



**Instituto
Nacional de
Hidráulica**
Ministerio de Obras
Públicas

Gobierno de Chile

**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS**

**“CONSTRUCCIÓN MITIGACIÓN RIESGOS VOLCÁNICOS Y GEOLÓGICOS
ASOCIADOS, COMUNAS DE VILLARRICA, PUCÓN Y CURARREHUE, REGIÓN DE
LA ARAUCANÍA” ETAPA DE PRE-FACTIBILIDAD**



RESUMEN EJECUTIVO



<p>Mandante: Ministerio de Obras Públicas Dirección de Obras Hidráulicas IX Región</p>																							
<p>Estudio: CONSTRUCCIÓN MITIGACIÓN RIESGOS VOLCANICOS Y GEOLÓGICOS ASOCIADOS, COMUNAS DE VILLARRICA, PUCÓN Y CURARREHUE, REGIÓN DE LA ARAUCANÍA. ETAPA PREFACTIBILIDAD Resumen Ejecutivo</p>	<p>Fecha: Diciembre 2015</p>																						
<p>Equipo de Trabajo:</p> <table> <tr><td>Luis Zamorano R.</td><td>Ingeniero Civil, Jefe Unidad Ingeniería y Desarrollo</td></tr> <tr><td>Julio Vallejos A.</td><td>Ingeniero Civil</td></tr> <tr><td>Eduardo Santibañez W.</td><td>Ingeniero Civil</td></tr> <tr><td>Héctor Hernández J.</td><td>Ingeniero Civil</td></tr> <tr><td>Juan Carlos Mercado C.</td><td>Ingeniero Civil Oceánico.</td></tr> <tr><td>Francisco Ulloa C.</td><td>Ingeniero Civil</td></tr> <tr><td>Marcos Díaz N.</td><td>Geomensor</td></tr> <tr><td>Rodrigo Jaramillo B.</td><td>Geomensor</td></tr> <tr><td>Héctor Aliaga Z.</td><td>Geomensor</td></tr> <tr><td>Luis Esquivel V.</td><td>Dibujante técnico</td></tr> <tr><td>Bastián Venegas P.</td><td>Dibujante técnico</td></tr> </table>		Luis Zamorano R.	Ingeniero Civil, Jefe Unidad Ingeniería y Desarrollo	Julio Vallejos A.	Ingeniero Civil	Eduardo Santibañez W.	Ingeniero Civil	Héctor Hernández J.	Ingeniero Civil	Juan Carlos Mercado C.	Ingeniero Civil Oceánico.	Francisco Ulloa C.	Ingeniero Civil	Marcos Díaz N.	Geomensor	Rodrigo Jaramillo B.	Geomensor	Héctor Aliaga Z.	Geomensor	Luis Esquivel V.	Dibujante técnico	Bastián Venegas P.	Dibujante técnico
Luis Zamorano R.	Ingeniero Civil, Jefe Unidad Ingeniería y Desarrollo																						
Julio Vallejos A.	Ingeniero Civil																						
Eduardo Santibañez W.	Ingeniero Civil																						
Héctor Hernández J.	Ingeniero Civil																						
Juan Carlos Mercado C.	Ingeniero Civil Oceánico.																						
Francisco Ulloa C.	Ingeniero Civil																						
Marcos Díaz N.	Geomensor																						
Rodrigo Jaramillo B.	Geomensor																						
Héctor Aliaga Z.	Geomensor																						
Luis Esquivel V.	Dibujante técnico																						
Bastián Venegas P.	Dibujante técnico																						
<p>Consultor Externo:</p> <table> <tr><td>Geoestudios</td><td>Estudio Glaciológico–Vulcanológico</td></tr> <tr><td>Cosmovitalis Ltda</td><td>Estudio Análisis Ambiental</td></tr> <tr><td>Arcadis Geotécnica</td><td>Medidas Estructurales</td></tr> <tr><td>FCFM Universidad de Chile</td><td>Modelación Numérica Laháres</td></tr> <tr><td>Asides Ltda</td><td>Participación Ciudadana</td></tr> <tr><td>FUGRO SA</td><td>Levantamiento LIDAR</td></tr> </table>		Geoestudios	Estudio Glaciológico–Vulcanológico	Cosmovitalis Ltda	Estudio Análisis Ambiental	Arcadis Geotécnica	Medidas Estructurales	FCFM Universidad de Chile	Modelación Numérica Laháres	Asides Ltda	Participación Ciudadana	FUGRO SA	Levantamiento LIDAR										
Geoestudios	Estudio Glaciológico–Vulcanológico																						
Cosmovitalis Ltda	Estudio Análisis Ambiental																						
Arcadis Geotécnica	Medidas Estructurales																						
FCFM Universidad de Chile	Modelación Numérica Laháres																						
Asides Ltda	Participación Ciudadana																						
FUGRO SA	Levantamiento LIDAR																						
<p>Aprobado por:</p> <table> <tr><td>Luis Zamorano Riquelme</td><td>Ingeniero Civil, Jefe Unidad Ingeniería y Desarrollo</td></tr> </table>		Luis Zamorano Riquelme	Ingeniero Civil, Jefe Unidad Ingeniería y Desarrollo																				
Luis Zamorano Riquelme	Ingeniero Civil, Jefe Unidad Ingeniería y Desarrollo																						
C	Para aprobación del mandante	FUC	LZR	ESW	17/dic.2015																		
Rev.	Descripción	Por	Revisó	Vobº	Fecha																		

INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	GENERALIDADES.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.2.1	<i>Objetivos Específicos</i>	3
2	Recopilación de antecedentes	4
3	Trabajos Topográficos	7
3.1	LEVANTAMIENTO DE TERRENO FASE I Y II.....	7
3.2	LEVANTAMIENTO DE TERRENO FASE III.....	9
3.3	LEVANTAMIENTO DE TERRENO FASE IV	9
4	Estudio Hidrológico	10
4.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
4.2	METODOLOGÍA UTILIZADA.....	10
4.3	PARÁMETROS MORFOLÓGICOS DE LAS CUENCAS.....	11
4.3.1	<i>Tiempo de concentración</i>	11
4.4	DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS CUENCAS SIN CONTROL FLUVIOMÉTRICO.....	12
4.5	DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS CUENCAS CON CONTROL FLUVIOMÉTRICO.....	14
4.5.1	<i>Ánálisis de frecuencia caudales máximos instantáneos</i>	14
4.6	MÉTODO DGA AC NIVAL.....	15
5	Estudio Hidráulico y Mecánica de Suelos	16
5.1	MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
5.1.1	<i>Coeficientes de rugosidad</i>	16
5.1.2	<i>Aforos</i>	16
5.1.3	<i>Socavación</i>	18
5.2	RESULTADOS.....	18
5.2.1	<i>Río Voipir</i>	18
5.2.2	<i>Esteros Melilahuen</i>	19
5.2.3	<i>Esteros Zanjón Seco</i>	20
5.2.4	<i>Río Palguín</i>	20
5.2.5	<i>Esteros Challupen</i>	21
5.2.6	<i>Trancura en Curarrehue</i>	21
5.2.7	<i>Esteros Correntoso</i>	22
5.2.8	<i>Esteros Huichatío</i>	22
5.2.9	<i>Esteros Molco</i>	23
6	Estudio Glaciológico y Vulcanológico	23

7	Modelación Numérica Flujos Laháricos.....	29
7.1	RESULTADOS.....	30
8	Propuesta de Medidas de Mitigación.....	39
8.1	MEDIDAS ESTRUCTURALES	39
8.1.1	<i>Sistema Ríos Trancura-Turbio-Correntoso.....</i>	40
8.1.2	<i>Zanjón Seco.....</i>	42
8.1.3	<i>Estero Correntoso</i>	43
8.1.4	<i>Sistema Estero Seco Pino Huacho- Melilahuen</i>	45
8.1.5	<i>Beneficios Esperados.....</i>	46
8.2	MEDIDAS NO ESTRUCTURALES.....	49
8.2.1	<i>Monitoreo e Instrumentación.....</i>	49
8.2.2	<i>Integración de áreas laharicas a los planos reguladores.....</i>	50
8.2.3	<i>Medidas de información y educación a la comunidad.....</i>	59
8.2.4	<i>Mantención de Cauces.....</i>	60
9	Proceso de Participación Ciudadana.....	62
9.1	OBJETIVOS.....	62
9.2	METODOLOGÍA UTILIZADA.....	62
9.2.1	<i>Realización de entrevistas en profundidad.....</i>	62
9.2.2	<i>Actividades participativas.....</i>	62
9.2.3	<i>Difusión.....</i>	63
9.3	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
9.3.1	<i>Acuerdos alcanzados y pendientes.....</i>	63
9.3.2	<i>Recomendaciones a tener en cuenta.....</i>	63
10	Estudio de Análisis Ambiental.....	65

