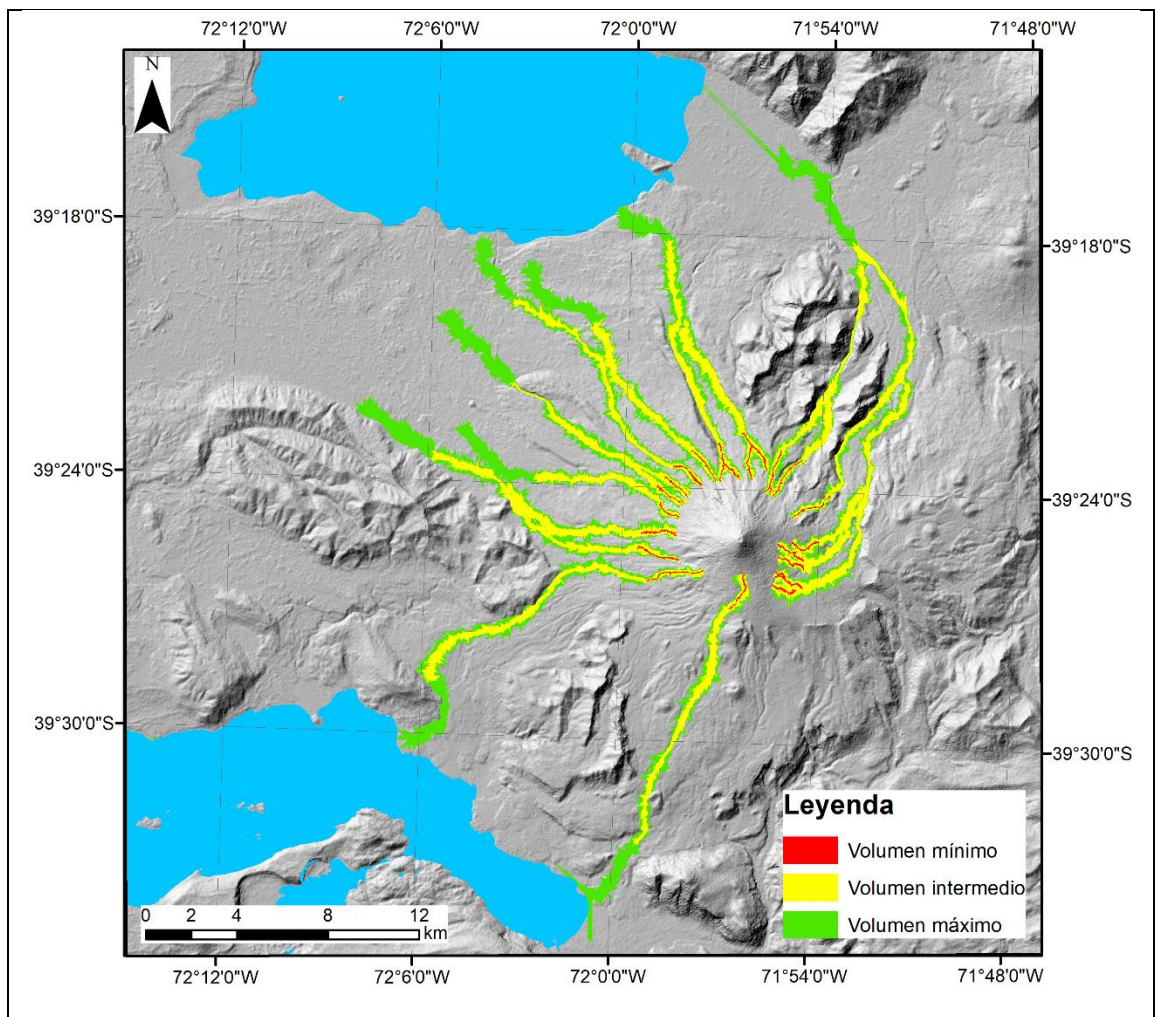


Figura 6.1 Resultados de la modelación de lahares para el volcán Villarrica con una constante en la ecuación del área transversal de 0.05.

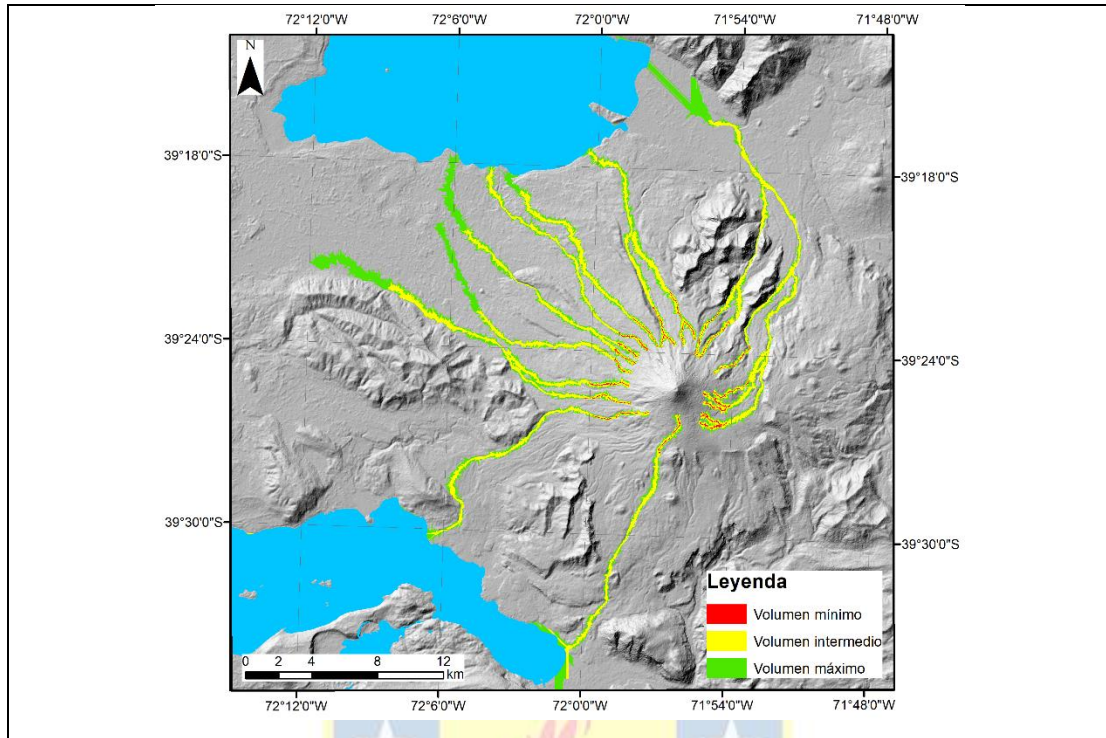


Figura 6.2 Modelación de lahares para el volcán Villarrica con una constante en la ecuación del área transversal de 0.02.

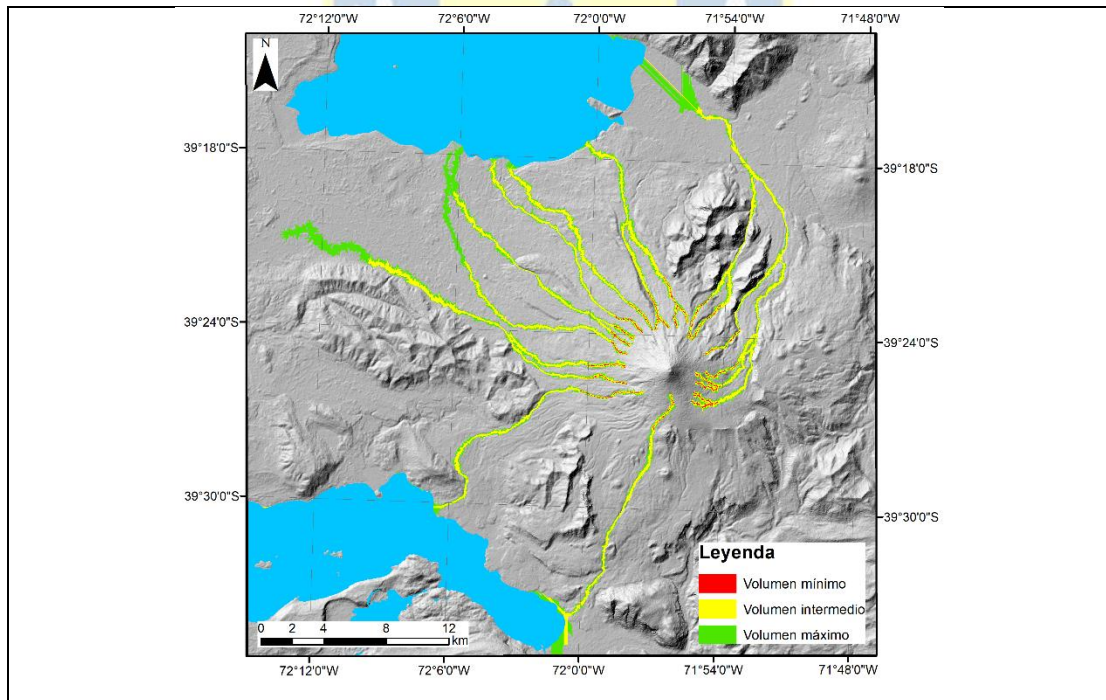


Figura 6.3 Modelación de lahares para el volcán Villarrica con una constante en la ecuación del área transversal de 0.013.



Finalmente, debido a que no todos los volcanes de la ZVS tienen un comportamiento similar ya que son sistemas magmáticos independientes, se hace necesario agruparlos por sus similitudes y calcular un valor de la constante de la ecuación de la sección transversal para cada grupo de volcanes, con la finalidad de ajustar el modelo cada vez más a la realidad a futuro y que los resultados de estos tengan mayor congruencia con el comportamiento de los volcanes, siempre con el objetivo final de contribuir a la correcta planificación territorial y planes de evacuación en los centros urbanos aledaños a los volcanes.

## 6.2. Limitaciones del software LaharZ

Las ecuaciones que gobiernan la modelación en LaharZ generaliza el comportamiento de los flujos laháricos, significando la primera limitación del modelo y otorgando un error intrínseco a este, debido a que en la realidad las características y movilidad de los lahares varían dependiendo de la cantidad de agua o detritos disponibles, en su transformación aguas abajo y en diversos factores que LaharZ no incorpora en sus cálculos.

Una segunda fuente de error también asociada a las ecuaciones se debe a la forma en que estas fueron determinadas: mediante regresiones que tienen coeficientes de determinación asociados, para el caso de la ecuación de la sección transversal versus volumen de  $r^2 = 0.850$  con una desviación estándar de la regresión de 0.351. Mientras que para la ecuación de la sección planimétrica se tiene un  $r^2$  de 0.909 con una desviación estándar de la regresión de 0.273. Además, tal como se menciona en el subcapítulo 1.6.2., los rangos de variación del área transversal y planimétrica con un intervalo de confianza del 95% pueden variar hasta en un orden de magnitud o más al ingresar ciertos volúmenes.

Otra limitación del modelo es el DEM a utilizar, donde se ha comprobado que, dependiendo de la resolución de este, LaharZ entrega resultados muy diferentes (Hubbard *et al.*, 2007; Muñoz-Salinas *et al.*, 2009). Por ejemplo, una baja resolución puede resultar en una incorrecta generación de la red de drenaje, lo cual genera serias consecuencias al determinar por donde los flujos se van a desplazar en la topografía, y que pueblos y ciudades puedan ser afectados por estos (Hubbard *et al.*, 2009). Es por esto que Schilling (1998) estima que DEMs cuya resolución esté en el rango de 1 – 30 m son apropiados para el modelo.

Por otra parte, LaharZ asume que el volumen total se mantiene constante a lo largo de su recorrido, lo que genera que todas las secciones transversales se llenan usando el mismo valor A (ver sección 3.2.) y es una razón por la que aparecen bordes rugosos en los resultados del programa (Muñoz-Salinas *et al.*, 2009).

Por otro lado, determinar el volumen que tendrá un lahar futuro es tremendamente incierto y difícil, ya que no se pueden predecir las características de una erupción futura, como su tipo, magnitud, lugar de emisión, entre muchos otros factores, por lo que existe un error inherente a cualquier tipo de modelación de flujos laháricos causada por este desconocimiento e imposibilidad de predecir el comportamiento de los volcanes. Sin embargo, al dilucidar posibles escenarios que abarcan gran parte de los comportamientos que podría tener un volcán y calcular distintos volúmenes en base a estos, se puede solucionar en parte esta incertidumbre y zonificar el peligro considerando múltiples factores, como se ha realizado en este trabajo. Además, tal como se explica en las secciones que muestran la zonificación de peligro en cada volcán, se hace énfasis en que la modelación no puede utilizarse por si sola, sino que se debe contrastar con la geología, los depósitos existentes, la interpretación de la topografía del lugar, entre otros, y el resultado final debe ser definido tomando en cuenta estos factores.

### 6.3 Variación estacional de los flujos laháricos e incorporación de nieve al modelo

Como se ha mencionado a lo largo de todo este trabajo, el volumen de agua disponible en el volcán es el principal factor que determina la magnitud de un lahar y su extensión. Para este estudio se consideró a los glaciares como fuente de agua a fundir, y se calcularon los volúmenes de lahares en base a estos. Sin embargo, un factor importante a considerar es que gran parte del año, en los meses de invierno y primavera, principalmente, los volcanes se cubren casi en su totalidad por una capa de nieve, lo que agrega un volumen considerable de agua disponible a ser liberada por la interacción entre los productos eruptivos y la nieve.

La no incorporación de nieve se justifica en el alcance de la presente memoria de título y en la cantidad de trabajo que su adición contemplaría, ya que el nivel de detalle requerido para este análisis significa una gran cantidad de trabajo que se escapa de la carga que debería tener una memoria de título.



La omisión del agua que aporta la fusión de la nieve puede significar que los resultados entregados estén subestimados, y que los volúmenes de los lahares sean mayores, por lo cual se propone que para estudios posteriores se incluyan estos cálculos y se mejore el nivel de detalle de la modelación para cada uno de los volcanes, para así obtener resultados más aplicables en la realidad y de mejor calidad.

Para estimar el impacto que la adición de volumen de agua significaría a los resultados finales se estiman los volúmenes de nieve de cada volcán según el área que esta cubre en el período con mayor cantidad de nieve (delimitada por imágenes satelitales) y un espesor promedio de 3 m estimado en base a Araneda y Avendaño (2013). Los resultados de esta estimación se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Volumen de nieve en los volcanes estudiados.

Volcán	Área de nieve (m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Callaqui	5,93x10 <sup>7</sup>	3	1,78x10 <sup>8</sup>
Llaima	1,56x10 <sup>8</sup>	3	4,69x10 <sup>8</sup>
Lonquimay	5,25x10 <sup>7</sup>	3	1,57x10 <sup>8</sup>
Mocho – Choshuenco	3,90x10 <sup>7</sup>	3	1,17x10 <sup>8</sup>
Tolhuaca	2,90x10 <sup>7</sup>	3	8,62x10 <sup>7</sup>
Villarrica	1,10x10 <sup>8</sup>	3	3,30x10 <sup>8</sup>

Para agregar el volumen de agua por fusión de nieve se consideran 3 escenarios: la fusión completa de todo el volumen, la fusión del 50% y la fusión del 33%, para abarcar los peores escenarios posibles (Tabla 6.2).

Tabla 6.2 Volúmenes de nieve a añadir a un lahar según escenarios definidos

Volcán	100% Fusión	50% Fusión	33% Fusión
Callaqui	1,78x10 <sup>8</sup>	8,90x10 <sup>7</sup>	5,93x10 <sup>7</sup>
Llaima	4,69x10 <sup>8</sup>	2,34x10 <sup>8</sup>	1,56x10 <sup>8</sup>
Lonquimay	1,57x10 <sup>8</sup>	7,87x10 <sup>7</sup>	5,25x10 <sup>7</sup>
Mocho – Choshuenco	1,17x10 <sup>8</sup>	5,85x10 <sup>7</sup>	3,90x10 <sup>7</sup>
Tolhuaca	8,62x10 <sup>7</sup>	4,31x10 <sup>7</sup>	2,87x10 <sup>7</sup>
Villarrica	3,30x10 <sup>8</sup>	1,65x10 <sup>8</sup>	1,10x10 <sup>8</sup>

De esta forma, se observa que al añadir el agua disponible por nieve los volúmenes de agua disponible iniciales varían entre 12% y 793% (Tabla 6.3), dependiendo del volcán y su volumen glaciar. Esto da luces de que en ciertos volcanes el considerar el volumen de nieve al calcular el volumen de un lahar significaría una gran diferencia en el volumen resultante, principalmente en los volcanes Lonquimay y Llaima.