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 : Resumen de Coordenadas Vértices Geodésicos.....	8
Tabla 3-2 : Características importante de cada puente obtenida en terreno.....	8
Tabla 4.1 Parámetros morfológicos de las cuencas.....	11
Tabla 4.2 Tiempos de concentración cuencas afectadas.....	11
Tabla 4-3: Resumen con datos obtenidos con las distintas formulaciones para los caudales máximos instantáneos.....	13
Tabla 4-4: Caudales instantáneos máximos anuales estimados para el río Liucura en río Liucura, con las distintas distribuciones de probabilidad.....	14
Tabla 4-5 : Caudales instantáneos máximos anuales estimados para el río Trancura antes de Llafenco con las distintas distribuciones de probabilidad.....	14
Tabla 4-6: Caudal medio diario Máximos [m ³ /s].....	15
Tabla 5-1 : Caudales instantáneos medidos en aforos.....	17
Tabla 5-2 : Caudales adoptados para río Voipir.....	18
Tabla 5-3 : Caudales adoptados para Melilahuen.....	19
Tabla 5-4 : Caudales adoptados para el estero Zanjón Seco.....	20
Tabla 5-5 : Caudales adoptados para río Palguín.....	20
Tabla 5-6 : Caudales adoptados para estero Challupen.....	21
Tabla 5-7 : Caudales adoptados para río Trancura en Curarrehue.....	21
Tabla 5-8 : Caudales adoptados para Correntoso.....	22
Tabla 5-9 : Caudales adoptados para Huichatío.....	22
Tabla 5-10 : Caudales adoptados para Molco.....	23
Tabla 6-1 Volumen de hielo/nieve y equivalente en agua por cuenca.....	25
Tabla 6-2. Volúmenes estimados de depósito y lahar en las cuencas afectadas en 1971.....	26
Tabla 6-3 Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 1 (erupción hawaiano-estromboliana).	27
Tabla 6-4 : Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 2 (erupción sub-pliniana) para cada cauce.....	28
Tabla 6-5 : Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 3 (erupción pliniana).....	28
Tabla 8-1: Beneficios Totales y Valor Anual Esperado Eventos Laháricos.....	47
Tabla 8-2: Indicadores de Rentabilidad Proyecto de Obras de Control Laharico.....	48
Tabla 8-3: Resumen Presupuesto de Obras para el Control de Flujos Laharicos Asociados al Volcán Villarrica (Pesos de julio 2014; valores no incluyen IVA).....	49
Tabla 8-4 : Porcentaje de zona afectado, según área de inundación por flujo Laharico (evento 1).....	52
Tabla 8-5 : Porcentaje de zona afectada, según área de inundación por flujo Laharico (evento 1).....	58



INDICE DE FIGURAS

Figura 3-1 : Sectores levantados para estudio de alternativas de mitigación.....	9
Figura 3-3-2 : Vuelo Lidar.....	10
Figura 5-1 : Gráficos de Profundidad, Sección en planta y perfil de velocidades de la medición 3 en el río Trancura.....	17
Figura 7-1: Evento 1 cuenca Zanjón Seco, altura de inundación.....	31
Figura 7-2: Evento 1 cuenca Zanjón Seco, velocidad de inundación.....	32
Figura 7-3: Evento 1 cuenca Correntoso, altura de inundación.....	32
Figura 7-4: Evento 1 cuenca Correntoso, velocidad de inundación.....	33
Figura 7-5: Evento 1 cuenca Huichatío, altura de inundación.....	33
Figura 7-6: Evento 1 cuenca Huichatío, velocidad de inundación.....	34
Figura 7-7: Evento 1 cuenca Molco, altura de inundación.....	34
Figura 7-8: Evento 1 cuenca Molco, velocidad de inundación Fuente:.....	35
Figura 7-9: Evento 1 sistema de cuencas Melillahuén Challupén, altura de inundación.....	35
Figura 7-10: Evento 1 sistema de cuencas Melillahuén Challupén, velocidad de inundación.....	36
Figura 7-11: Evento 1 cuenca Voipir, altura de inundación.....	36
Figura 7-12: Evento 1 cuenca Voipir, velocidad de inundación.....	37
Figura 7-13: Evento 1 sistema de cuencas Turbio, Pedregoso y Trancura, altura de inundación.....	37
Figura 7-14: Evento 1 sistema de cuencas Turbio, Pedregoso y Trancura, velocidad de inundación.....	38
Figura 7-15 : Evento 1 Esteros Molco-Huichatío, altura de inundación	38
Figura 7-16 : Evento 1 Esteros Molco-Huichatío, Velocidades	39
Figura 8-1 : Esquema General Cauces en Estudio.....	40
Figura 8-2 : Perfil de la obra.....	41
Figura 8-3 : Resultados de la modelación con y sin obra en el sistema Turbio–Correntoso	41
Figura 8-4: Sección Tipo Canalización (Km 6,9 hasta Km 11,7)	42
Figura 8-5 : Resultados de la modelación con y sin obra en el cauce Zanjón Seco	43
Figura 8-6: Sección Tipo Canalización Estero Correntoso	44
Figura 8-7 : Resultados de la modelación con y sin obra en el cauce Correntoso.....	44
Figura 8-8: Sección Tipo Canalización Estero Seco (Km 7,4 hasta Km 16,0)	45
Figura 8-9: Sección Tipo Canalización Estero Seco (Km 16,0 hasta Km 17,0).....	45
Figura 8-10 : Resultados de la modelación con y sin obra sistema Estero Seco–Pino Huacho–Melilahuen.....	46
Figura 8-11 Esquema del Plan Regulador Vigente de la Ciudad de Pucón.....	51
Figura 8-12: Áreas de zonificación territorial para la ciudad de Pucón y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.....	52
Figura 8-13 : Loteos irregulares o brujos de la ciudad de Pucón y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.....	53
Figura 8-14 : Poblaciones o viviendas sociales de la ciudad de Pucón y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.....	54
Figura 8-15 : Proyectos Inmobiliarios, ciudad de Pucón y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.....	54
Figura 8-16 : Plan regulador actual para Villarrica y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.....	55
Figura 8-17 : Plan regulador propuesto para Villarrica y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.....	56
Figura 8-18 : Plan regulador Comunal de Villarrica, Sector Lican-Ray y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.....	57
Figura 8-19 : Plan regulador Intercomunal y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.....	58

1 INTRODUCCIÓN

El volcán Villarrica es uno de los volcanes históricamente más activos de Sudamérica. Se ubica al SE y NE de los lagos de origen glacial Villarrica y Calafquén, respectivamente. A sus pies se ubican poblados con importante afluencia turística tales como la ciudad de Pucón, Lican-Ray, Villarrica.

Desde 1558 hasta 2005, el volcán Villarrica tiene un registro histórico de 651 erupciones importantes desde el cono principal y fisuras laterales. Entre los fenómenos precursores descritos para muchas de sus erupciones históricas mayores, se mencionan ruidos subterráneos, actividad sísmica perceptible, débiles explosiones de cenizas y pequeños derrames de lavas sobre los flancos nevados.

Las erupciones históricas han variado desde efusivas a moderadamente explosivas (IEV=0-3), pero el tipo más recurrente de actividad es la formación de lahares, muy destructivos y que han causado más de 100 fatalidades durante el siglo XX (1908, 1948-49, 1963-64, 1971).

Tomando en cuenta los antecedentes expuesto, La Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas (DOH) ve la necesidad de levantar y elaborar estudios geológicos y vulcanológicos para caracterizar los lahares del volcán Villarrica en las áreas que presentan mayor riesgo para la población e infraestructura pública y privada, especialmente en aquellas emplazada en torno a los cauces de los ríos Turbio, Correntoso, Voipir, Melilahuén, delta del río Trancura y esteros Molco -Huichatío, Zanjón Seco y Estero seco- Pino Huacho, todos ellos dentro de la Región de la Araucanía.

Por lo que la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas y el Instituto Nacional de Hidráulica (en adelante INH) suscribieron un convenio; mediante resolución DOH N°182 del 12 de Diciembre del 2011, para la ejecución de la consultoría denominada "CONSTRUCCIÓN MITIGACIÓN RIESGOS VOLCÁNICOS Y GEOLÓGICOS ASOCIADOS, COMUNAS DE VILLARRICA, PUCON Y CURARREHUE, REGION DE LA ARAUCANIA - ETAPA DE PREFACTIBILIDAD" el cual tiene por objetivo principal desarrollar los estudios necesarios que permitan generar, a nivel de prefactibilidad, las obras necesarias para mitigar los riesgos volcánicos y geológicos (lahares) y así evaluar la mejor solución.

1.1 Generalidades

El estudio se desarrolló, en las comunas de Villarrica, Pucón y Curarrehue, región de la Araucanía, Chile, debido a que corresponden a parte de las áreas de influencia del Volcán Villarrica y que pudiesen ser afectadas por lahares, movimientos en masa y otros flujos asociados a la actividad volcánica. El volcán Villarrica, se ubica en el límite entre la Región de la Araucanía y la Región de los Ríos. El cráter central se ubica a los 39° 25'S y 71° 56' O, al sur del lago Villarrica, a 95 [km] al SE de la ciudad de Temuco.