Tabla 6.3 Comparación entre el volumen de los glaciares y de la nieve en los volcanes estudiados

Volcán	Volumen Máximo Glaciar	Volumen Máximo Nieve	Aumento de Volumen de Agua disponible (%)
Callaqui	$1,59 \times 10^8$	$1,78 \times 10^8$	112
Llaima	$1,65 \times 10^8$	$4,69 \times 10^8$	284
Lonquimay	$1,98 \times 10^7$	$1,57 \times 10^8$	793
Mocho – Choshuenco	$1,01 \times 10^9$	$1,17 \times 10^8$	12
Tolhuaca	$5,41 \times 10^7$	$8,62 \times 10^7$	159
Villarrica	$8,94 \times 10^8$	$3,30 \times 10^8$	37

De acuerdo con lo expuesto se reitera la necesidad de aumentar el nivel de detalle en el análisis de peligro, y principalmente en el cálculo de los volúmenes de agua disponibles de cada volcán, con el objetivo de afinar los modelos y resultados que estos entregan para generar mejores mapas de peligro volcánico.

#### 6.4. Comparación con otros mapas de peligro, el caso del Volcán Villarrica

Debido a la actividad eruptiva reciente del volcán Villarrica, cuyo último evento ocurrió en marzo de 2015, y la cercanía que este posee con centros poblados de importancia, se han realizado un gran número de trabajos que buscan entender y modelar los peligros que afectan a este volcán y su comportamiento. En el caso de los flujos laháricos, las memorias de título de Bono (2014) y Flores (2014) realizan un análisis cuantitativo y modelación de estos flujos con respecto a la ciudad de Pucón, ubicada al W del macizo. Por otro lado, el mapa de peligros de SERNAGEOMIN (Moreno, 2000) también modela y representa las zonas de peligro en el volcán. La existencia de un buen número de trabajos, cuyas metodologías incluyen la modelación mediante LaharZ, RAMMS y observaciones geológicas, permiten comparar sus resultados con los obtenidos en la presente memoria, y de esta forma aportar a conocer de mejor forma el comportamiento de los lahares

generados en el Villarrica, para así generar mejores planes de evacuación y minimizar lo máximo posible el riesgo para los habitantes de las localidades cercanas.

Bono (2014) utiliza LaharZ y emplea una constante en la ecuación de la sección transversal de 0.02, al igual que en este trabajo, y volúmenes de  $10 \times 10^6$ ,  $20 \times 10^6$  y  $40 \times 10^6$ , obteniendo los resultados expuestos en la Figura 6.4., donde, realizando la comparación con los resultados obtenidos en este trabajo, se observa que, en el caso de los flujos laháricos que llegan hasta la zona de Pucón, coinciden en su origen y desplazamiento por los valles del Turbio, Zanjón Seco y Pedregoso, para luego, en el caso de Bono (2014) ramificarse por distintos valles, e incluso alcanzar la zona urbana de Pucón. Lo anterior se puede explicar por una diferencia metodológica en el análisis, ya que Bono (2014) modeló distintos pulsos de lahares (4 en total) que bajaban por un mismo valle, modificando la topografía del DEM al agregar los depósitos de cada pulso individual, lo cual se traduce en el “llenado” de los valles preferenciales por los cuales bajan los lahares, causando un represamiento que afecta los pulsos posteriores, produciendo así la ramificación. Este comportamiento no se observa en la historia eruptiva del volcán ni en el comportamiento de lahares recientes en este (Subcapítulo 2.6.4; Vera, 2019), donde las erupciones que han producido lahares han presentado solo una etapa energética paroxismal capaz de generar lahares de consideración, los cuáles han bajado por los valles ya mencionados y descargado su material al lago Villarrica, sin depositar la totalidad de estos en su trayecto. Además, en caso de que un mismo ciclo eruptivo generara dos o más lahares de importancia, estos son de corta duración (p. ej. 1971, 1984-1985, 2015), por lo que los depósitos laháricos no alcanzarían a consolidarse en los valles, siendo removilizados por los posteriores flujos sin causar el represamiento propuesto por Bono (2014). Además de lo anterior, el análisis de los perfiles transversales de los valles (subcapítulo 4.6.3.1.) donde se podría generar un rebalsamiento y el cambio de cauce preferencial de los flujos laháricos sugiere que, al menos en el valle del Zanjón Seco y según los escenarios definidos en este trabajo, los lahares no remontarían las barreras topográficas y no cambiarían su curso, avanzando y descargando el material hasta el lago Villarrica.

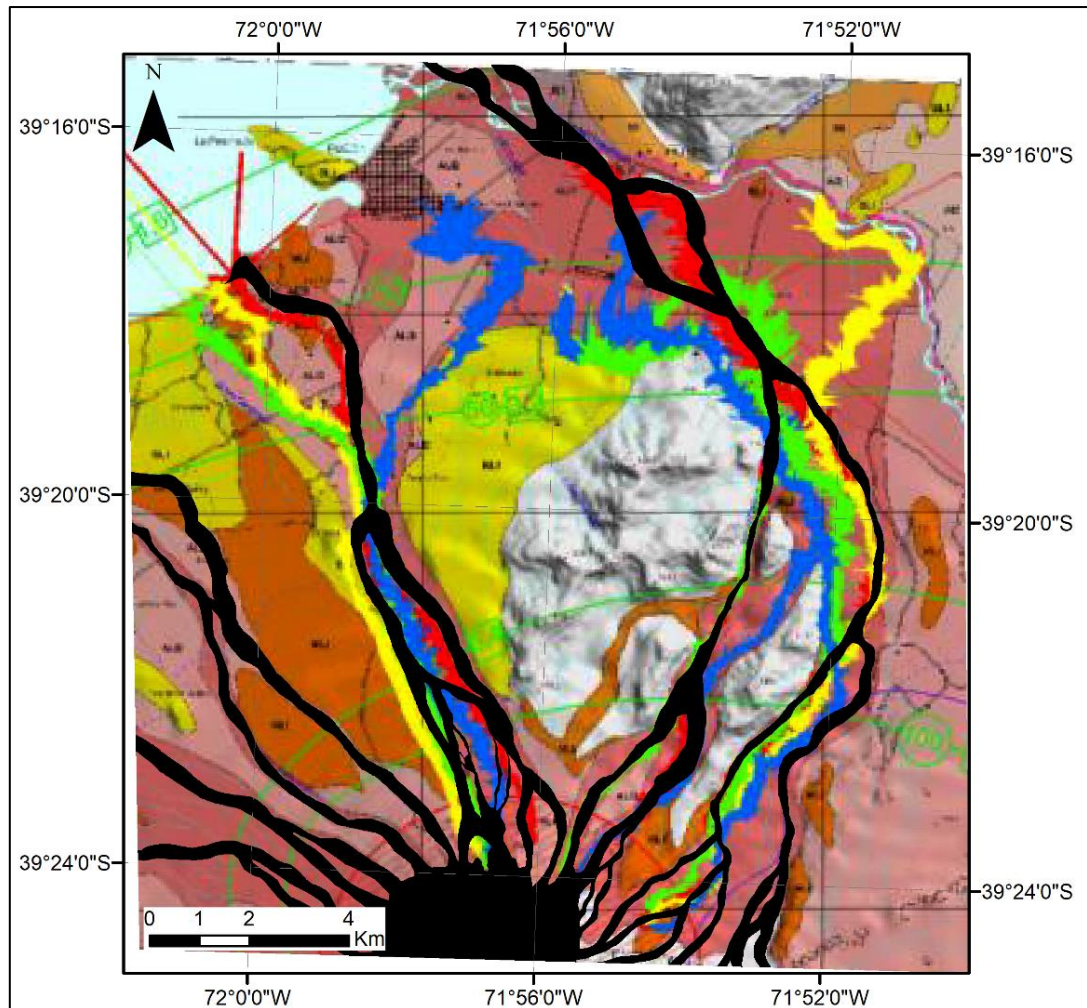


Figura 6.4 Comparación de los resultados obtenidos en este estudio, en color negro, con la memoria de título de Bono (2014), en color amarillo, azul, rojo y verde.

Flores (2014) realiza un análisis cuantitativo del riesgo de inundación por lahares para la ciudad de Pucón bajo distintos escenarios eruptivos ( $IEV = 1 - \geq 4$ ), mediante el uso de LaharZ y una interpretación geológica del lugar. La constante en la ecuación de la sección transversal empleada es de 0.013, en contraste con la constante de 0.02 empleada en este trabajo, mientras que los volúmenes de los lahares modelados varían entre  $1,36 \times 10^7 \text{ m}^3$  y  $1,8 \times 10^9 \text{ m}^3$ . Los resultados de su trabajo indican que las zonas de mayor peligro corresponden al sector de El Turbio, El Cerdúo, Quelhue, Aeropuerto, Zanjón Seco, El Volcán, Candelaria, Quebrada Los Calabozos, y gran parte del sector céntrico del área urbana de Pucón, y al compararlos con los resultados de la presente memoria (Figura 6.5) se observa que, si bien los orígenes de estos flujos coinciden, al avanzar hacia Pucón hay diferencias importantes, ya que en el caso del modelamiento de Flores (2014), estos se



ramifican y avanzan hacia el sector urbano de Pucón, llegando a inundar gran parte de la ciudad. Estas diferencias se pueden originar en el hecho de que Flores (2014) define puntos de inicio de flujos laháricos en cauces secundarios a lo largo de los valles, generando así ramificaciones que el modelo no entrega si se consideran como puntos de inicios de los flujos sólo las partes altas de los valles, lo cual puede observarse en la Figura 6.6. Esta suposición no es correcta, ya que no toma en consideración las grandes barreras topográficas que los flujos laháricos deberían sobrepasar para avanzar hacia la ciudad de Pucón, y obliga al programa a arrojar flujos en esa dirección. Además, zonas de muy alto peligro y de escenarios eruptivos muy probables en el volcán (Flores, 2014) no fueron afectadas en los recientes lahares de consideración que ha tenido el macizo (p. ej. 1971, 1984-1985 y 2015), por lo que la interpretación que se hace del comportamiento de los lahares en este volcán sería incorrecta.

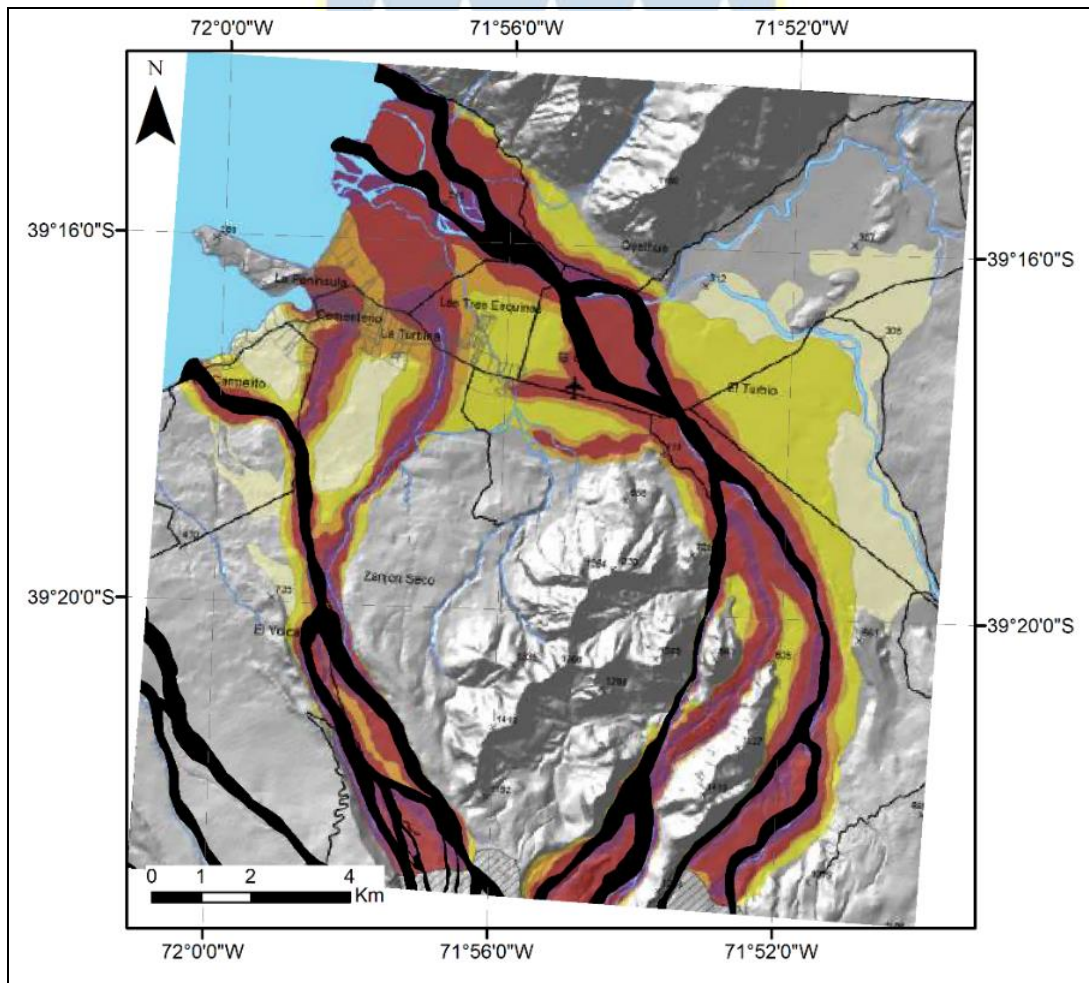


Figura 6.5

Comparación de los resultados obtenidos en este estudio, en color negro, con la memoria de título de Flores (2014), en colores amarillos y rojizos.



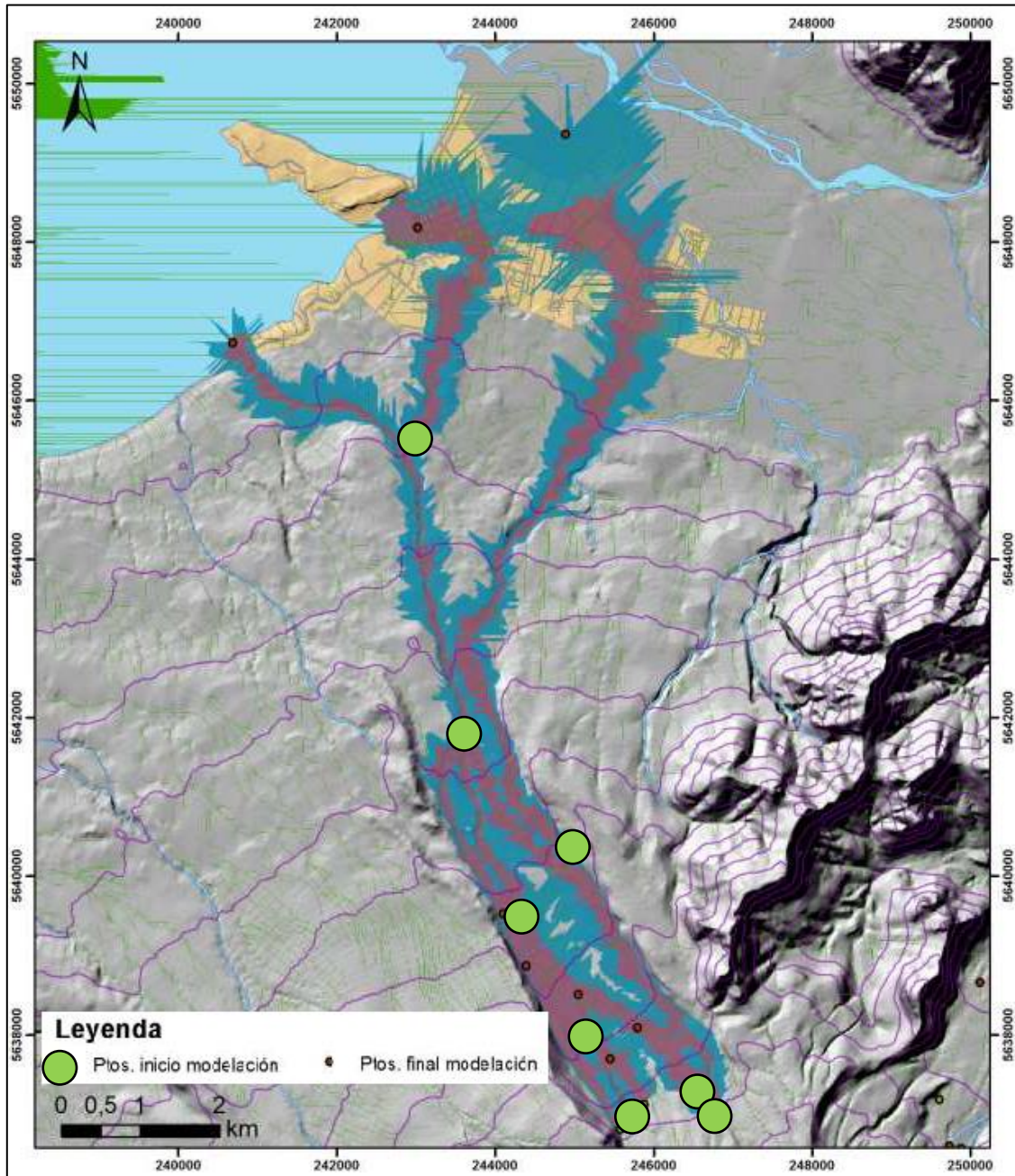


Figura 6.6 Modelación de lahares con respecto a la ciudad de Pucón, los puntos verdes representan los puntos de inicio de los flujos. Extraído y modificado de Flores (2014).

El “Mapa de Peligros del Volcán Villarrica” (Moreno, 2000) engloba los peligros de coladas de lava, lahares, caída de piroclastos y flujos piroclásticos en un mismo mapa, el cual no indica la metodología utilizada para la determinación de las zonas de peligro representadas en él. En el caso del peligro de lahares, Moreno (2000) indica que las corrientes laháricas descenderían por los

mismos cauces de las lavas, aunque precediéndolas en el tiempo y que los principales cauces de descarga serían los valles de los ríos Turbio-Pedregoso, Zanjón Seco-Carmelito, Correntoso, Molco-Huichatío, Voipir, Chaillupén y Seco-Llancahue. Además indica que el escenario para una eventual generación de lahares varía en función de la época del año y el espesor de la cubierta temporal de nieve.

Al igual que los trabajos de Bono (2014) y Flores (2014), el trabajo de Moreno (2000) incluye parte de la zona urbana de Pucón en la zona de mayor peligro de ser afectada por lahares durante erupciones originadas en el cono y/o cráter principal, tales como las registradas durante los siglos XIX y XX, e incluye la totalidad de Pucón en la zona de alto peligro de ser afectada por lahares durante erupciones originadas en el cono y/o cráter principal, como las ocurridas en la prehistoria reciente (< 3.700 AP) y durante los siglos XVI, XVII y XVIII. Lo anterior no concuerda con los resultados obtenidos en el presente trabajo (Figura 6.7), y al no existir una metodología definida no es posible analizarla y compararla con la utilizada en este estudio. Sin embargo, gran parte de las zonas categorizadas en muy alto y alto peligro de ser afectadas por lahares no han sufrido este fenómeno en las recientes erupciones del volcán, donde los lahares se limitan a avanzar por los cauces principales desembocando al lago Villarrica (en el caso del flanco norte del volcán), sin remontar barreras topográficas y rebalsar hacia otros cauces con dirección a zonas más pobladas, y han sido definidas en base a los depósitos históricos definidos en el mapa geológico del volcán y no necesariamente representan una zona de peligro, dada la topografía actual que este posee. El presente trabajo utiliza modelos de elevación digital recientes y evalúa el comportamiento de posibles flujos con distintos volúmenes en los valles aledaños al volcán, además de analizar la posibilidad de desbordamiento de estos en puntos críticos (subcapítulo 4.6.3.1.). Por todo lo anterior, se interpreta que el mapa de peligros del volcán Villarrica está desactualizado y no incorpora técnicas de análisis numérico, por lo que las zonas definidas en el no representan a cabalidad lo que podría ocurrir en una erupción actual, a diferencia de lo expuesto en este trabajo.



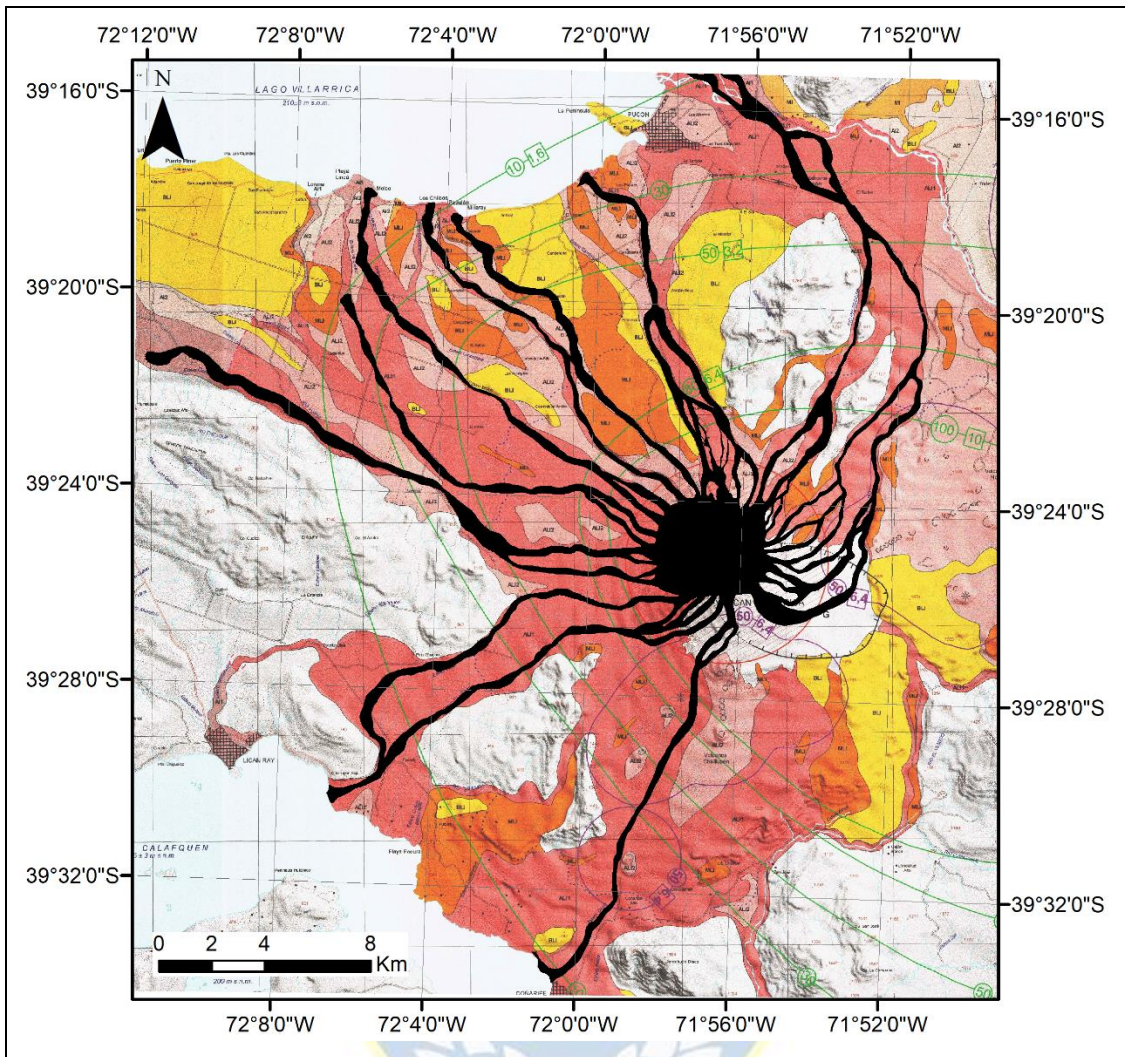


Figura 6.7 Comparación de los resultados obtenidos en este estudio, en color negro, con el mapa de peligros de Sernageomin, en colores amarillos y rojizos

Finalmente, un estudio realizado para el Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2015) desarrolla una modelación numérica del peligro de flujos laháricos utilizando el software FLO-2D PRO, debido a que “LaharZ” no representa divisiones en sus flujos, al contrario de lo que ocurre con FLO-2D PRO (MOP, 2015). Este software considera un volumen de lahar constante a lo largo de todo su camino, pudiendo sobreestimar las áreas de inundación, debido a que durante toda la modelación el flujo mantiene su volumen, lo cual se contrasta con lo que ocurre en la realidad, donde los cambios de pendiente a lo largo de un cauce provocan que los sedimentos más grandes queden en el camino, modificando la cantidad de material que transporta un flujo. Además, la definición de los parámetros de entrada que utiliza la modelación con este software requiere estudios en terreno detallados y análisis de laboratorios (Canuti, 2002). Los resultados se enfocan en el escenario de

una erupción estromboliana a hawaiana, y muestran que el área urbana de Pucón quedaría totalmente cubierta por lahares que desciendan del Zanjón Seco y Turbio-Pedregoso, con alturas de inundación sobre los 10 m incluso en la zona urbana de Pucón. Los volúmenes utilizados fueron definidos según los lahares generados en la erupción de 1971 y recalculados considerando una adición de detritos de 20% - 66%. Lo anterior difiere de los resultados obtenidos en el presente trabajo (Figura 6.8), categorizando zonas con una alta probabilidad de inundación, aun cuando no han sido afectadas en recientes erupciones (p. ej. 1971, 1984-1985 y 2015). Esto se puede explicar en el hecho que los volúmenes utilizados para la modelación, por ejemplo, en Zanjón Seco son alrededor de 3 veces mayores que los volúmenes calculados en la presente memoria ( $8.5 \times 10^6$  vs  $28 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) y, además, no se especifica la metodología o cálculos realizados para llegar a estos valores, lo que dificulta la comparación entre los resultados del trabajo del MOP (2015) con los entregados en este estudio. Se considera que los volúmenes definidos son sobreestimados y exagerados considerando, además, que el volumen del Zanjón Seco mencionado anteriormente corresponde al escenario más probable según los escenarios que define el trabajo de MOP (2015), con un tiempo de recurrencia de 5 – 10 años y una erupción de tipo hawaiana – estromboliana.

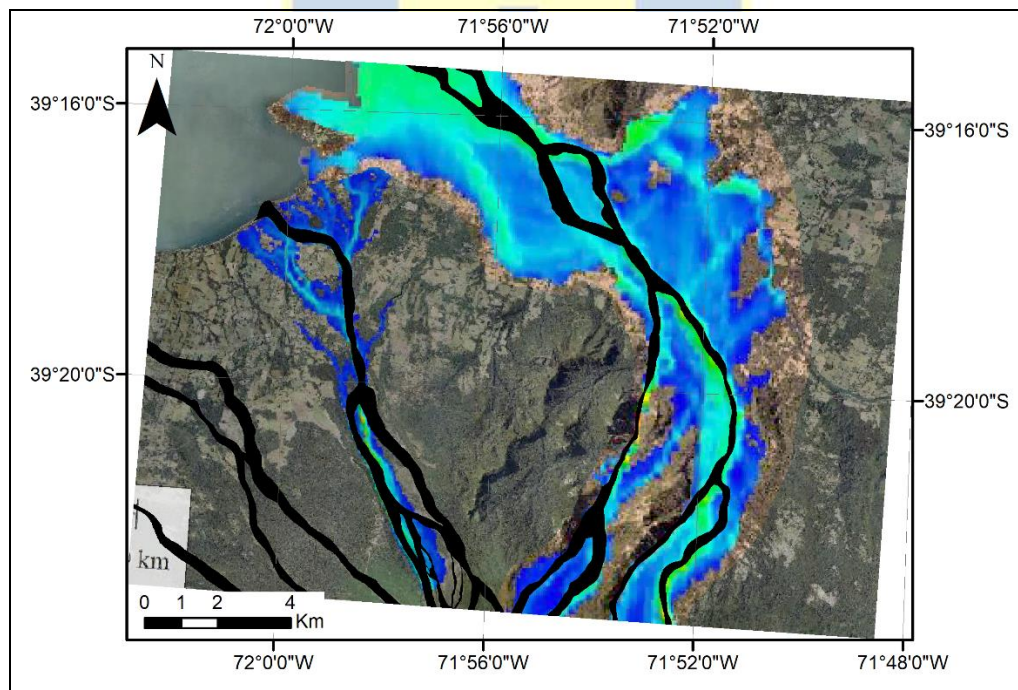


Figura 6.8 Comparación de los resultados obtenidos en este estudio, en color negro, con el estudio del Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas (2015), en colores verdes y azules.

En definitiva, existen diversos estudios que analizan y mapean el peligro volcánico asociado a este volcán, debido a su constante actividad y su cercanía con centros poblados que tienen una gran población flotante en la temporada estival, debido a su atractivo turístico. En general, estos estudios sobreestiman los volúmenes posibles de los flujos laháricos que puede producir el volcán Villarrica o definen comportamientos que no han sido observados en este, como es el caso de Bono (2014). Es por lo anterior que se vuelve una necesidad fundamental hacer una correcta evaluación y categorización del peligro que ayude a desarrollar programas de planificación territorial efectivos, a limitar la expansión inmobiliaria incesante que ha construido hoteles, condominios y centros turísticos prácticamente en todos los valles por donde bajan los lahares y a desarrollar planes de evacuación acordes a la realidad del volcán y de la comunidad. Dadas las limitaciones y errores asociados a este trabajo, y que se exponen en el subcapítulo 6.2, los resultados que aquí se entregan no terminan con la problemática planteada, pero entrega herramientas metodológicas y resultados actualizados que pueden complementarse con mayores estudios, la aplicación de otras técnicas o programas de modelación y la mejora de la estimación de los volúmenes de agua disponible en los volcanes, considerando por ejemplo, la nieve presente en ciertas estaciones, los caudales de los ríos aledaños, entre otros.

## 6.5. Comparación de los peligros entre volcanes estudiados

### 6.5.1. Definición de escenarios eruptivos y uso de volcanes análogos

Para realizar el análisis se definen escenarios eruptivos para cada volcán, con el objetivo de considerar cualquier tipo de erupción que se pueda producir en el volcán estudiado como gatillante de flujos laháricos. Para esto se analiza la historia eruptiva reciente, los depósitos antiguos generados por el volcán y comportamientos de otros volcanes con características similares. La relevancia de la definición de los escenarios eruptivos en la modelación numérica tiene que ver con los volúmenes de lahares que se generarán, ya que distintos tipos de erupción con diferentes niveles de energía producirán más o menos fusión en la capa de hielo/nieve, significando variaciones en la cantidad inicial de agua disponible que bajará agua abajo como lahar.

La definición de los escenarios se facilita en los casos de volcanes con alta actividad eruptiva y estudios sobre estos, como es el caso de los volcanes Llaima y Villarrica, los cuales poseen un registro eruptivo histórico bastante completo y una recurrencia eruptiva de 5.6 y 6.4 años, respectivamente (Dzierma y Wehrmann, 2010). Por otro lado, volcanes como el Callaqui y



Tolhuaca poseen un registro eruptivo pobre, donde el primero registra a lo menos cuatro eventos entre los años 1937 y 1980, mientras que la última actividad conocida para el Tolhuaca ocurrió hace 6,590 años. Por lo anterior, en estos casos se recurre a la comparación de este tipo de volcanes con otros análogos que poseen mayor actividad e información, para de esta forma tener una idea de cómo podría comportarse el volcán en una futura erupción. Es en este punto donde se agrega una nueva fuente de error, ya que difícilmente dos volcanes distintos generen erupciones y estilos eruptivos idénticos, por diferencias en el régimen tectónico que gobierna su comportamiento, en la composición, altura, morfología, entre otros. Por lo anterior, se hace necesario un análisis exhaustivo de los posibles volcanes análogos, donde el primer filtro para seleccionarlos es la composición, el IEV y la cantidad de agua disponible que posean.



## 7. CONCLUSIONES

El análisis del peligro volcánico objetivo a través de una metodología novedosa que permite la valorización del peligro y su comparación entre volcanes viene a cubrir una necesidad generada por la problemática de comprender de mejor forma el comportamiento de los volcanes de Chile y ser un aporte en el desarrollo de programas de planificación territorial y de emergencias. La evaluación del peligro debe ser objetiva, de fácil comprensión y de rápida interpretación para ser utilizada en la elaboración e implementación de planes de emergencia, vías de evacuación y determinación de zonas de seguridad.

Las zonas de inundación para lahares se determinaron con la simulación realizada con LaharZ (Capítulo 4), el análisis geológico de los volcanes y sus depósitos, y la observación in situ de los valles de los volcanes Llaima, Lonquimay y Tolhuaca, por donde estos flujos avanzarían. Los resultados de este análisis son expuestos en mapas zonificados de peligro por flujos laháricos, donde cada zona delimitada comprende un determinado escenario eruptivo y sus consecuentes volúmenes generados. Los volcanes Llaima, Lonquimay, Tolhuaca y Villarrica pueden afectar de forma directa o indirecta a zonas pobladas con una densidad demográfica importante, como son Cherquenco, Melipeuco, Curacautín, Pucón, Villarrica, Coñaripe, entre otros. Lo anterior es de vital importancia en la generación de planes de emergencia y manejo del riesgo en estas comunas, donde el factor volcánico debe ser incorporado con la mayor seriedad, responsabilidad e información posible.