Este es uno de los volcanes históricamente más activos de Sudamérica. Posee un cráter abierto de 200 [m] de diámetro que contiene un lago de lava cuya profundidad varía de 100 a 150 [m], con una fumarola permanente y actividad explosiva débil persistente. El volcán está cubierto por un importante glaciar que se extiende por 30,3 [km²] con un volumen de aproximadamente 8 [km³]

Este volcán está alineado con los volcanes Quetrupillán y Lanín, a lo largo de un lineamiento regional de orientación NO. Cerca de 30 conos adventicios se ubican en sus flancos, agrupados en dos sectores principales: Los Nevados al NE y Chaillupén al SO. El volcán Villarrica estaría activo desde hace más de 100 mil años y sus productos volcánicos corresponden principalmente a lavas, tefras y flujos piroclásticos de composición basáltica a andesítica, y laharos. Su recurrente actividad explosiva postglacial ha producido voluminosos flujos piroclásticos (los más importantes hace 13.900 y 3.900 [años], con volúmenes de 10 y 3 [km³], respectivamente) y ha causado la formación de 2 calderas (de 6,5 x 4,2 [km] y de 2,2 [km] de diámetro).

Desde 1558 hasta 2005, el volcán Villarrica tiene un registro histórico de 65 erupciones importantes desde el cono principal y fisuras laterales. Entre los fenómenos precursores descritos para muchas de sus erupciones históricas mayores, se mencionan ruidos subterráneos, actividad sísmica perceptible, débiles explosiones de cenizas y pequeños derrames de lavas sobre los flancos nevados.

Los procesos más frecuentes que han ocurrido durante esas erupciones, corresponden a emisión de flujos de lavas, la formación de laharos y la proyección de piroclastos. Los principales peligros que pudieran estar asociados a futuras erupciones del volcán Villarrica, son aquellos originados por el escurrimiento de corrientes de lava, la caída de piroclastos, y el paso de violentos flujos laháricos acompañados por la crecida de ríos y esteros. Las erupciones también podrían estar acompañadas por la emisión de gases tóxicos como el HF₂, actividad sísmica local, avalanchas de nieve, incendios forestales, tormentas eléctricas, obstrucción de cursos fluviales y consecuentes alteraciones fisicoquímicas de aguas, suelos y vegetación.

Dependiendo de la época del año y la consecuente cubierta temporal de nieve, los laharos pueden tener diferentes volúmenes. En efecto, si ocurre una erupción de lavas durante la primavera, los laharos serán mayores que aquellos que se pudieran generar en una erupción a fines del verano. Durante la erupción de diciembre de 1971, los laharos que descendieron por el cauce del río Turbio-Currentoso, alcanzaron un volumen total estimado en 20 x 10⁶ [m³].

En el periodo 1900 - 2005, ocho de las manifestaciones volcánicas ocurridas en el volcán Villarrica, han generado corrientes de barro de gran densidad (lahares), lo que representa un 30% del total de las manifestaciones volcánicas en el periodo, los cuales históricamente han bajado por los cauces de los ríos y esteros que se encuentran en las faldas de este (Río Turbio - Currentoso, Estero Zanjón Seco - Carmelito, Currentoso, Molco-Huichatío, Río Chaillupén - Melilahuén, Estero Seco o Diuco y río Vojpir)

Por lo que específicamente las zonas de interés de estudiar corresponden a las zonas donde potencialmente se puede generar un lahar (cauces mencionados anteriormente) y en las cuales existan sistemas estratégicos a proteger, tomando en consideración estos dos aspectos las zonas de mayor interés corresponden a:

- Sector Delta Río Trancura, desde confluencia con Río Turbio hasta su llegada al lago Villarrica, en este sector se encuentra por ejemplo la ciudad de Pucón, el aeropuerto de Pucón, parte del camino internacional.

- Sector estero Zanjón Seco, sector urbano de Pucón, desde su descarga al Lago Villarrica hasta unos 4.000 [m]. aguas arriba. El sector de la desembocadura está dirigido como turismo y esparcimiento, además el cauce para por la vía que une Pucón y Villarrica.
- Sector esteros Correntoso, sistema Molco-Huichatío. En la desembocadura existe una zona hotelera, equipamiento turístico y parque residencial además pasa por el camino que une Villarrica con Pucón.
- Sector Río Voipir, en el sector comprendido entre camino Loncoche-Villarrica y cruce de camino a Lican-Ray. Este cauce se ubica en la zona sur de Villarrica, bordea la localidad de Ñancul y cruza rutas que comunican varias localidades.
- Sector Río Melilahuén, en el sector urbano de Lican-Ray, desde su descarga al Lago Calafquén hasta unos 4.000 m. aguas arriba. Si bien Lican-Ray se encuentra en una cuenca que no se conecta directamente con el Volcán Villarrica, laharos antiguos la han afectado por el desborde del flujo que baja por el cauce del Estero Seco.
- Sector Estero seco, Pino Huacho y desembocadura del Chaillupén al lago Calafquén. El camino que une a Coñarique con la IX región pasa por la desembocadura del Estero Seco, además el desborde de este cauce puede afectar a Lican-Ray.

1.2 Objetivos

El estudio tiene por objetivo general, desarrollar los estudios necesarios que permitan desarrollar a nivel de pre-factibilidad las obras de mitigación de riesgo volcánico, por efecto de Lahares del Volcán Villarrica evaluando las mejores alternativas de obras de ingeniería para mitigar los riesgos en los cauces mencionados.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Levantar y elaborar estudios geológicos y volcanológicos físicos (lahares) para caracterizar los laharos del volcán Villarrica en las áreas que mayor riesgo presenten para la población.
- Elaborar estudios hidrológicos e hidráulicos en las áreas que mayor riesgo presenten para la población.
- Caracterizar, en términos de volúmenes y áreas de los glaciares en las nacientes de cada cauce y cobertura (volumen) de nieve temporal para las zonas identificadas como críticas.
- Definir los escenarios eruptivos probables sobre la base de la historia eruptiva del volcán.
- Seleccionar modelos de simulación, entre los existentes, para la representación numérica de flujo de laharos, que se ajuste a las condiciones topográficas de los cauces en estudio del volcán Villarrica, a las condiciones geológicas de los posibles materiales que podrían constituir los flujos de lodos y escombros.

- Calibrar los resultados del modelo numérico seleccionado mediante la comparación con datos de campo, datos históricos, y con la información obtenida y disponible en estudios anteriores.
- Simular numéricamente el flujo de los lahares a lo largo de cada uno de los cauces en estudio, bajo tres escenarios previamente definidos sobre la probable erupción del volcán y determinar los parámetros físicos de los flujos en los sitios de interés (calados, velocidades, etc.).
- Determinar las posibles áreas de inundación por estos flujos laháricos para los escenarios antes mencionados.
- Generar mapas con la zonificación de inundación por lahares ante distintos escenarios.
- Determinar el peligro asociado a los diferentes tipos de eventos volcánicos sobre las obras de infraestructura existente y el grado de vulnerabilidad de las diferentes obras presentes en el área.
- Determinar los posibles efectos de distintos tipos de fenómenos volcánicos sobre la infraestructura existente.
- Elaborar una ficha por cada cauce, con sus respectivos mapas geológicos y glaciológicos a escala 1:10.000, que incluya perfiles longitudinales y transversales.
- Generar proyectos a nivel de pre-factibilidad con el diseño de obras de mitigación para los cauces que se prioricen en el estudio.
- Modelar y estimar la efectividad de las medidas propuestas en función de la evaluación de los escenarios volcánicos definidos previamente.
- Evaluar la factibilidad de construir obras de mitigación en diversos sectores de los cauces y áreas mencionadas, según priorización de cauces por nivel de riesgo.
- Evaluar el efecto de la construcción de estas obras en la zonificación de peligros de estos cauces (cómo cambiaría).
- Evaluar los posibles impactos ambientales de la construcción de las obras de mitigación propuestas.
- Elaborar a nivel referencial los cálculos presupuestarios y análisis de precios de la alternativa de anteproyecto seleccionada.
- Generar antecedentes para el llamado a licitación de la etapa de diseño de las obras de mitigación.
- Desarrollar procesos de participación ciudadana con distintos actores del ámbito comunal e intercomunal con apoyo de los actores públicos y privados participantes del estudio.

2 Recopilación de antecedentes

En esta etapa se recopilaron y revisaron antecedentes de gabinete, tales como estudios, catastros e información cartográfica. La revisión de antecedentes de gabinete incluyó un total de 31 estudios realizados en la zona por instituciones públicas y privadas que abarcaron diversos temas tales como:

- Geología

- Hidrología
- Glaciología
- Modelos Simulación
- Eventos Históricos Eruptivos

A continuación se indica una breve reseña de algunos de los estudios revisados:

1. *Consultoría Construcción Mitigación Riesgo Volcánico y Geológicos Asociados. Etapa I: Levantamiento Base Cartográfica, Comunas de Villarrica, Pucón y Curarrehue, IX Región. DOH - CyD Ingenieros Consultores. 2007.*

Este estudio tuvo por objetivo generar una base cartográfica actualizada y de detalle de la cuenca del Lago Villarrica, Subcuenca Lago Calafquén y subcuenca del Río Toltén debido a que corresponden a las áreas de influencia del Volcán Villarrica y que pudieran verse afectado por lahar, movimientos en masa y otros flujos asociados a la actividad volcánica. La información generada en este informe se va a utilizar principalmente en los estudios básicos relacionados con topografía y catastro de infraestructura.

2. *Dinámica de la Cobertura Nival entre Las Cuencas de los Río Copiapó y Petrohue, utilizando imágenes satelitales. DGA- Instituto de Geografía, PUC. 2008.*

Este estudio tuvo por objetivo conocer la variabilidad temporal e interanual de la cobertura nival en la zona comprendida entre las regiones de Atacama y de los Lagos, durante el período 2000 y 2007, utilizando imágenes MODIS.

3. *Comparación y Modelación Numérica de Lahares Calientes en Volcán Calbuco y Lahares Fríos en el Volcán Villarrica, Andes del Sur. Ángelo Castruccio Tesis de Magíster en Ciencias Mención Geología Universidad de Chile. 2008.*

Este estudio tuvo por objetivo caracterizar y comprender la dinámica de flujos laháricos fríos y calientes de 2 volcanes activos (Volcanes Calbuco y Villarrica) de la Zona Volcánica Sur del sur de Chile. Como objetivos específicos se planteó:

Establecer un modelo de facies para los lahar "calientes" en el río Tepú, en el flanco nororiental del volcán Calbuco, generados durante la erupción de 1961, para compararlos con las facies definidas para los lahar de 1971 del volcán Villarrica (Castruccio, 2005).

Determinar los mecanismos de generación, transporte y emplazamiento de los lahar calientes del volcán Calbuco, anteriormente mencionados.

Adaptar y calibrar el programa computacional LAHARZ y determinar los parámetros necesarios para el programa computacional MSF para su aplicación al caso de los lahar en los volcanes Villarrica y Calbuco.

Modelar numéricamente la zonificación de las áreas de peligro por inundación generados por lahar en los volcanes Villarrica y Calbuco, a través del uso y comparación de los programas computacionales LAHARZ y MSF, para distintos escenarios eruptivos.

4. *Áreas Sometidas a Riesgos Naturales en la Zona Villarrica - Pucón. Carlos Emparan. Revista Geológica de Chile NO 9, pp. 27,35, 1980.*

En esta publicación se identificaron áreas sometidas al riesgo de corrientes de barro volcánicas o lahares y áreas bajo el riesgo de aluviones. En este estudio se concluye que en general todos los cursos de drenaje que se originan en la base del volcán y su desembocadura constituyen áreas potenciales de riesgo.

5. *Los Riesgos naturales en las áreas lacustres de Villarrica, Calafquen y Panguipulli. Pedro Riffó (IX y X Regiones de Chile) Pedro Riffó – Universidad de La Frontera.*

En esta publicación se realiza una identificación de los potenciales riesgos de tipo natural en las zonas de Villarrica, Calafquen y Panguipulli (Regiones IX y X de Chile). Adicionalmente se hacen referencias al evento eruptivo del 29 de diciembre de 1971 que generaron lahares por los cursos de los ríos Correntoso, Carmelito, Voipir y Chailupén.

6. *Plan de Ordenamiento Territorial Comuna de Pucón. Aportado por la SUBDERE – Municipalidad de Pucón. Estudio elaborado por el Laboratorio de Planificación Territorial de la Universidad Católica de Temuco durante el año 2003. Escala 1:50.000.*

Criterios de diseño se utilizaran en la etapa Alternativas de Mitigación etapa de pre factibilidad.

7. *Riesgos Geológicos: Técnicas de Análisis y Mitigación. Miguel Llorente, Luis Laín. Revista Enseñanza de las Ciencias de la Tierra ISSN: 1132-9157, Páginas 232-241. 2009.*

En este documento se entregan orientaciones que posibiliten el análisis de las amenazas naturales y de las condiciones de vulnerabilidad de los componentes estratégicos existentes en el territorio. Adicionalmente se tratan algunos criterios y elementos que posibilitan la cuantificación y evaluación del riesgo.

8. *Volcán Villarrica. Geología y Evaluación del Riesgo Volcánico, Regiones IX y X, 39° 25' S. Texto Mapa Geológico a escala 1:50.000 y Mapa de Riesgo Volcánico a escala 1:50.000. Aportado por el Servicio Nacional de Geología y Minería.*
9. *Documento N° 17. Mapa de Peligros del Volcán Villarrica Regiones de La Araucanía y de Los Lagos. H. Moreno (2000). Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:75.000.*

3 Trabajos Topográficos

Los estudios topográficos tuvieron por objetivo realizar el análisis de los antecedentes topográficos y corregir o complementar los antecedentes topográficos en los sectores de riesgo definidos en la primera etapa del estudio.

Los estudios topográficos se subdividen en cuatro fases que permiten caracterizar los principales aspectos y consideraciones correspondientes a las labores de vinculación geodésica, levantamientos topográficos y batimétricos de los ríos que conforman toda la zona en estudio y se encuentran en detalle en **Anexo C - Topografía**

Las campañas de terreno fueron ejecutadas por la Unidad de Operaciones del Instituto Nacional de Hidráulica (INH) y la empresa FUGRO para el levantamiento fotogramétrico, dentro de las labores realizadas se pueden mencionar:

- I. Elaborar una red de vértices geodésicos en cada cauce, con vinculación a partir de vértice geodésico del Instituto Geográfico Militar (IGM) y realización levantamiento topo batimétrico mediante perfiles de los en el área de estudio.
- II. Levantamiento topográfico de secciones en obras viales que atraviesan los principales cauces en estudio.
- III. Levantamiento de perfiles transversales en zonas críticas de escurrimiento (cambios de pendiente longitudinal brusco).
- IV. Levantamiento con sistema laser aerotransportado en zonas de difícil acceso con topografía tradicional.

3.1 Levantamiento de terreno Fase I y II

La fase I de los trabajos topográficos está enfocados principales en aspectos y consideraciones correspondientes a las labores de vinculación geodésica, levantamiento topográfico de los ríos priorizados en la etapa anterior y sus estructuras.



Tabla 3-1 : Resumen de Coordenadas Vértices Geodésicos.

VERTICE	HUSO 18		HUSO 19		ALTURA ORTOMETRICA
	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	
PUCO	758855,443	5649301,350	241215,712	5649303,710	238,254
ZS01	758337,816	5646574,627	240879,967	5646548,666	226,229
ZS02	760382,425	5645102,530	243017,677	5645215,404	417,099
ZS03	760349,339	5643728,248	243075,819	5643841,984	518,371
VILL	738523,314	5647934,483	221016,295	5646591,845	245,441
ML01	745244,184	5625282,491	229228,979	5624431,767	204,987
ML02	743566,028	5626755,541	227456,177	5625790,068	263,420
ML03	744566,766	5628251,782	228355,279	5627349,871	310,296
TR00	762114,033	5652629,295	244246,615	5652840,144	214,393
TR1	764804,813	5649259,519	247154,549	5649656,211	226,261
TR02	765580,563	5648497,536	247979,024	5648947,371	235,474
V001	739523,173	5642302,967	222387,838	5641037,664	302,337
V002	738673,206	5644951,758	221363,743	5643624,866	288,737
V003	732224,049	5648742,497	214675,432	5646980,609	254,772

Tabla 3-2 : Características importante de cada puente obtenida en terreno.

Cauce	Puente	Cota pavimento [m]	Cota Luz [m]	Pilas	Ancho pila [m]	Ancho puente [m]	Largo puente [m]
Estero Correntoso	Correntoso	238.72	237.47	3	0.5	7	72
Voipir	Voipir en Ñancul (ruta S-91)	258.8	257.09	1	0.6	10	36.25
	Ferroviario	263.81	262.89	-	-	5	41.8
	Sta. Magdalena (ruta S-759)	270.18	268.9	-	-	4	19.22
	Puente de madera (ruta S-759)	282.8	282.18	1	0.7	4	23.86
	Puente en carretera (Ruta S-807)	291.87	290.23	-	-	10	26.23
	Voipir (ruta S-95-T)	308	306.2	1	1	10	29
Melilahuen	Cariman	206.64	206.32	1	0.2	3.2	31.6
	Melilahuen	226.01	224.82	-	-	10	26
Zanjón Seco	Carmelito	227.73	226.51	-	-	10	17.7
	Zanjon Seco	405.47	403.62	-	-	4.5	20
Huichatio	Huichatio	224.16	223.71	1	0.9	9.5	30
Trancura	Quelhue	237.66	235.09	1	2	13.79	142.44
Turbio	Turbio	304.26	302.91	-	-	8	20
Molco	Molco	230.67	229.50	1	0.77	9.5	32
	Molco 1	342.41	341.98	-	-	8	10



3.2 Levantamiento de terreno Fase III

Este levantamiento fue enfocado principalmente a la recolección de datos destinados a complementar y corregir la información topográfica correspondiente a la morfología de los cauces en relación a la pendiente de fondo y las secciones transversales para la etapa de diseño de alternativas de mitigación estructurales. Los datos levantados corresponden a:

- Estero Seco (Challupen), sectores 1 al 5 (45 perfiles).
- Río Correntoso, sectores 1 y 2 (12 perfiles).
- Zanjón Seco, sectores 1 al 4 (49 perfiles).