### 7.1. Determinación de escenarios eruptivos

Se definen tres escenarios eruptivos para cada volcán que puedan generar flujos laháricos, los cuales dependen de la magnitud y explosividad de las erupciones (IEV) observadas en sus registros eruptivos y geológicos. Cada uno de estos escenarios busca anticiparse y considerar todos los tipos de erupciones posibles de un determinado volcán en los cuales se generen lahares, para así estimar de forma correcta los volúmenes y simular el comportamiento de estos flujos. La información detallada de cada escenario eruptivo se encuentra en el Capítulo 4.

## 7.2. Cálculo de volúmenes de lahares

Mediante la caracterización de los productos eruptivos (lavas y CDPs) y sus dimensiones para cada escenario de los volcanes estudiados, sumado a la presencia de glaciares, su distribución, área y volumen, se calcula la cantidad de agua que las lavas y CDPs son capaces de aportar por la fusión rápida del hielo, y que es el puntapié inicial de la generación de flujos laháricos y el factor principal que determina el volumen y alcance que estos flujos tendrán. La información detallada del cálculo para cada volcán está en el Capítulo 4.

## 7.3. Modelación numérica con LaharZ

LaharZ es una herramienta útil para realizar análisis de peligros donde no se cuenta con tanta información volcanológica y en zonas de difícil acceso. Sin embargo, sus resultados no representan fielmente el comportamiento de un lahar, debido a los supuestos y limitaciones que este programa posee (Subcapítulo 6.3.), por lo que contrastar los resultados del modelo con la geología, topografía e información histórica del comportamiento y características de lahares pasados es crucial para generar mapas acordes a la realidad.

## 7.4. Ocurrencia de desbordes en puentes

La velocidad de generación y avance de los lahares es uno de los principales problemas, ya que en cuestión de pocos minutos estos pueden descender y afectar lugares poblados. Al bajar por valles o cauces de ríos y drenajes ya constituidos, es común que en su camino se encuentren con puentes, que le permiten a la población cruzar estas zonas deprimidas. Dependiendo del volumen que un lahar posea y la morfología de los valles, los puentes se pueden ver sobrepasados por los flujos, dañándolos o destruyéndolos y cortando vías de evacuación. El análisis del desborde de puentes indica que en los tres volcanes donde se realizó este análisis, los volúmenes mínimos calculados casi no afectan estas estructuras, con daño en un número muy bajo de puentes (1 – 2), mientras que volúmenes intermedios sobrepasan alrededor del 50% de estos. Finalmente, los volúmenes máximos calculados sobrepasan la gran mayoría de los puentes existentes en los valles preferenciales por donde pasan los lahares (~ 90%), por lo que en estas erupciones la evacuación de los poblados cercanos se dificulta enormemente.

## 7.5. Integración y comparación del peligro volcánico

La integración semi - cuantitativa realizada con los peligros de lahares, flujos de lava y CDPs en función de su recurrencia, alcance y el potencial de impacto directo, permiten asignarle de forma objetiva una puntuación a cada zona delimitada y graficarla en una matriz de peligros, lo cual permite realizar una superposición de los puntajes, una categorización de los peligros y mapas integrados de estos (Subcapítulo 5.3.). Los puntajes obtenidos a través de la matriz de integración varían entre 0 y 126, por lo que los resultados se representan a través de una escala normalizada de colores entre estos valores, y para aquellos que exceden el valor máximo se define un color estándar.

En la mayoría de los volcanes, los valores de más alto peligro lo poseen las zonas de CDPs y lahares, categorizándose como zonas de alto peligro en los volcanes Llaima, Lonquimay, Mocho – Choshuenco y Villarrica, los cuales poseen zonas que superan el valor de 126, correspondiente al máximo peligro obtenido en la matriz de integración. Por otra parte, los volcanes Callaqui y Tolhuaca son los que presentan los menores puntajes, con ~80 y ~55 como valores máximos, respectivamente.

El método de integración propuesto resultó ser una herramienta útil, rápida y fácil de implementar al comparar los distintos peligros dentro de un volcán y entre distintos volcanes, para así evaluar de forma objetiva el peligro que cada uno de estos pueda suponer en un área determinada. Este se podría ver complementado con la integración de nuevos fenómenos (balísticos, caída de tefra, etc.) y la incorporación de estudios probabilísticos de peligros que reduzcan la incertidumbre y limitaciones de los métodos empleados para delimitar y caracterizar las distintas zonas de peligro propuestas.



## 8. REFERENCIAS

- Araneda, M., Avendaño, M. 2013. Evaluación del riesgo volcánico ante una posible erupción del Volcán Callaqui, Chile. En Revista Geofísica (Número 64). Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Arguden, A. T.; Rodolfo, K. S. 1990. Sedimentologic and dynamic differences between hot and cold laharic debris flows of Mayon Volcano, Philippines. *Geological Society of America Bulletin*, 102(7), 865-876.
- Bertin, D. 2010. El Complejo Volcánico Lonquimay y la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui: Estudio Estructural, Morfométrico y Gravimétrico. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile.
- Bertin, D., Amigo, Á., Bertin, L. 2015. Erupción del volcán Villarrica 2015: Productos emitidos y volumen involucrado. In XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena, Chile.
- Bono, L. 2014. Modelación de los lahares del Volcán Villarrica en el sector de Pucón, Región de la Araucanía. Memoria de Título, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Canuti, P., Casagli, N., Catani, F., & Falorni, G. 2002. Modeling of the Guagua Pichincha volcano (Ecuador) lahars. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(36), 1587-1599.
- Castruccio, A., Clavero, J. 2015. Lahar simulation at active volcanoes of the Southern Andes: implications for hazard assessment. *Natural Hazards*, 77(2), 693-716.
- Clavero, J. 1996. Ignimbritas andesítico-basálticas postglaciales del Volcán Villarrica, Andes del Sur (39 25'S) (Doctoral dissertation, Tesis de Magíster (Unpublished), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 112 p).
- Clavero, J., Moreno, H. 1994. Ignimbritas Licán y Pucón: Evidencias de erupciones explosivas andesítico-basálticas postglaciales del Volcán Villarrica, Andes del Sur, 39 25'S. In Congreso Geológico Chileno (Vol. 7, pp. 250-254).
- Clavero, J., Moreno, H. 2004. Evolution of Villarrica volcano. *Villarrica Volcano (39.5 S), Southern Andes, Chile* (Lara, L, 17-27).

Contreras, M. 2013. Dinámica de flujos de lava históricos de los volcanes Lonquimay y Villarrica, Andes del Sur, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Crandell, D. 1971. Postglacial lahars from Mount Rainier volcano, Washington (No. 677). US Govt. Print. Off.

D'ercole, R. 1989. La catástrofe del Nevado del Ruiz, ¿Una enseñanza para el Ecuador? El caso del Cotopaxi. Estudios de Geografía, 2, 5-32.

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.

EULA-Chile, Centro de Ciencias Ambientales. 2017. Estudio de Riesgos Volcán Mocho-Choshuenco. Informe Final, Etapa N° 2. Universidad de Concepción (inédito): 111 pp. Concepción.

EULA-Chile, Centro de Ciencias Ambientales. 2018. Estudio de Identificación de Riesgos en la Comuna de Curacautín. Informes de avance, Etapa N° 2. Universidad de Concepción (inédito): 486 pp. Concepción.

Flores, F. 2014. Análisis cuantitativo del riesgo de inundación por lahares en el Volcán Villarrica: métodos integrados de peligro y vulnerabilidad para la ciudad de Pucón, centro sur de Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Franco, L.E., Lara, L.E., Palma, J. L., San Martín, J. J. 2015. Aspectos sismológicos relacionados con las erupciones estrombolianas en el último ciclo eruptivo del volcán Llaima, Chile (2007 - 2010). En: XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile: 4 - 8 Octubre 2015, 2015, pp.154-157 (v.3).

Gardeweg, M. 2010. Geología y Peligros Volcánicos Consolidados Complejo Volcánico Mocho Choshuenco, Grupo Volcánico Fui y Volcanes Chanchan Región de Los Ríos Impacto en la Central Neltume. 147 pags., 2 mapas escala 1:25.000, 2 mapas escala 1:50.000. Informe inédito para ENDESA por AURUM Consultores.

- Gaytán, D., Clavero, J., Rivera, A. 2005. Actividad eruptiva explosiva del Volcán Villarrica, Andes del Sur (39.5 S), durante la glaciación Llanquihue. In Congreso Geológico Argentino (No. 16).
- Gaytán, D., Clavero, J., & Rivera, A. 2006. Vulcanismo explosivo intra glaciación Llanquihue en el volcán Villarrica, Andes del Sur. In 11° Congreso Geológico Chileno (Vol. 2, pp. 463-466).
- Geoestudios. 2014. Estimación de Volúmenes de Hielo Mediante Sondajes de Radar en Zonas Norte, Central y Sur.
- Gho, R. 2013. Determinación de parámetros eruptivos de flujos de lava del Complejo Volcánico Lonquimay (38°S), Andes del Sur. Memoria para optar al Título de Geóloga. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Global Volcanism Program, 2013. Villarrica (357120) in *Volcanoes of the World*, v. 4.7.4. Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution.
- Global Volcanism Program. 1994a. Report on Llaima (Chile). In: Wunderman, R (ed.), *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 19:5. Smithsonian Institution.
- Global Volcanism Program. 1994b. Report on Llaima (Chile). In: Wunderman, R (ed.), *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 19:8. Smithsonian Institution.
- Global Volcanism Program. 2013. Callaqui (357091) in *Volcanoes of the World*, v. 4.7.4. Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution.
- González-Ferrán, O. 1995. *Volcanes de Chile*. Instituto Geográfico Militar.
- Groeber, P. 1928. Traslado del vulcanismo de la falda oriental de la cordillera hacia la ladera occidental. *Anales de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos* 3(1): 210-218, Buenos Aires.
- Hall, M.; Ramón, P.; Mothes, P.; LePennec, J. L.; García, A.; Samaniego, P.; Yepes, H. 2004. Volcanic eruptions with little warning: the case of Volcán Reventador's Surprise November 3, 2002 Eruption, Ecuador. *Revista geológica de Chile*, 31(2), 349-358.
- Hobblit, R., Walder, J., Driedger, C., Scott, K., Pringle, P., Vallance, J. 1998. Volcano hazards from Mount Rainier, Washington. US Geological Survey Open-File Report, 98-428.
- Hubbard, B. E., Sheridan, M. F., Carrasco-Núñez, G., Díaz-Castellón, R., Rodríguez, S. R. 2007. Comparative lahar hazard mapping at Volcan Citlaltépetl, Mexico using SRTM, ASTER and

DTED-1 digital topographic data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160(1-2), 99-124.

Iverson, R. M. 1997. The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 35(3), 245-296.

Iverson, R. M., Schilling, S. P., Vallance, J. W. 1998. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110(8), 972-984.

Jorquera, C. 2019. Análisis de Peligro Volcánico por Flujos de Lava y Corrientes de Densidad Piroclástica en los Estratovolcanes Activos Callaqui, Llaima, Lonquimay, Tolhuaca, Villarrica y Mocho-Choshuenco, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Concepción.

Lara, L. 2004. Villarrica Volcano (39.5 S), Southern Andes, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería.

Lescinsky, D. T., Fink, J. H. 2000. Lava and ice interaction at stratovolcanoes: use of characteristic features to determine past glacial extents and future volcanic hazards. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B10), 23711-23726.

Lescinsky, D., Sisson, T. 1998. Ridge-forming, ice-bounded lava flows at Mount Rainier, Washington. *Geology*, 26(4), 351-354.

Lowe, D. R. 1979. Sediment gravity flows: their classification and some problems of application to natural flows and deposits.

Maisonneuve, C., Dungan, M., Bachmann, O., Burgisser, A. 2012b. Insights into shallow magma storage and crystallization at Volcán Llaima (Andean Southern Volcanic Zone, Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 211-212, p. 76-91.

Martínez, V. 2019. Nuevos Antecedentes de los Productos Volcánicos de las Ignimbritas Máficas (13.4-12.7 ka) del Volcán Llaima 38°42', 71°44'W, Región de la Araucanía, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Concepción.

Miller, C.D. 1980. Potential Hazards from Future Eruptions in the Vicinity of Mount Shasta Volcano, Northern California. United States Government Printing Office: 54 pp. Washington.

- Minería y Medio Ambiente (MYMA). 2012. Estudio de Impacto Ambiental “Proyecto Central Geotérmica Curacautín” (inédito).
- Ministerio de Obras Públicas. 2015. Construcción Mitigación Riesgos Volcánicos y Geológicos Asociados, Comunas de Villarrica, Pucón y Curarrehue, Región de la Araucanía, Etapa de Prefactibilidad.
- 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. 2000. Mapa de peligros del volcán Villarrica, regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documento de Trabajo, 17.
- Moreno, H., Clavero, J. 2006. Geología del Volcán Villarrica, Regiones de la Araucanía y de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 98, 35 p., 1 mapa escala 1:50.000.
- Moreno, H., Fuentealba, G. 1994. The May 17-19 1994 Llaima volcano eruption, southern Andes (38°42'S-71°44'W). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 21, No. 1, p. 167-171.
- Moreno, H., Gardeweg, M. C. 1989. La erupción reciente en el complejo volcánico Lonquimay (Diciembre 1988), Andes del Sur. *Andean Geology*, 16(1), 93-117.
- Moreno, H., Lahsen, A. 1986. El volcán Callaqui: ejemplo de un volcanismo fisural en los Andes del Sur (Chile, 38° L.S.). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol. 42, No.1-2, p. 1-8.
- Moreno, H., Lara, L. 2007. Geología del complejo volcánico Mocho-Choshuenco, Región de Los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, (107), 27.
- Moreno, H., Naranjo, J. 2003. Mapa de Peligros del Volcán Llaima Escala 1:75.000. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental N°7. SERNAGEOMIN.
- Moreno, H., Naranjo, J.A., Peña, P., Muñoz, J., Basualto, D., Delgado, C., Gallegos, C., Duncan, M., Maisonneuve, C. 2009. El ciclo eruptivo 2007- 2009 del Volcán Llaima, Andes del sur. En: XII CONGRESO GEOLOGICO Chileno: 22 al 26 de Noviembre de 2009. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.



- Moreno, H., Thiele, R., Lahsen, A., Valera, J., López, L., Vergara, M. 1985. Geocronología de las rocas cuaternarias de los Andes del Sur entre las latitudes 37° y 38°S, Chile. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol. 40, No. 3-4, p. 297-299.
- Moreno, H., Thiele, R., Lahsen, A., Varela, J., López-Escobar, L. 1984. Estudio del volcán Callaqui: Geología y riesgo volcánico. ENDESA-Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile.
- Moreno, H., Naranjo, J., Polanco, E. 2012. Geología del Complejo Volcánico Lonquimay-Tolhuaca. Regiones de la Araucanía y del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica, 1.
- Munizaga, F., Hervé, F., Drake, R., Pankhurst, R. J., Brook, M., Snelling, N. 1988. Geochronology of the Lake Region of south-central Chile (39–42 S): preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(3), 309-316.
- Muñoz-Salinas, E., Castillo-Rodríguez, M., Manea, V., Manea, M., Palacios, D. 2009. Lahar flow simulations using LAHARZ program: application for the Popocatepetl volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182(1-2), 13-22.
- 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. 2004. Laharic debris-flows from Villarrica Volcano. Villarrica Volcano (39.5° S), Southern Andes, Chile. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería, 28-45.
- Naranjo, J. A., Moreno, H. 2005. Geología del Volcán Llaima, Región de La Araucanía, Escala: 1: 50.000.
- Naranjo, J.A.; Moreno, H.; Polanco, E., Young, S. 2000. Mapa de Peligros de los volcanes del Alto Biobío, Regiones del Biobío y La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería. Documentos de Trabajo No. 15, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Niemeyer, H., Muñoz, J. 1983. Hoja Laguna de La Laja: Región de Bio Bío: Carta Geológica de Chile 1: 250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile.