Sectores Levantados 1 al 5, en estero Challupen



Ubicación Sectores Levantados río Correntoso.



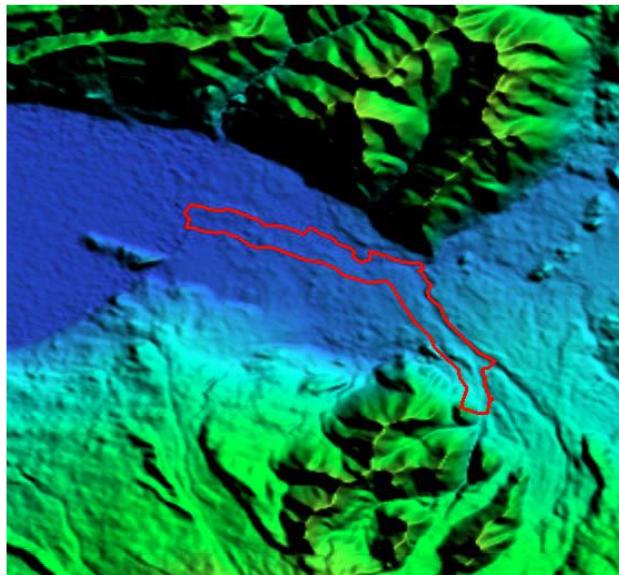
Ubicación Sectores Levantados del 1 al 5 en estero Zanjón Seco.

Figura 3-1 : Sectores levantados para estudio de alternativas de mitigación.

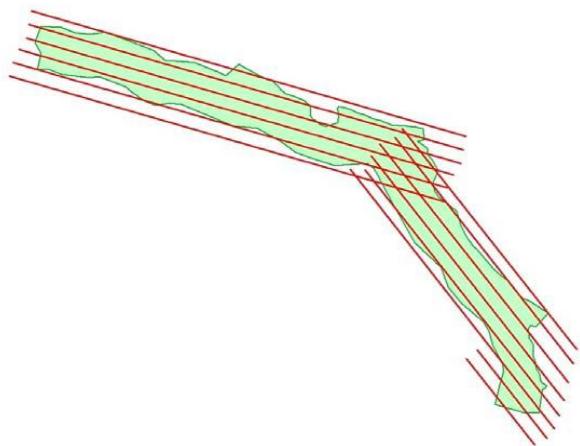
3.3 Levantamiento de terreno Fase IV

Esta etapa de la obtención de datos de terreno se refiere puntualmente, en esta fase se realizan mediciones a partir de vuelos aerofotogramétricos, con láser aerotransportado y cámara aérea digital, el

cual es ejecutado por la empresa FUGRO INTERRA S.A., Se obtuvo información a escala 1:1.000, modelo de curvas de nivel principales cada 1,0[m] y curvas índice cada 5,0[m] en el sector levantado.



Modelo de elevación SRTM y área de levantamiento
lidar



Líneas de vuelo

Figura 3 -3-2 : Vuelo Lidar

4 Estudio Hidrológico

4.1 Objetivos específicos

El objetivo específico del estudio hidrológico consistió en la determinación de crecidas asociadas a los períodos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100 y 500 años por una condición normal de avenidas causadas por efecto de las precipitaciones y una condición extraordinaria producto del derretimiento brusco de nieve. Los resultados obtenidos de este análisis se utilizaron para generar una modelación hidráulica unidimensional de las cuencas afectadas por los laháres del volcán Villarrica.

4.2 Metodología utilizada

Para estimar las crecidas pluviales en cuencas sin control fluviométrico se utilizaron los métodos indirectos de precipitación escorrentía propuestos en el "Manual de Crecidas en Cuencas sin Información Fluviométrica" desarrollado por la DGA (1995). En el caso de cuencas con información fluviométrica se ajustaron modelos probabilísticos a las series medidas. Si el punto de extensión de estadística estuviera alejado del punto de control fluviométrico se trasladaron los resultados por medio de transposición.

Para la estimación de las crecidas por derretimiento nival se aplicó el método propuesto en el manual de la DGA mencionado anteriormente.

4.3 Parámetros morfológicos de las cuencas

Las cuencas de los principales cauces de descarga de lahar corresponden a los valles de los ríos Turbio-Pedregoso, Zanjón Seco-Carmelito, Correntoso, Molco-Huichatío, Voipir, Chaillupén. Para obtener los parámetros morfológicos de las cuencas se dispuso de la información generada en la Etapa I del proyecto Construcción Mitigación riesgo volcánico y geológicos asociados, "Levantamiento base cartográfica, comunas de Villarrica Pucón y Curarrehue, IX Región" realizado en agosto de 2007 por la empresa Cruz y Dávila Ingenieros Consultores.

Los parámetros relevantes determinados fueron la longitud del cauce principal (L), desnivel máximo de la cuenca (H), pendiente media de la cuenca (S), pendiente media de la cuenca, área nival (An) y área total (A). Los resultados obtenidos utilizando el software ArcGis y su módulo Archydro.

Tabla 4.1 Parámetros morfológicos de las cuencas

Caucos	Zona homogénea	Ap [km ²]	An [km ²]	A [km ²]	L [km]	H (m)	Pendiente S[%]
Turbio - Pedregoso	xp	52.91	19.92	72.83	23.02	2,048	8.89
Melilahuen	wp	52.70	-	52.7	18.61	862	4.20
Huichatío	wp	24.40	1.31	25.71	25.25	1,873	8.05
Molco	wp	20.36	1.66	22.02	22.02	1,915	8.80
Correntoso	wp	12.64	5.49	18.13	18.13	2,479	13.00
Zanjón seco	wp	16.99	5.77	22.76	17.35	2,330	13.40
Voipir	wp	150.10	4.90	155	25.00	2,530	4.00

4.3.1 Tiempo de concentración

Se utilizaron 3 metodologías para estimar el tiempo de concentración (Método California Highways and Public Works de EEUU, Método Norma Española y Velocidad media de escurrimiento), concluyéndose que la metodología que mejor se ajusta a las condiciones de las cuencas en estudio, es el de la norma española por ser cuencas en donde la redes de flujo están bien definidas

Tabla 4.2 Tiempos de concentración cuencas afectadas

Caucos	Tc [hr]		
	Española	California	V. Media
Turbio Pedregoso	5.15	1.89	5.69
Melilahuen	5.05	2.06	6.63
Huichatío	5.63	2.17	6.55
Molco	4.99	1.84	5.47
Correntoso	4.00	1.33	3.72

Zanjón seco	3.84	1.30	3.51
Voipir	6.39	1.91	9.13

4.4 Determinación de Caudales Máximos Cuencas sin control fluviométrico

La determinación del caudal de cada una de las cuencas se realizó mediante los métodos DGA-AC, Verni y King Modificado, Racional, descritos en el “Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información pluviométrica” de la Dirección de Aguas del Ministerio de Obras Pública.

En el caso del uso de la formula racional, se utilizó el coeficiente de escorrentía propuesto por Ven Te Chow (1994) para áreas no desarrolladas con pendiente entre 2-7% ($C(T=10)=0,36$) y pendiente superior a 7% ($C(T=10)= 0,41$).

Los métodos utilizados contemplan el cálculo de los períodos de retorno hasta 100 años por lo que para el periodo de retorno de 500 años se utiliza una regresión logarítmica de la forma $a * \ln(T) + b$ para el para el cálculo del caudal instantáneo.

Tabla 4-3: Resumen con datos obtenidos con las distintas formulaciones para los caudales máximos instantáneos.

Periodo de recolección		Cosef		Turbio - Pedregoso		Mellahuén		Huillard		Moloy		Cortentoso		Challupen			
Periodo de recolección	Todos	DGA	Ventri Kring	DGA	Ventri Kring	DGA	Ventri Kring	DGA	Ventri Kring	DGA	Ventri Kring	DGA	Ventri Kring	DGA	Ventri Kring		
Cosef	a	11.71	16.85	14.06	9.03	13.28	10.29	4.27	6.74	5.11	3.58	5.75	4.56	1.62	2.71	2.42	
Cosef	b	35.82	60.13	74.30	26.08	47.41	54.36	12.33	24.07	26.99	10.34	20.53	24.06	4.65	9.67	12.81	
Periodo de recolección	Todos	2	42	69	81	32	54	59	15	28	29	13	24	26	6	11	14
Cosef	a	5	53	90	100	41	71	73	19	36	36	16	31	32	7	14	17
Periodo de recolección	Todos	10	60	99	108	47	78	79	22	40	39	18	34	35	8	16	19
Cosef	b	50	80	128	132	62	101	96	29	51	48	24	44	45	11	21	23
Periodo de recolección	Todos	100	88	135	136	68	106	99	32	54	49	27	46	44	12	22	23
Cosef	a	500	107	165	162	82	130	118	39	66	59	33	56	52	15	26	28
Periodo de recolección	Todos	2	2.16	3.51	3.32	25.01	33.36	25.68	58.19	70.24	47.71	19.05	26.16	17.52	7.10	10.68	7.79
Cosef	b	6.24	12.54	17.55	72.21	119.09	135.63	168.01	250.69	252.01	55.01	96.35	92.54	20.50	38.13	41.12	
Periodo de recolección	Todos	2	8	14	19	89	136	147	207	287	273	68	107	100	25	44	45
Cosef	a	5	10	19	24	114	179	183	264	376	339	87	140	125	32	57	55
Periodo de recolección	Todos	10	11	21	25	129	197	197	300	415	366	98	154	134	37	63	60
Cosef	b	50	15	27	31	170	254	240	396	535	447	130	199	164	48	81	73
Periodo de recolección	Todos	100	16	28	32	187	267	248	435	563	461	143	209	169	53	86	75
Cosef	a	500	20	34	38	223	326	293	530	687	548	173	256	201	65	105	90

4.5 Determinación de Caudales Máximos Cuencas con control fluviométrico

4.5.1 Análisis de frecuencia caudales máximos instantáneos

Los caudales para el río Trancura y Liucura se estimaron con las estaciones de la DGA denominadas Trancura antes de río Llafenco (BNA 09414001-3) y río Liucura en Liucura BNA 09416001-4 respectivamente.