- Petit-Breuilh, M. E. 2004. La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos: siglos XVI al XX, el modelo chileno. Casa de los Volcanes, 400 p., Cabildo Insular de Lanzarote (Arrecife).
- Petit-Breuilh, M. E., Lobato, J. 1994. Análisis comparativo de la cronología eruptiva histórica de los volcanes Llaima y Villarrica (38-39 LS). In Congreso Geológico Chileno (No. 7, pp. 366-370).
- Pierson, T. C. 1998. An empirical method for estimating travel times for wet volcanic mass flows. *Bulletin of Volcanology*, 60(2), 98-109.
- Pierson, T. C., Costa, J. E. 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation. *Reviews in Engineering Geology*, 7, 1-12.
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. C., & Borrero, C. A. 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 41(1-4): 17-66.
- Pierson, T. C., Scott, K. M. 1985. Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water resources research*, 21(10), 1511-1524.
- PLADECO. 2006. Plan de Desarrollo Comunal de Alto Bio Bío. I. Municipalidad de Alto Bio Bío. Chile.
- Polanco, E. 1998. Volcanismo explosivo postglacial de la cuenca del Alto Biobío, Andes del Sur (37°45'' – 38°30''). Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 104 p. Santiago.
- Polanco, E. 2010. Volcanoestratigrafía, geoquímica y peligro volcánico del Volcán Lonquimay (38°30'S), Andes del Sur (Chile). Tesis de Doctorado. Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona.
- Polanco, E., Naranjo, J.A. 2008. Colapso Holoceno en el Volcán Callaqui (37°55'S), Andes del Sur. *Actas del XVII Congreso Geológico Argentino*. Jujuy.

- Polanco, E., Naranjo, J.A., Young, S., Moreno, H., 2000. Volcanismo explosivo Holoceno en la Cuenca del Alto Biobío, Andes del Sur (37°45"S – 38°30"S). In Congreso Geológico Chileno, N°9, Actas, Vol.2, p. 59-56. Puerto Varas.
- Rawson, H., Naranjo, J. A., Smith, V. C., Fontijn, K., Pyle, D. M., Mather, T. A., Moreno, H. 2015. The frequency and magnitude of post-glacial explosive eruptions at Volcán Mocho-Choshuenco, southern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 299, 103-129.
- Rivera, A. 2011. Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas. Dirección General de Aguas.
- Rivera, A., Zamora, R., Uribe, J., Wendt, A., Oberreuter, J., Cisternas, S., ... & Clavero, J. (2015). Recent changes in total ice volume on Volcán Villarrica, Southern Chile. *Natural Hazards*, 75(1), 33-55.
- Rodolfo, K. S., y Arguden, A. T. 1991. Rain-lahar generation and sediment delivery systems at Mayon Volcano, Philippines.
- Rodríguez, F. 2015. Geología Estructural En Torno Al Volcán Llaima: El Sistema De Fallas Liquiñe-Ofqui Y Su Relación Con La Actividad Volcánica Reciente Zona Volcánica Sur, Región De La Araucanía, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra: 129 pp., Concepción.
- Schilling, S. P. 1998. LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones (No. 98-638). US Geological Survey; Information Services [distributor].
- Scott, K. M. 1988. Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flow in the Toutle-Cowlitz River system. U.S. Geological Survey Professional Paper 1447-A.
- Scott, K. M., Vallance, J. W., & Pringle, P. T. 1995. Sedimentology, behavior, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington (No. 1547). US Geological Survey.
- SERNAGEOMIN. 2015. Ranking de los 90 volcanes activos de Chile. <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/archivos/Ranking-de-Volcanes.pdf>
- SERNAGEOMIN. 2015a. Ficha Volcán Llaima. <http://www.sernageomin.cl/volcan.php?iId=23>

SERNAGEOMIN. 2017. Ficha Volcán Villarrica. [http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/1\\_Villarrica.pdf](http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/1_Villarrica.pdf)

Sielfeld, G. 2008. Cordón fisural Callaqui: Antecedentes tectónicos de la naturaleza y geometría del volcanismo fisural en el volcán Callaqui, Zona Volcánica Sur, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción.

Silva, C., Robin, C., Druitt, T. H. 2005. Architectural characteristics and deposition of the 3635 $\pm$ 50 yr BP pucon ignimbrite of the Villarica volcano, southern Andes, Chile.

Simkin, T., Siebert, L. 1994. Volcanoes of the World. Geoscience Press, 368 p., Tucson.

Sisson, T. W.; Vallance, J. W. 2009. Frequent eruptions of Mount Rainier over the last ~ 2,600 years. *Bulletin of Volcanology*, 71(6), 595-618.

Smith, G. A. 1986. Coarse-grained nonmarine volcanoclastic sediment: Terminology and depositional process. *Geological Society of America Bulletin*, 97(1), 1-10.

Smith, G. A., Lowe, D. R. 1991. Lahars: Volcano Hydrologic-Events and Deposition in the Debris Flow—Hyperconcentrated Flow Continuum.

Suárez, M., Emparán, C. 1997. Hoja Curacautín, Regiones de la Araucanía y del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 71, 105 p., escala 1:250.000.

Thompson, M.A.; Lindsay, J.M., Gaillard, J.C. 2015. The influence of probabilistic volcanic hazard map properties on hazard communication. *Journal of Applied Volcanology*. Vol. 4, (6): 1-24.

Vallance, J. W. 1999. Postglacial lahars and potential hazards in the White Salmon River system on the southwest flank of Mount Adams, Washington (Vol. 2161). US Geological Survey.

Vallance, J. W. 2000. Lahars. *Encyclopedia of volcanoes*.

Vallance, J. W., Iverson, R.M. 2015. Lahars and their deposits. In *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)* (pp. 649-664).

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

Vera, F. 2019. Origen, Transporte y Emplazamiento de Lahares y Avalanchas Mixtas Generadas en la Erupción del 03 de Marzo de 2015 en el Volcán Villarrica, Regiones de la Araucanía y Los Ríos, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Concepción.

Vergara, C. 2010. Petrogénesis de los centros eruptivos del complejo volcánico Lonquimay (CVL), IX Región de la Araucanía. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Wilson, L., Head, J. W. 2007. Heat transfer in volcano–ice interactions on Earth. *Annals of Glaciology*, 45, 83-86.







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



## **ANEXOS**

**Memoria para optar al Título de Geólogo**

**Nicolás Gabriel Álvarez Valenzuela**

**Profesor Patrocinante:** Dr. José Luis Palma Lizana

**Profesores Comisión:** Dra. María Verónica Pineda Mascayano  
Dr. Jorge Andrés Quezada Flory

**Concepción, 2020**

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo</b>		<b>Página</b>
I	Resultados de la modelación en LaharZ para los volcanes estudiados	202



## ANEXO I: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN EN LAHARZ PARA LOS VOLCANES ESTUDIADOS

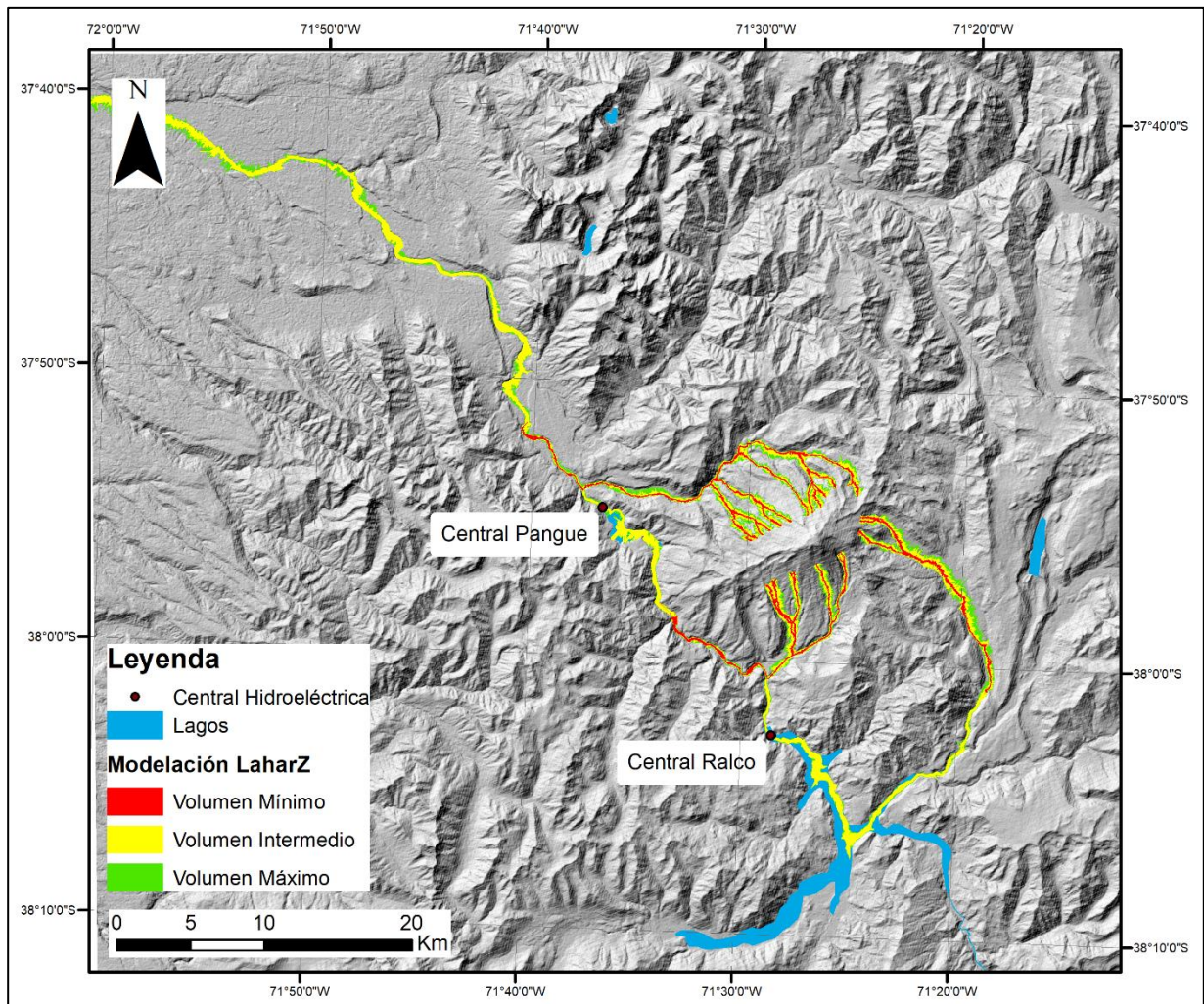


Figura 1

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Callaqui, en el caso de lahares generados por lavas con un 60% de detritos. Volumen mínimo:  $1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; volumen intermedio:  $3,8 \times 10^7 \text{ m}^3$ ; volumen máximo:  $1,2 \times 10^8 \text{ m}^3$ .



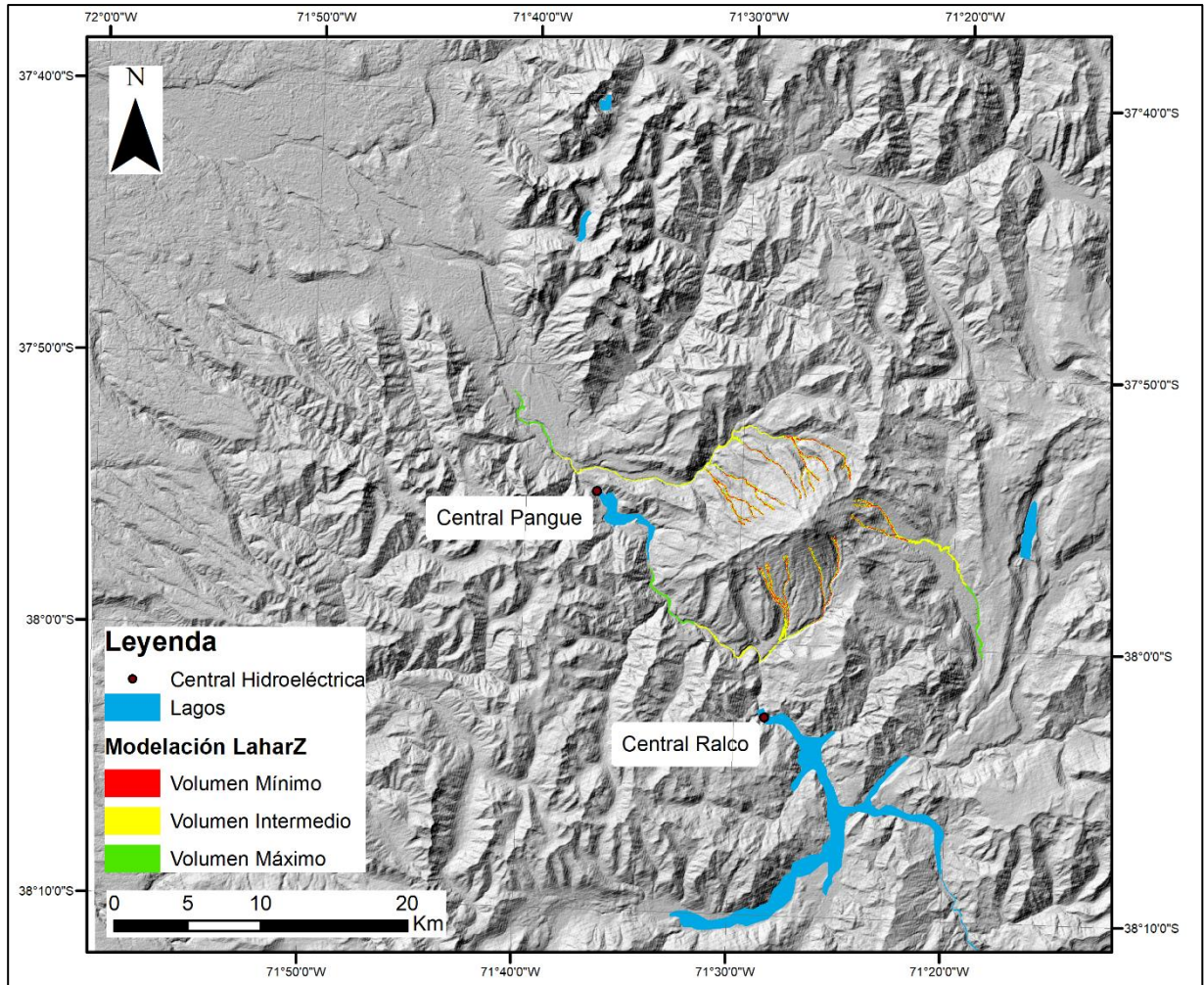


Figura 2

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Callaqui, en el caso de lahares generados por CDPs con un 60% de detritos. Volumen mínimo:  $2,4 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; volumen intermedio:  $2,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; volumen máximo:  $4,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

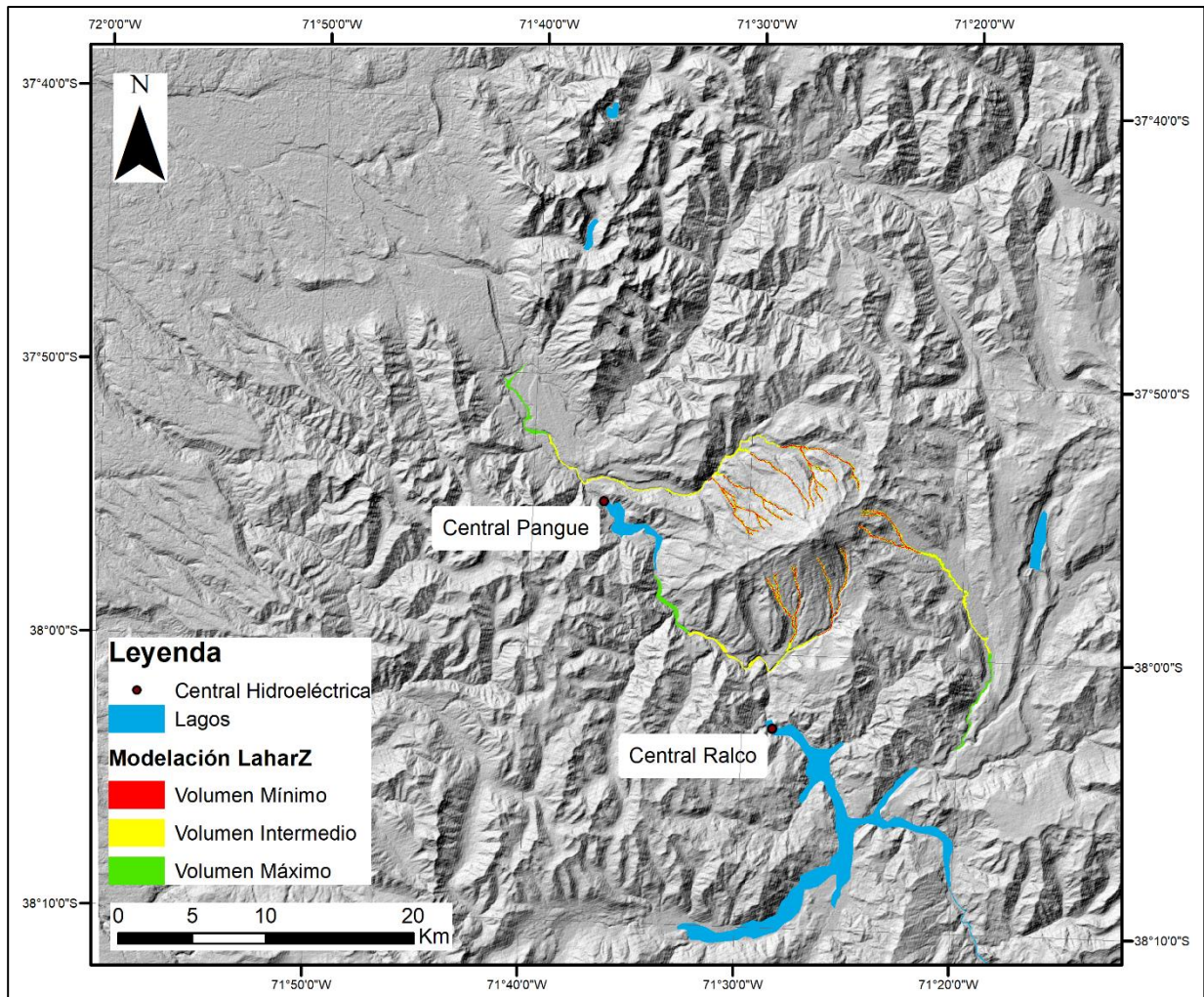


Figura 3

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Callaqui, en el caso de lahares generados por CDPs con un 75% de detritos. Volumen mínimo:  $3,9 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; volumen intermedio:  $3,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; volumen máximo:  $7,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ .



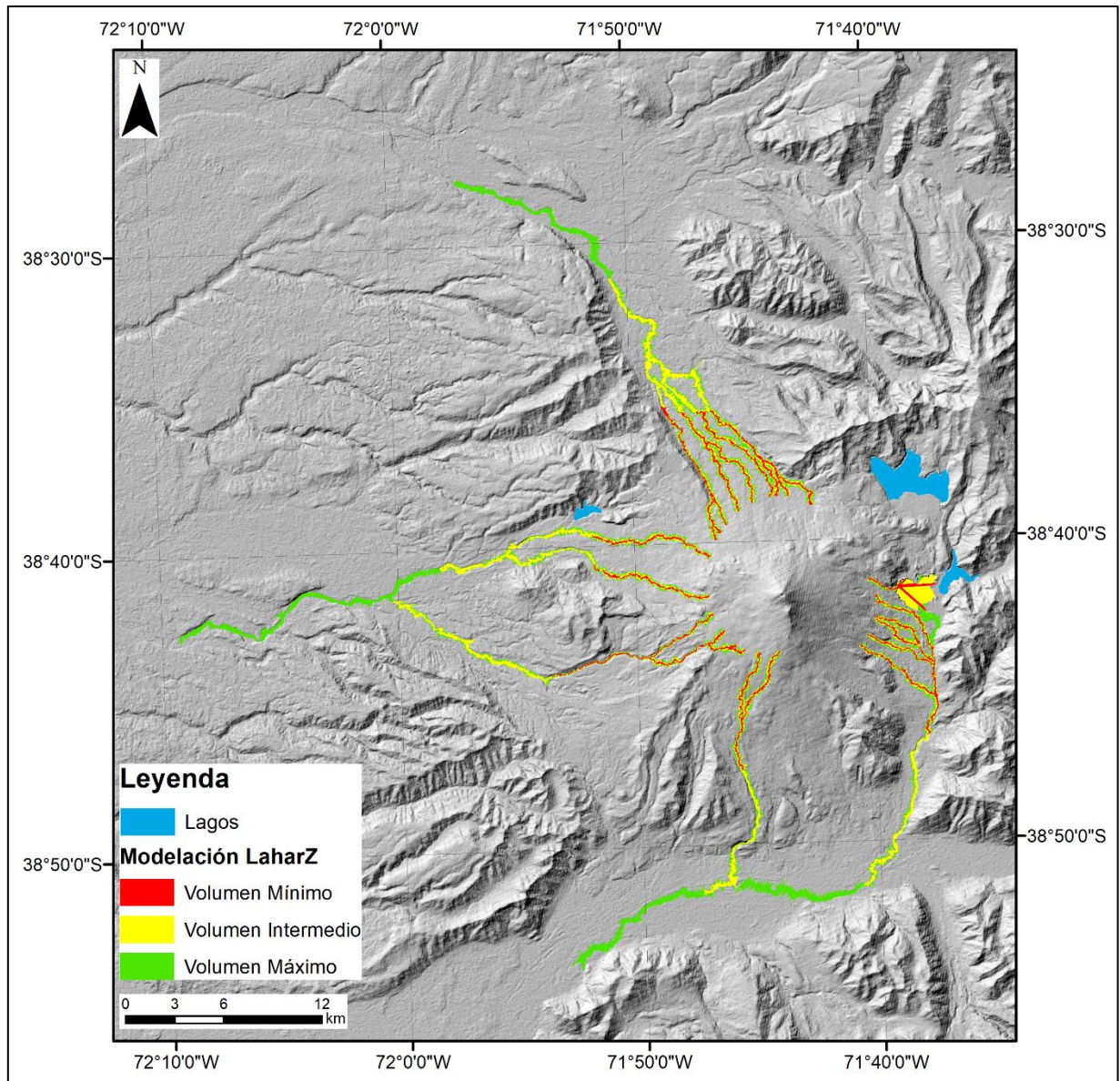


Figura 4

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Llaima, en el caso de lahares generados por lavas con un 60% de detritos. Volumen mínimo:  $2,4 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; volumen intermedio:  $4,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; volumen máximo:  $3,7 \times 10^7 \text{ m}^3$ .

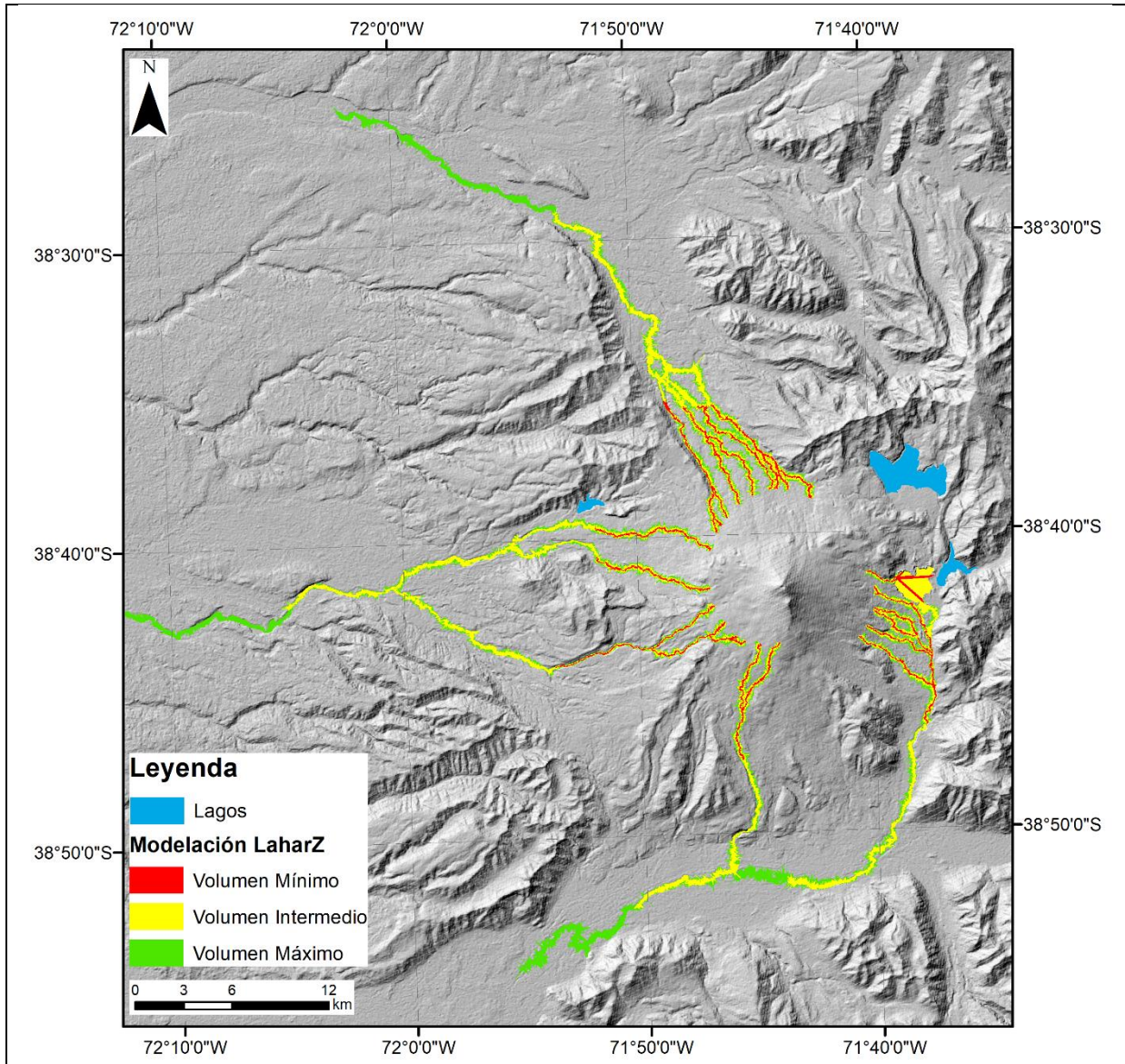


Figura 5

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Llaima, en el caso de lahares generados por CDPs con un 60% de detritos. Volumen mínimo:  $4,9 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; volumen intermedio:  $4,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; volumen máximo:  $9,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ .



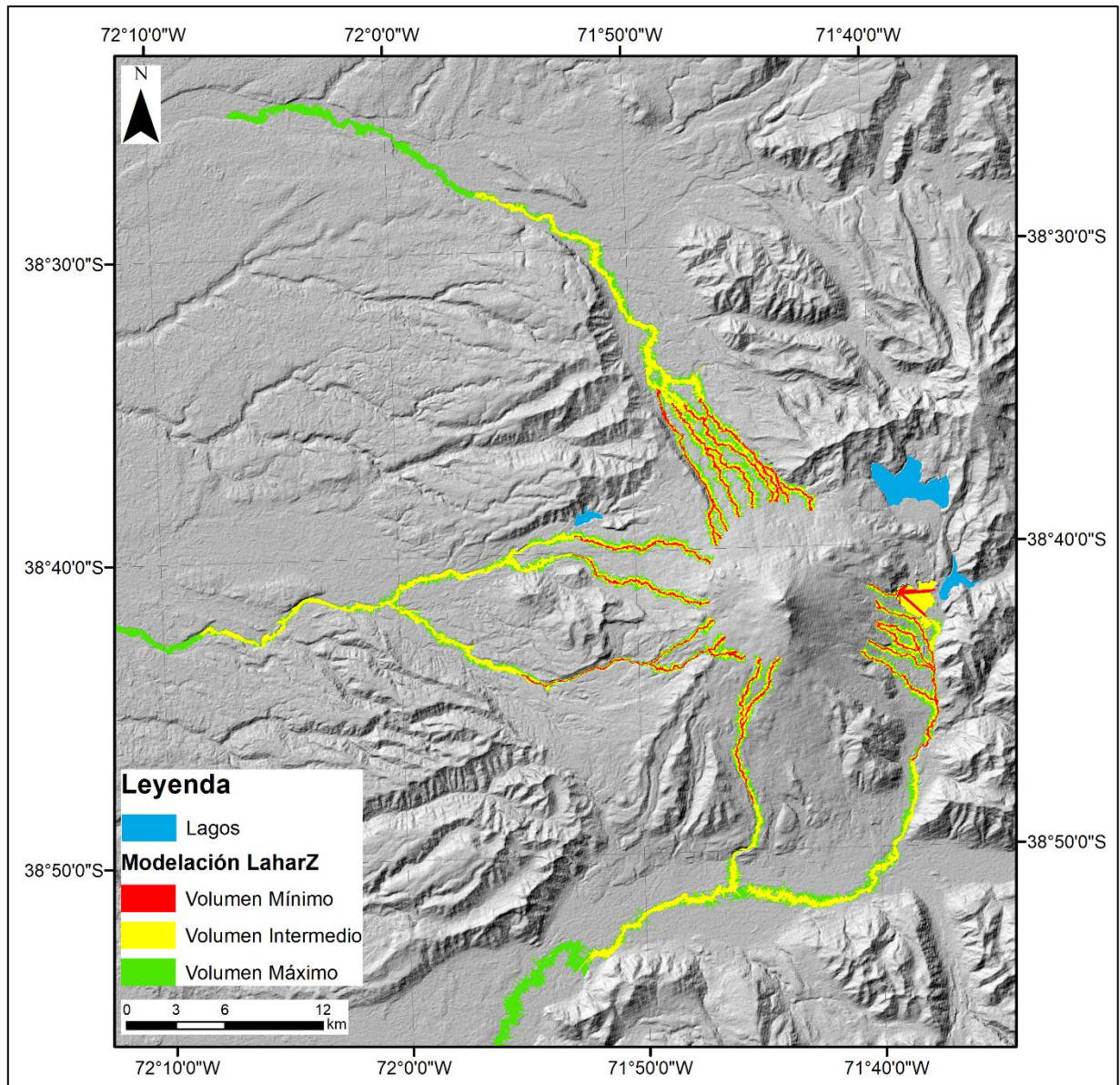


Figura 6

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Llaima, en el caso de lahares generados por CDPs con un 75% de detritos. Volumen mínimo:  $7,8 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; volumen intermedio:  $6,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; volumen máximo:  $2,2 \times 10^7 \text{ m}^3$ .

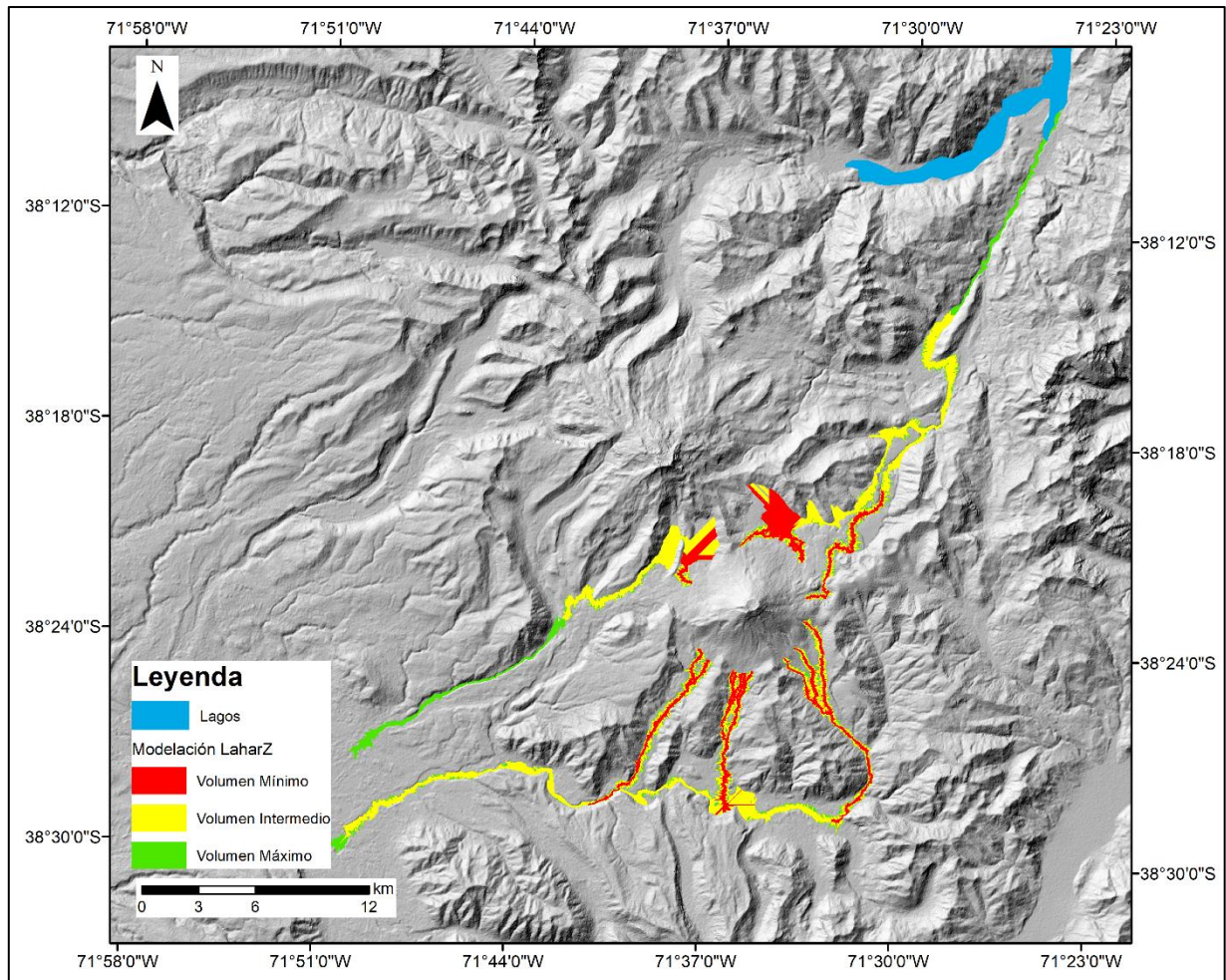


Figura 7

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Lonquimay, en el caso de lahares generados por lavas con un 60% de detritos. Volumen mínimo:  $7,8 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; volumen intermedio:  $1,5 \times 10^7 \text{ m}^3$ ; volumen máximo:  $4,1 \times 10^7 \text{ m}^3$ .



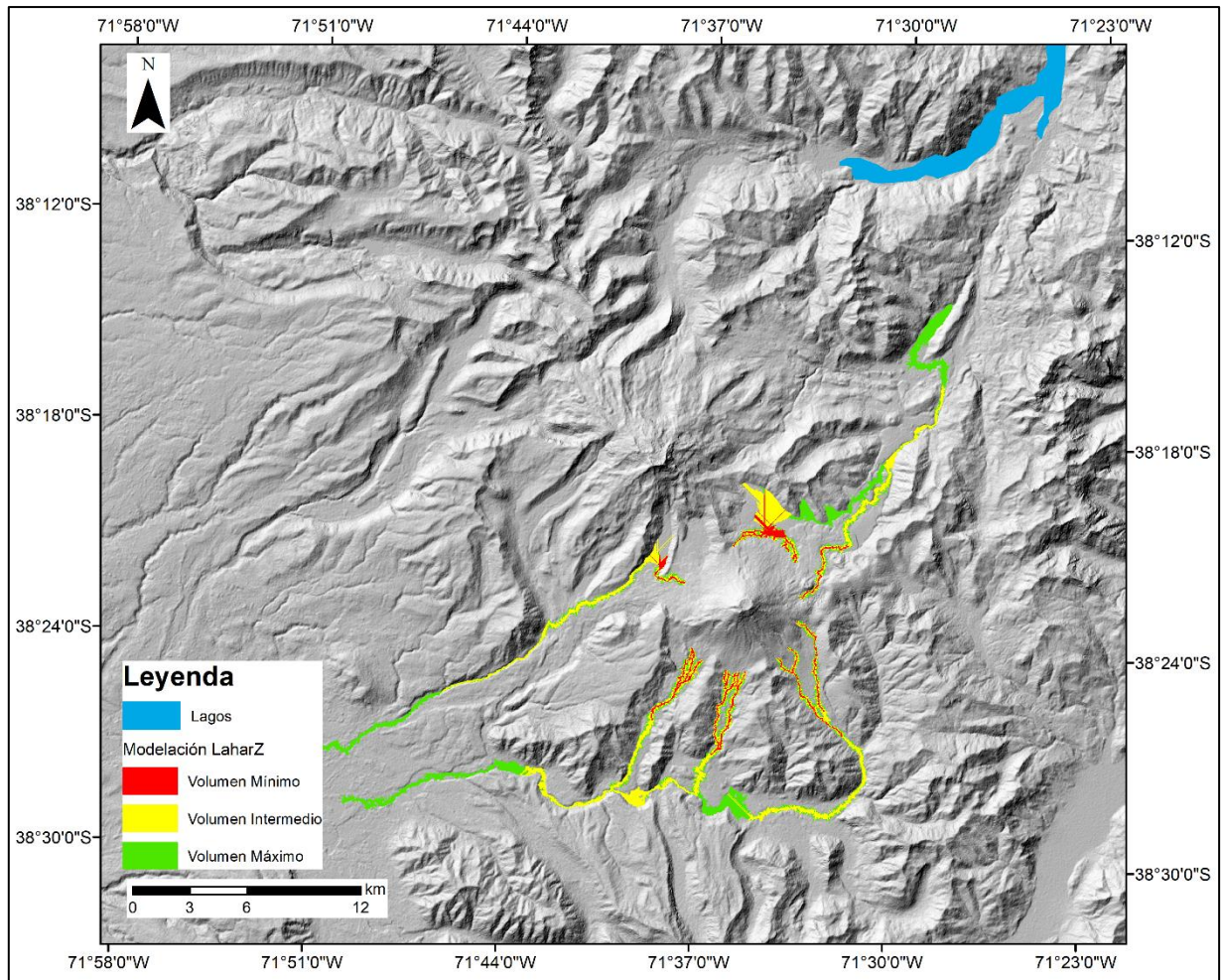


Figura 8

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Lonquimay, en el caso de lahares generados por CDPs con un 60% de detritos. Volumen mínimo:  $1,6 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; volumen intermedio:  $1,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; volumen máximo:  $3,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ .



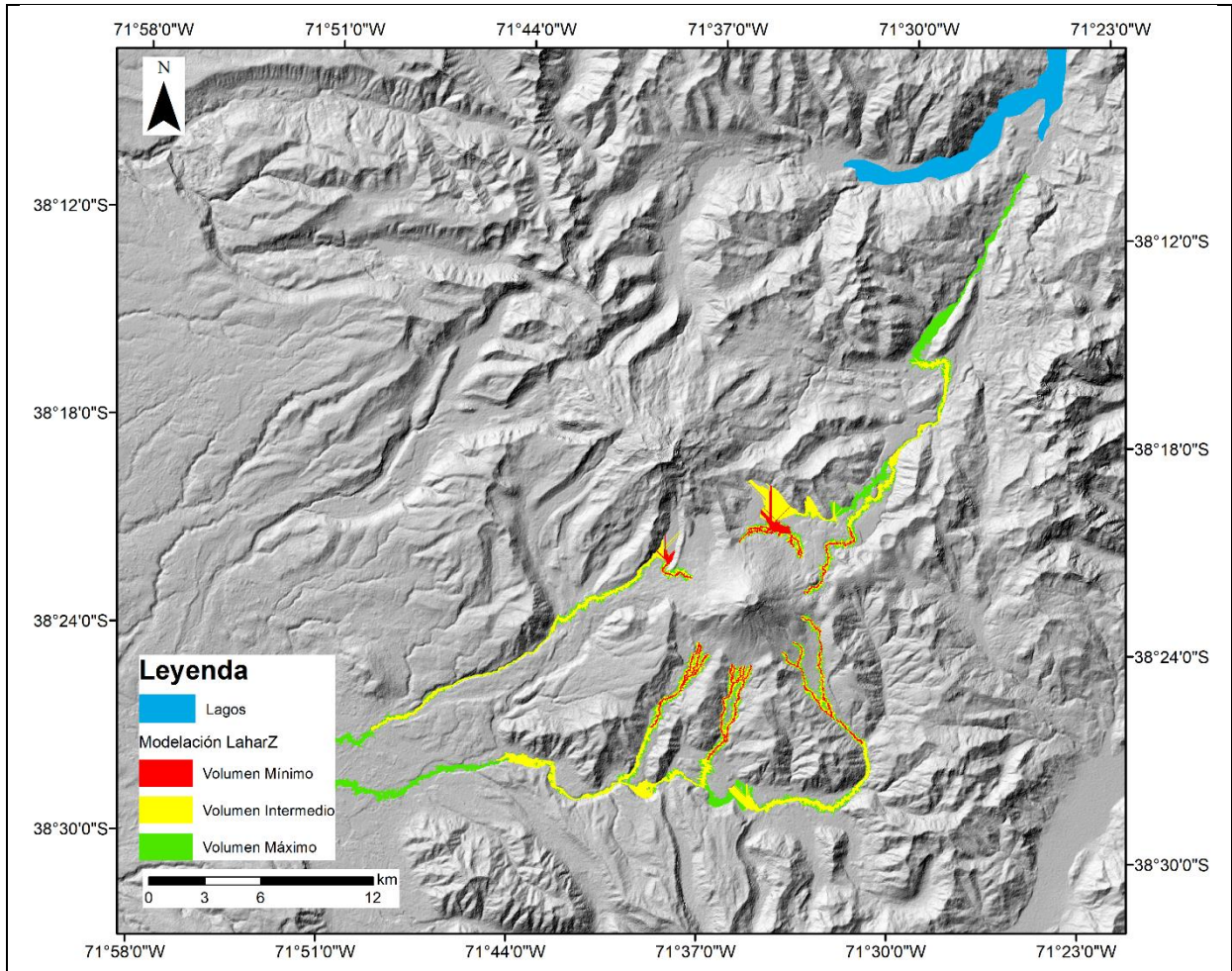


Figura 9

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Lonquimay, en el caso de lahares generados por CDPs con un 75% de detritos. Volumen mínimo:  $2,5 \times 10^5$  m<sup>3</sup>; volumen intermedio:  $2,1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>; volumen máximo:  $1,8 \times 10^7$  m<sup>3</sup>.

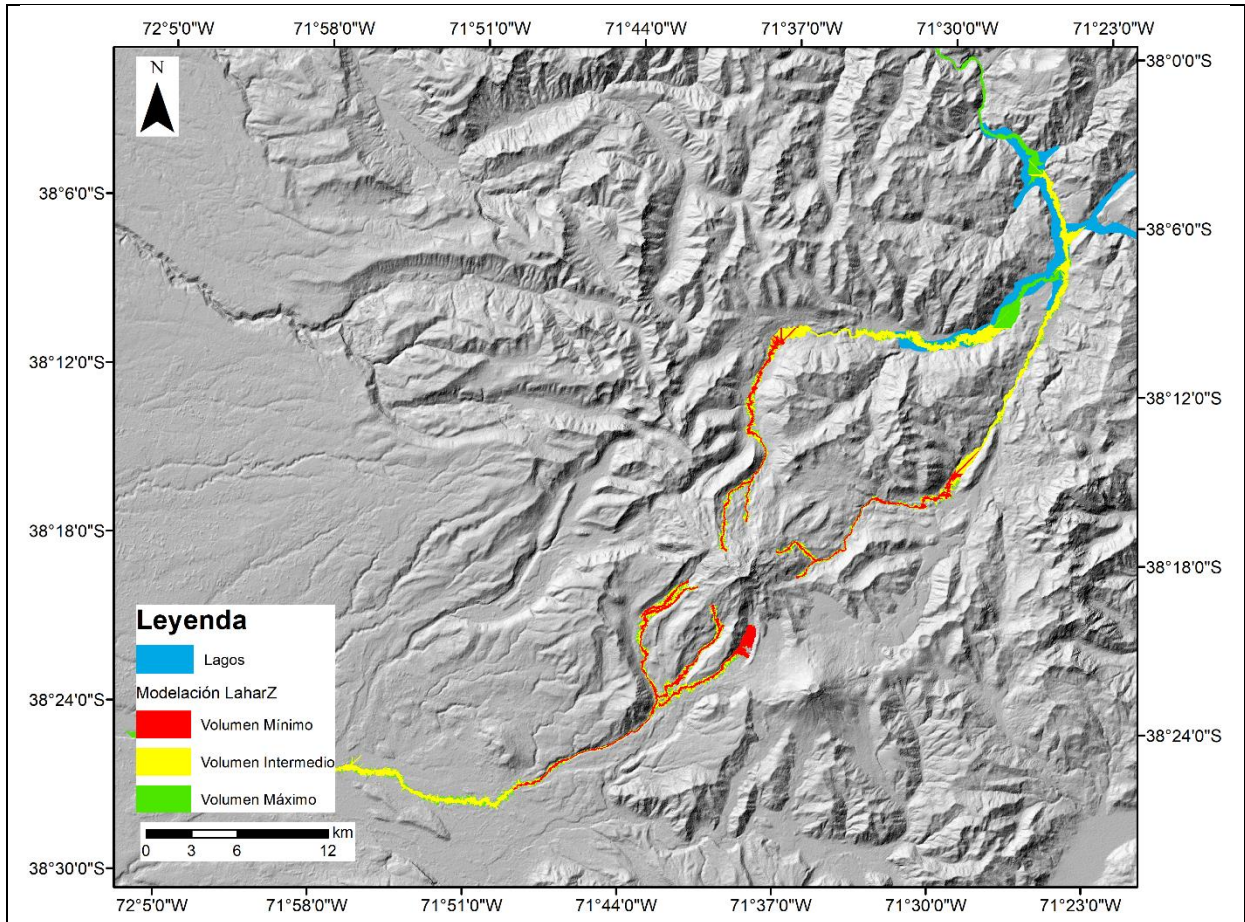
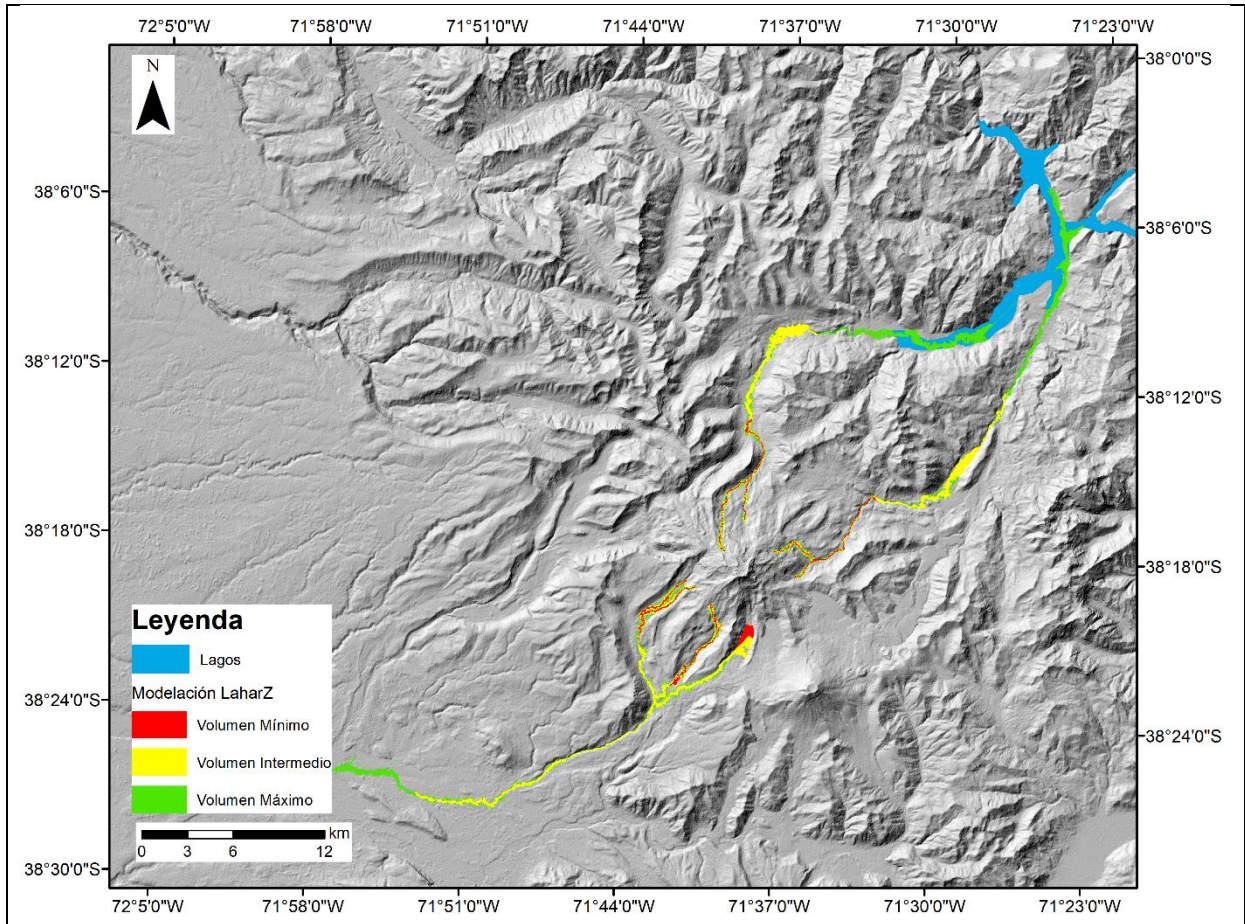


Figura 10

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Tolhuaca, en el caso de lahares generados por lavas con un 60% de detritos. Volumen mínimo:  $1,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; volumen intermedio:  $2,6 \times 10^7 \text{ m}^3$ ; volumen máximo:  $1,0 \times 10^8 \text{ m}^3$ .





Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Tolhuaca, en el caso de lahares generados por CDPs con un 60% de detritos. Volumen mínimo:  $2,8 \times 10^5$  m<sup>3</sup>; volumen intermedio:  $2,3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>; volumen máximo:  $5,5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.

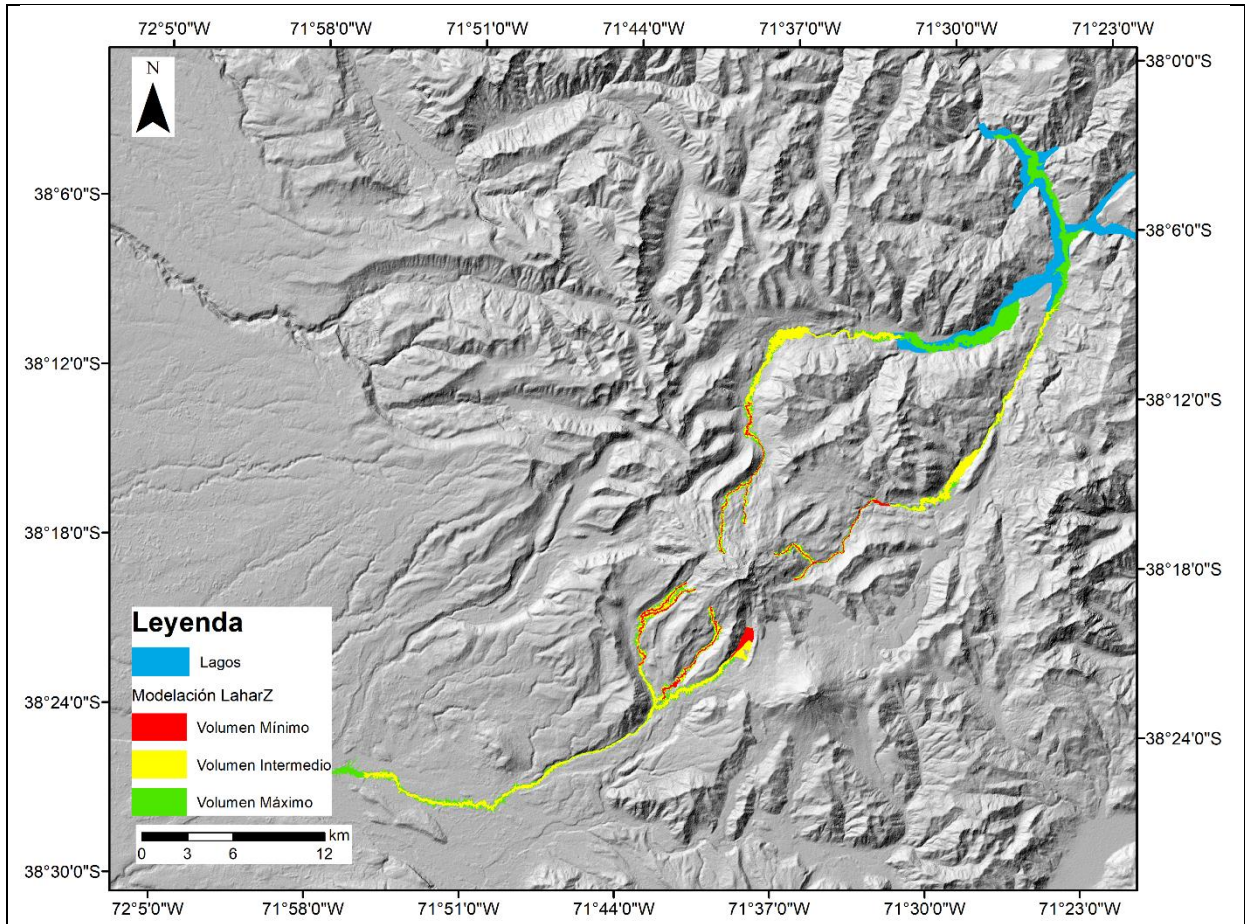


Figura 12

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Tolhuaca, en el caso de lahares generados por CDPs con un 75% de detritos. Volumen mínimo:  $4,4 \times 10^5$  m<sup>3</sup>; volumen intermedio  $3,6 \times 10^6$  m<sup>3</sup>; volumen máximo:  $1,8 \times 10^7$  m<sup>3</sup>.



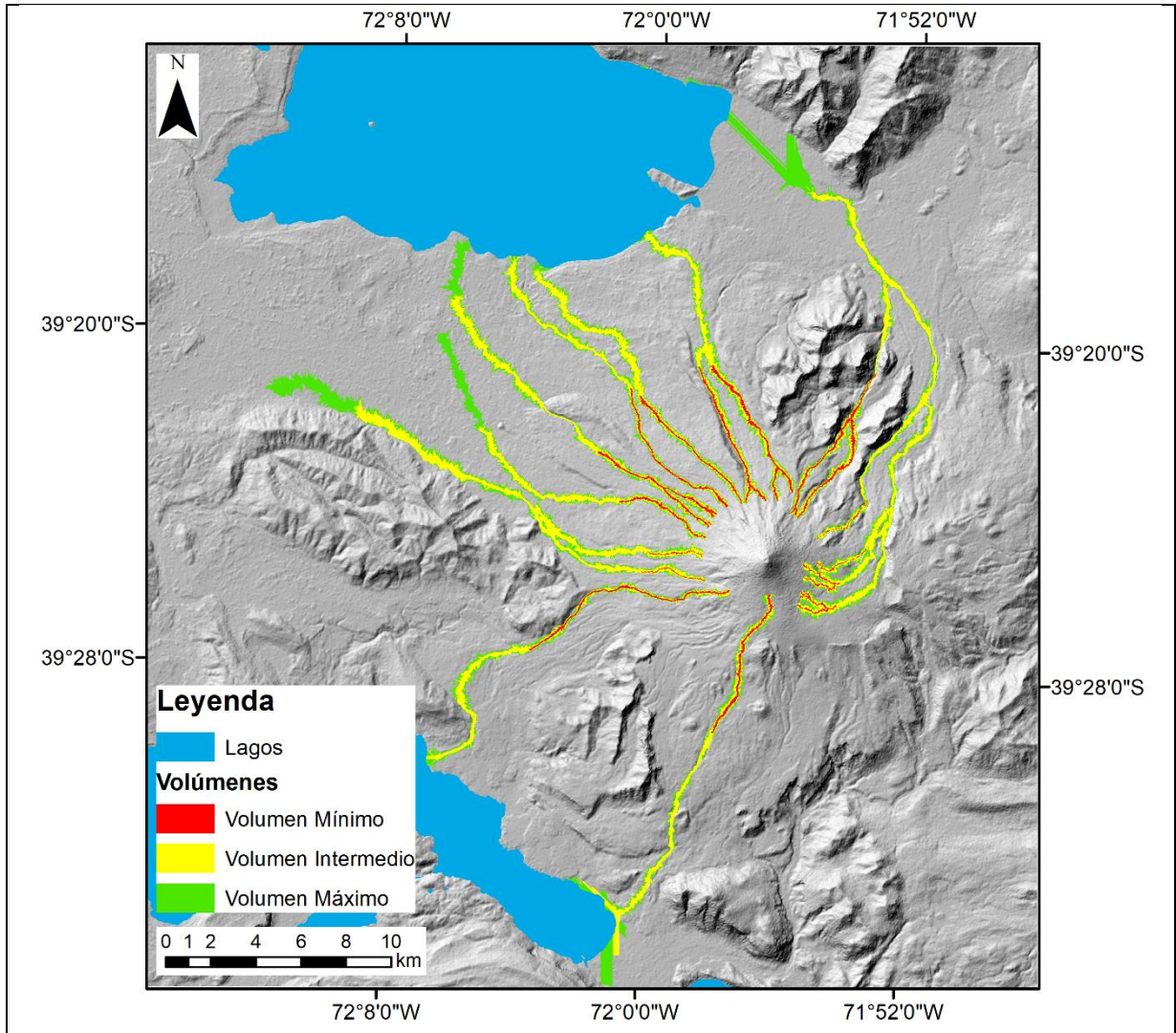


Figura 13

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Villarrica, en el caso de lahares generados por lavas con un 60% de detritos. Volumen mínimo:  $1,9 \times 10^6$  m<sup>3</sup>; volumen intermedio:  $3,8 \times 10^7$  m<sup>3</sup>; volumen máximo:  $1,1 \times 10^8$  m<sup>3</sup>.

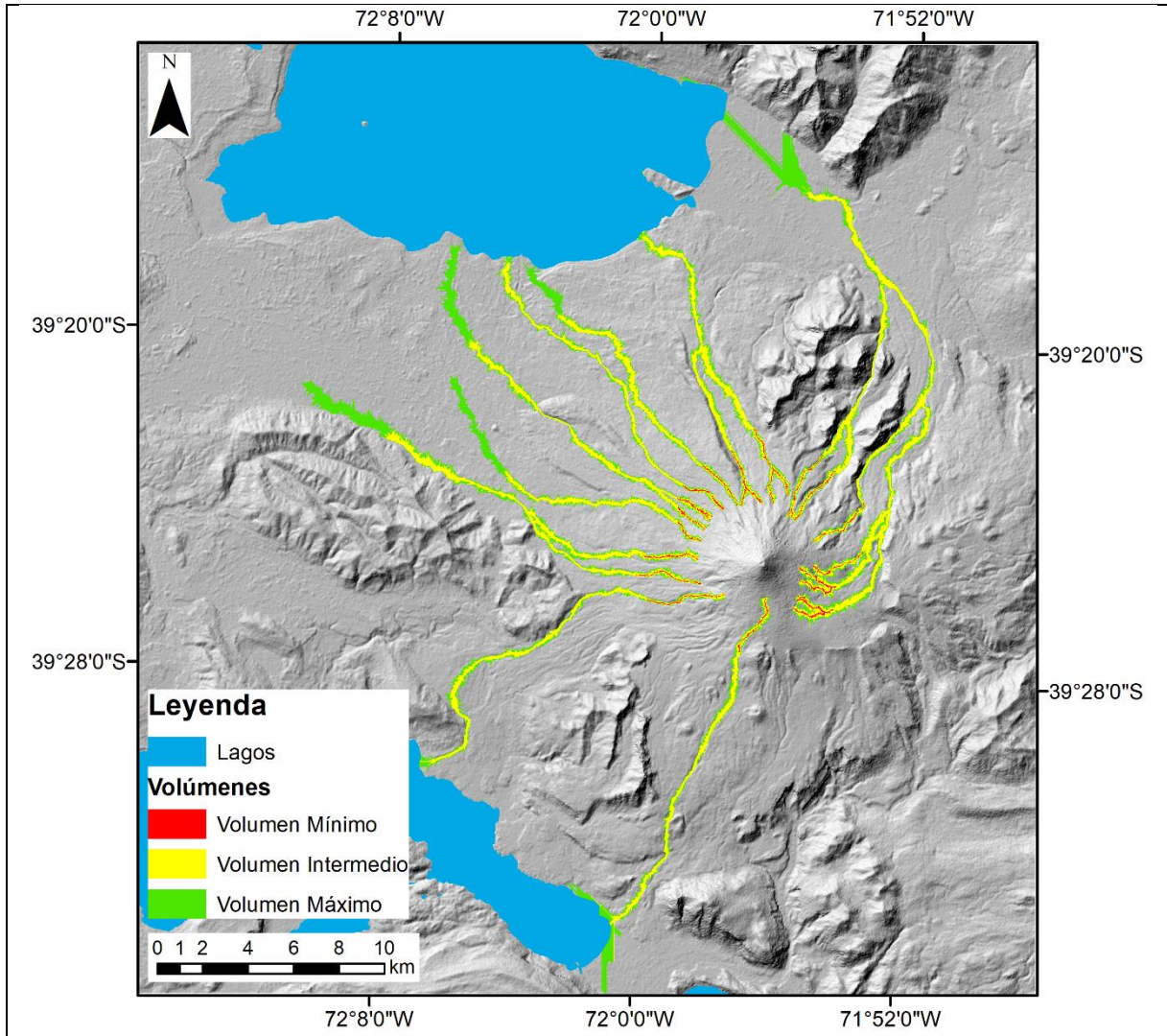


Figura 14

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Villarrica, en el caso de lahares generados por CDPs con un 60% de detritos. Volumen mínimo:  $9,4 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; volumen intermedio:  $7,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; volumen máximo:  $1,9 \times 10^7 \text{ m}^3$ .



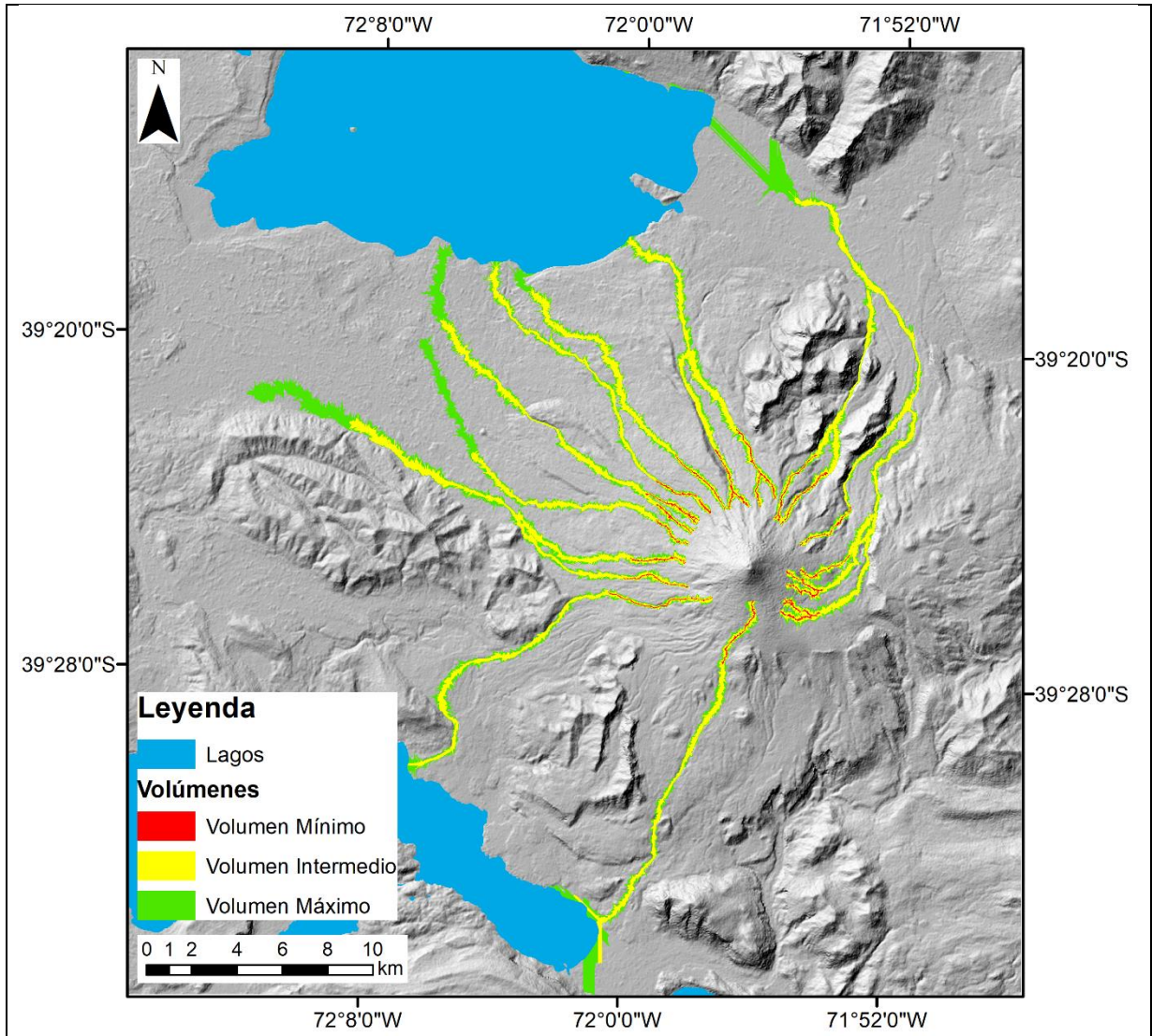


Figura 15

Resultados del modelamiento en LaharZ para el Volcán Villarrica, en el caso de lahares generados por CDPs con un 75% de detritos. Volumen mínimo:  $1,5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>; volumen intermedio:  $1,2 \times 10^7$  m<sup>3</sup>; volumen máximo:  $3,0 \times 10^7$  m<sup>3</sup>.