Se realizó un análisis de frecuencia donde se utilizaron 3 distribuciones de probabilidad Gumbel, Gama y Log Normal de los datos de caudales máximos instantáneos anuales para la estación seleccionada, en este análisis se incluye una prueba de datos dudosos y el test de bondad Kolmogorov-Smirnov para las dos estaciones.

Tabla 4-4: Caudales instantáneos máximos anuales estimados para el río Liucura en río Liucura, con las distintas distribuciones de probabilidad

T (años)	Analítico			Grafico
	Gumbel	Gama Inv.	Log. Normal	
2	235	237	225	246
5	336	341	356	340
10	402	406	453	412
50	548	537	689	578
100	610	589	800	649
500	752	703	1,080	815

Tabla 4-5 : Caudales instantáneos máximos anuales estimados para el río Trancura antes de Llafenco con las distintas distribuciones de probabilidad

T (años)	Analítico			Grafico
	Gumbel	Gama Inv.	Log. Normal	
2	555	558	532	520
5	805	818	837	820
10	971	981	1,060	1,047
50	1,335	1,314	1,607	1,574
100	1,489	1,446	1,861	1,801
500	1,845	1,739	2,505	2,328

4.6 Método DGA AC Nival.

El método denominado DGA AC para crecidas de deshielo, corresponde a un análisis regional de crecidas de período de deshielo desarrollado en base a análisis de frecuencias efectuados a las series de excedencia para período nival de caudales medios diarios máximos y caudales instantáneos máximos, correspondiente a 234 estaciones de control existente en el país. (DGA, 1995)

Tabla 4-6: Caudal medio diario Máximos [m³/s].

Periodo de retorno T (años)	Turbio - Correntoso	Huichatío	Molco	Correntoso	zanjón seco	Voipir	Curarrehue	Palguín	Challupen
2	11.30	0.74	0.94	3.11	3.27	2.78	7.56	26.93	4.70
5	16.84	1.11	1.40	4.64	4.88	4.14	11.27	40.15	7.00
10	20.54	1.35	1.71	5.66	5.95	5.05	13.75	48.96	8.54
50	35.74	2.35	2.98	9.85	10.35	8.79	23.92	85.19	14.86
100	41.29	2.72	3.44	11.38	11.96	10.16	27.63	98.41	17.17
500	53.35	3.51	4.45	14.70	15.45	13.12	35.70	127.16	22.19

5 Estudio Hidráulico y Mecánica de Suelos

Con los antecedentes disponibles se realizó el análisis hidráulico para determinar los niveles de aguas máximas y ejes hidráulicos para crecidas de períodos de retorno 2, 5, 10, 50, 100 y 500 años, para las cuencas del Trancura, Zanjón Seco, Voipir y Melilahuen. Estas cuencas se encuentran priorizadas dada la alta cantidad de población que podrían afectar crecidas en los cauces.

Para las modelaciones hidráulicas de los cauces Zanjón Seco, Voipir y Melilahuen se utilizó el modelo Hec-Ras, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers) y tiene objetivo modelar sistemas hidráulicos de flujo de agua a través de ríos canales, puertos, obras públicas, entre otros.

Debido a la complejidad que presenta el río Trancura en el sector del delta, donde el río se divide en numerosos brazos, se utiliza el modelo bi-dimensional Flo-2D, este es un modelo de flujo de multidirección, en que las ecuaciones de movimiento se aplican mediante el cálculo de la velocidad de flujo promediado a través de una grilla, en donde hay ocho posibles direcciones de flujo. Todos los cálculos de la velocidad son esencialmente unidimensionales en la naturaleza, por lo que se resuelve de forma independiente de las otras siete direcciones. La estabilidad de este esquema numérico explícito se basa en criterios estrictos para controlar el paso del tiempo

5.1 Materiales y métodos

5.1.1 Coeficientes de rugosidad

El cálculo de los coeficientes de rugosidad para cada uno de los cauces en estudio se desarrolló utilizando fotografías de los ríos y la estimación del coeficiente de Manning según el procedimiento que se encuentra en el Manual de Carreteras -Volumen 3, Junio 2004 (MDC v3).

Para la determinación del coeficiente de rugosidad del río Trancura se utilizó el método de Cowan descrito en el MDC v3, puesto que la metodología anterior no es tan detallada para cursos con ancho superficial mayores a 30 [m], en cambio el método de Cowan clasifica las condiciones del canal para determinar su rugosidad.

5.1.2 Aforos.

La metodología de medición para realizar los aforos consiste en la utilización de un El sistema RiverSurveyor de SonTek es un sistema Perfilador Doppler Acústico (ADP) robusto y de alta precisión, específicamente diseñado para medir el caudal de los ríos, las corrientes de agua en 3-Dimensiones, calados, y la batimetría de una embarcación en movimiento o parada.

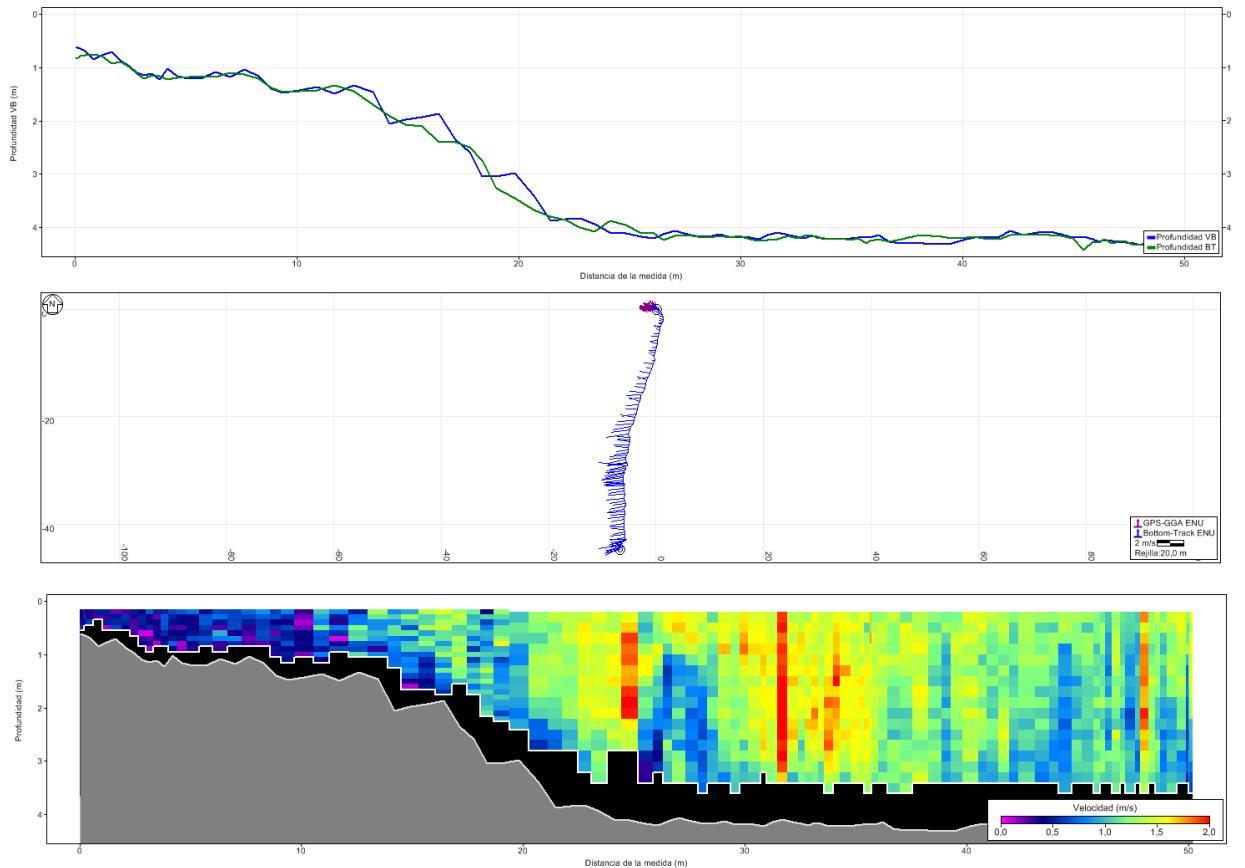


Figura 5-1 : Gráficos de Profundidad, Sección en planta y perfil de velocidades de la medición 3 en el río Trancura

Tabla 5-1 : Caudales instantáneos medidos en aforos.

Cauce	Caudal m ³ /s	Fecha medición	hora inicio	hora fin	nivel de Agua (m sobre el nmm)
Trancura	152.776	18-06-2013	16:44:49	17:13:03	234.61
Turbio	4.325	19-06-2013	16:25:16	16:43:34	298.54
Voipir	12.42	20-06-2013	10:43:27	11:00:04	253.99
Melilahuen	3.437	20-06-2013	13:36:00	14:23:25	202.07
Huichatío	0.184	20-06-2013	16:56:24	17:05:45	213.18

5.1.3 Socavación.

Para la estimación de la socavación en los cauce se utilizaron las formulaciones de Neill y Lischhtvan -Lebediev , propuestas en el Manual de Carretera V3. Dichos método permiten estimar las socavaciones por franjas, de modo que otorga una idea de la distribución de los des- censos del lecho a lo largo de la sección. Para las dos formulaciones se utilizaron las siguientes consideraciones:

- Cada perfil de velocidad se subdividió en 20 subsecciones para el canal principal y 10 secciones por cada ribera.
- Se realizó el cálculo de la socavación para un periodo de retorno de 50 años.
- Para la estimación del cambio de fondo producto de una crecida, se utilizó como información base los resultados de las modelaciones hidrodinámica y diámetros característicos de los sedimentos resultado del estudio de mecánica de suelo en el caso de Palguín y Curarrehue en los cuales no se cuenta con granulometrías se utilizó la muestra M-VILL-N°009 correspondiente al río Trancura.
- Dada la gran cantidad de perfiles el análisis de la socavación se realizó el cálculo en la totalidad de los perfiles del modelo hidráulico pero se presentan los resultados de los perfiles en zonas pobladas o de mayor importancia.

5.2 Resultados

Todos los detalles sobre la metodología, antecedentes, reología y de lo expuesto en este capítulo se encuentra en extenso en el DVD 1 - **Anexo A : Informes De Hidráulica y Mecánica Fluvial de los Cauces, en Estudio**

5.2.1 Río Voipir

Se modelaron los siguientes caudales, calculados en el Informe Hidrológico.

Tabla 5-2 : Caudales adoptados para río Voipir.

Periodo de retorno T [años]	Q [m ³ /s]
2	148
5	182
10	196
50	254
100	267
500	326

Para el uso de los resultados del modelo se debe tener en cuenta que al superponer la información topográfica 1:1000 y 1:10.000 no se ajustó a lo medido en la campaña de terreno por lo que se hizo calzar con el método de prueba y error para obtener la mejor representación posible del terreno existente, por lo que los resultados muestran una estimación de las áreas de inundación.

La geomorfología del río Voipir tiene una caja bien definida, lo que favorece el encauzamiento del flujo y previene desbordes, por otra parte la presencia de meandros en algunos sectores, provocan un cambio brusco de dirección en el flujo produciendo concentraciones de energía en las curvas, esto genera condiciones que favorecen la socavación de la ribera del borde externo del río en ese sector.

La modelación de Voipir, para el periodo de retorno de 5 años no se identifica zonas de desbordes en el río en la zona de Ñancul.

Se realizaron 4 mediciones en Junio del 2013, aguas arriba del puente Voipir en la localidad de Ñancul, de las cuales de obtuvo velocidades y caudales a lo largo del perfil que promediadas resultan 12,42 [m³/s] y 0.804 [m/s] respectivamente, un resumen de dichas mediciones quedan expresadas en siguiente tabla. Dicho valor calculado es aproximadamente 11 veces menor que la crecida con periodo de retorno de 2 años

La comparación de los resultados del modelo con las mediciones realizadas en terreno muestra un que el modelo sobreestima en un 15 % las velocidades subestima en un 50 % la altura de agua en el perfil medido en terreno.

El método de Neill presenta valores de socavación mayores a los obtenidos con el método de Lischtvan-Levediev, con 4,93 [m] en el perfil 10 mientras que para Neill calcula una socavación de 6,75 [m].

5.2.2 Estero Melilahuen

Se modelaron los siguientes caudales, calculados en el Informe Hidrológico.

Tabla 5-3 : Caudales adoptados para Melilahuen.

Periodo de retorno Tr [años]	Q [m ³ /s]
2	59
5	73
10	78
50	101
100	106
500	129

Para el uso de los resultados del modelo se debe tener en cuenta que al superponer la información topográfica 1:1000 y 1:10.000 no se ajustó a lo medido en la campaña de terreno por lo que se hizo calzar con el método de prueba y error para obtener la mejor representación posible del terreno existente, por lo que los resultados muestran una estimación de las áreas de inundación.

Se realizaron 6 mediciones en Junio del 2013, en la desembocadura del río Melilahuen de las cuales de obtuvo velocidades y caudales a lo largo del perfil que promediadas resultan 3,437 [m³/s] y 0,536 [m/s] respectivamente, un resumen de dichas mediciones quedan expresadas en siguiente tabla.

Las modelaciones muestran desbordes del río en los perfiles 2, 3 y 4 que corresponde a parte de la zona poblada de Licanray para periodos de retorno de 2 años en adelante, aguas arriba de esto no se aprecian desbordes en zonas habitadas.

Para un estudio de inundación que entregue resultados de mayor precisión se debe realizar topografía de mayor resolución.

La socavación máxima calculada es de 8,85 [m] según la formulación de Neill y de 6,77 [m] según Lischtvan-Levediev, esta se produce aproximadamente 10,4 [km] aguas arriba de la desembocadura.

5.2.3 Estero Zanjón Seco

Se modelaron los siguientes caudales, calculados en el Informe Hidrológico.

Tabla 5-4 : Caudales adoptados para el estero Zanjón Seco

Periodo de retorno T [años]	Q [m ³ /s]
2	19
5	24
10	25
50	31
100	32
500	38

Para el uso de los resultados del modelo se debe tener en cuenta que al superponer la información topográfica 1:1000 y 1:10000 no se ajustó a lo medido en la campaña de terreno por lo que se hizo calzar con el método de prueba y error para obtener la mejor representación posible del terreno existente, por lo que los resultados muestran una estimación de las áreas de inundación.

El estero Zanjón Seco tiene una caja bien definida, lo que favorece el encauzamiento del flujo previniendo así desbordes, por lo que en los resultados del modelo no se identifican zonas de inundación para ninguno de los períodos de retorno estudiados.

La socavación máxima calculada a lo largo del cauce es de 9.29 [m] según la formulación de Neill y de 8.47 [m] según Lischtvan-Levediev, esta se produce aproximadamente 4 [km] aguas arriba de la desembocadura.

5.2.4 Río Palguín

Se modelaron los siguientes caudales, calculados en el Informe Hidrológico.

Tabla 5-5 : Caudales adoptados para río Palguín

Periodo de retorno T [años]	Q [m ³ /s]
2	107
5	140
10	154
50	199
100	209
500	256

Las modelaciones muestran que desde el perfil 1 al 40 existen desbordes del cauce desde periodos de retornos mayores a 2 años, esto se debe a que la fuente de información para la extracción de los perfiles no tienen la resolución suficiente para representar el curso de agua generando grandes valles planos inundados, aguas arriba del perfil 41 el cauce del río queda mejor definido por encontrarse en una zona de alta pendiente.

Para un estudio de inundación que entregue resultados de mayor precisión se debe realizar topografía de mayor resolución.

La socavación máxima calculada es de 19.89 [m] según la formulación de Neill y de 11.33 [m] según Lischtvan-Levediev, esta se produce en el perfil 82.

5.2.5 Estero Challupen

Se modelaron los siguientes caudales, calculados en el Informe Hidrológico.

Tabla 5-6 : Caudales adoptados para estero Challupen

Periodo de retorno T [años]	Q [m ³ /s]
2	45
5	55
10	60
50	73
100	75
500	90

No se identifican zonas de desborde para ninguno de los períodos de retorno analizados.

El método de Neill presenta valores de socavación mayores a los obtenidos con el método de Lischtvan-Levediev, con 6,62 [m] en el perfil 88 mientras que para Neill calcula una socavación de 6,11[m].

5.2.6 Trancura en Curarrehue

Se modelaron los siguientes caudales, calculados en el Informe Hidrológico.

Tabla 5-7 : Caudales adoptados para río Trancura en Curarrehue

Periodo de retorno T [años]	Q [m ³ /s]
2	287
5	376
10	415
50	535
100	563
500	687

Las modelaciones muestran desbordes para períodos de retorno de 2 años en adelante en el sector de Curarrehue y aguas arriba de este, la tendencia de los desbordes son hacia el lado este de la localidad igualmente se aprecia que el área de inundación alcanza viviendas.

Para un estudio de inundación que entregue resultados de mayor precisión se debe realizar topografía de mayor resolución.

La socavación máxima calculada es de 17.7 [m] según la formulación de Neill y de 10.24 [m] según Lischtvan-Levediev, esta se produce en el perfil 216.

5.2.7 Estero Correntoso

Se modelaron los siguientes caudales, calculados en el Informe Hidrológico.

Tabla 5-8 : Caudales adoptados para Correntoso

Periodo de retorno Tr [años]	Q [m ³ /s]
2	14
5	17
10	19
50	23
100	24
500	28

El método de Neill presenta valores de socavación mayores a los obtenidos con el método de Lischtvan-Levediev, con 3,81 [m] en el perfil 36 mientras que para Neill calcula una socavación de 4,61 [m] en el mismo perfil.

5.2.8 Estero Huichatio

Se modelaron los siguientes caudales, calculados en el Informe Hidrológico.

Tabla 5-9 : Caudales adoptados para Huichatio.

Periodo de retorno Tr [años]	Q [m ³ /s]
2	29
5	26
10	40
50	51
100	54
500	66

Producto de la resolución de la topografía no se puede representar el curso del en el sector poblado, el curso del estero no se ajusta al curso que se ve en la fotografía, esto es resultado de la resolución de la cartografía utilizada, la cual tiene curvas cada 10 [m].

Se realizaron 3 mediciones en Junio del 2013, en la desembocadura del Estero Huichatio de las cuales de obtuvo velocidades y caudales a lo largo del perfil que promediadas resultan 0.34 [m³/s] y 0.238

[m/s] respectivamente, un resumen de dichas mediciones quedan expresadas en siguiente tabla. La velocidad obtenida de la modelación fue de 0.63 [m/s] para un caudal de 0.34 [m³/s], por lo que el modelo sobreestima las velocidades.

5.2.9 Esteros Molco

Se modelaron los siguientes caudales, calculados en el Informe Hidrológico.

Tabla 5-10 : Caudales adoptados para Molco.

Periodo de retorno Tr [años]	Q [m ³ /s]
2	26
5	32
10	35
50	44
100	46
500	56

Las modelaciones muestran desbordes para períodos de retorno de 2 años en adelante, aguas arriba de la desembocadura estos se pueden observar en los planos de los anexos.

Para un estudio de inundación que entregue resultados de mayor precisión se debe realizar topografía de precisión en los lugares de interés.

La socavación máxima calculada es de 6,56 [m] según la formulación de Neill y de 5,82 [m] según Lischtvan-Levediev, esta se produce en el perfil 111 aguas arriba de la desembocadura.

6 Estudio Glaciológico y Vulcanológico

Para caracterizar los lahares del volcán Villarrica en las áreas que mayor riesgo presenten para la población en los cauces Turbio, Pedregoso, Zanjón Seco, Voipir, Molco–Huichatío, Chaillupén–Melilahuén, Palguín y delta del río Trancura, se levantó y elaboró un estudio geológico y volcánológico en los sectores antes mencionados.

Se caracterizan los lahares existentes en el volcán Villarrica. Para ello se ha elaborado una cartografía de los depósitos laháricos de la erupción de 1971 y se han determinado sus espesores. A partir de ello se ha realizado una estimación de los volúmenes de los depósitos para cada cauce y añadiendo unos porcentajes de volúmenes de agua, se ha estimado el volumen total del lahar para cada cauce. A partir de las características texturales de los depósitos se ha estimado los parámetros reológicos y se ha caracterizado el tipo de flujo.

Se calcula el volumen de agua en forma de hielo y/o nieve disponible para ser fundido en una erupción. A partir de las mediciones de espesor de hielo realizadas mediante radar y de las estimaciones de cantidad de nieve máxima en la temporada invernal, se calcula el volumen equivalente en agua. Con estos datos y estimando áreas y porcentajes de fusión/erosión para cada escenario eruptivo se calcula el

volumen de agua que puede llegar a fundirse y bajar por cada cauce. Añadiendo a estos volúmenes concentraciones de sólidos características, se obtiene el volumen de los lahares que pueden llegar a bajar en cada escenario eruptivo y por cada cauce.

Se han definido 3 escenarios eruptivos para el volcán Villarrica. **El escenario 1** sería el más probable y se define como una erupción estromboliana o hawaiana con tasas de emisión de lavas tales que provoquen lahares (se estima el punto crítico en alrededor de 100 [m³/s]). En este escenario se produciría una emisión de materiales piroclásticos con alturas de la columna inferiores a 5 Km sobre el volcán y la efusión de coladas de lava que históricamente han sido de composición basalto-andesítica. Se define una recurrencia para este escenario de 1 erupción de este tipo cada 5-10 años. **El escenario 2** estaría provocado por una erupción de tipo sub-pliniano con emisiones importantes de tefra que afectarían los alrededores del volcán, se generaría flujos y oleadas de piroclásticos que descenderían por todos los flancos del volcán, caída de tefra, fallas y avalanchas debido al movimiento sísmico de la erupción. Para este escenario se ha estimado una recurrencia de 800 años. **El escenario 3** se considera el menos probable y se definiría como una erupción pliniana de impacto regional, con volúmenes considerables de tefra, importantes flujos de piroclastos y el probable colapso del edificio volcánico. El tiempo de recurrencia se estima en 10.000 años.

Para la estimación de los caudales de los lahares, en cada escenario se han considerado dos posibilidades, (1) que la erupción ocurra a finales de verano, momento en el cual la práctica totalidad de la nieve de temporada ha desaparecido y solamente queda disponible para fusión el hielo glaciar, este subescenario correspondería al volumen mínimo de agua disponible; y (2) el subescenario correspondiente al volumen máximo de agua disponible que sería aquel en el cual la altura de nieve de temporada es máxima.

Según los antecedentes y las observaciones en terreno se consideran zonas críticas de riesgo los sistemas Turbio-Pedregoso-Trancura, Zanjón Seco, Correntoso, Molco-Chehuilco-Huichatío, Voipir y Estero Seco-Chaillupén-Melilahuén. En cuanto al estero Melilahuén, si bien no nace en las faldas del volcán y por lo tanto no debería canalizar flujos laháricos, según Moreno (1993) existen sedimentos laháricos antiguos en el abanico de Licán-Ray producto del rebasamiento del estero Chaillupén al Melilahuén.

Se considera menor el riesgo de que los lahares del volcán Villarrica afecten al cauce del Palguín. También se considera prioritario el estudio del brazo derecho del Zanjón Seco, no incluido en este informe (centrado en los lahares de 1971) pero que históricamente (erupción de 1908) han afectado a la ciudad de Pucón.

Para calcular el volumen de agua máxima que puede aportar el manto nival a los lahares, se estimó el manto nival máximo en 50 años. Para ello se utilizaron los datos de alturas de nieve obtenidos por Moreno (1993) para el invierno del año 1992 y los datos de precipitaciones en la zona.

Se utilizó esta metodología debido a que lamentablemente no existen registros de acumulación de nieve en el volcán Villarrica y que una estimación directa a partir de la precipitación en zonas bajas

puede tener un error muy importante debido al cambio de clima y de régimen de precipitaciones entre las zonas bajas y zonas de mayor altura.

El volumen estimado del manto nival máximo en 50 años en las cuencas estudiadas es de 754×10^6 [m³] que equivalen a 452×10^6 [m³] de agua. El total de superficie glaciar sobre el volcán Villarrica tiene un área actual estimada de 28,4 [km²]. Las cuencas con mayor volumen nival son: el río Turbio, el río Palguín y el río Pedregoso, que corresponden a las cuencas con mayor caudal en verano.

Este volumen se considera conservador y representa la máxima densidad del hielo ya que el glaciar sobre el volcán Villarrica presenta cenizas y detritos que aunque en bajas concentraciones, disminuye la densidad del glaciar.

La cantidad de agua en forma de hielo/nieve en cada cuenca cuyas cabeceras inicial del Volcán Villarrica se Villarrica se recoge en la

Tabla 6-1.

Tabla 6-1 Volumen de hielo/nieve y equivalente en agua por cuenca.

Cuenca	Nieve		Hielo			Vol. Total agua+hielo 10^6 [m ³]	
	Vol. 10^6 [m ³]	Vol. equivalente en agua producida por el aporte de nieve $* 10^6$ [m ³]	Área 3D [km ²]	Prof. hielo [m]	Vol. Hielo 10^6 [m ³]		
Estero Chaillupén	183,57	110,14	2,611	56,0	146,2	130	240,14
Estero Seco	80,81	48,49	0,651	37,0	24,1	21	69,49
Río Voipir	55,92	33,55	0,763	22,8	17,4	15	48,55
Estero Huichatío	46,01	27,61	0,189	20,7	3,9	3	30,61
Estero Molco	37,14	22,29	0,216	28,6	6,2	5	27,29
Estero Correntoso	28,86	17,32	0,444	20,3	9,0	8	25,32
Zanjón Seco	48,28	28,97	0,439	29,4	12,9	11	39,97
Río Pedregoso	38,87	23,32	1,797	33,7	60,6	54	77,32
Río Turbio	63,77	38,26	12,032	63,6	765,6	681	719,26
Total	170,23	102,14	19,143	-	1045,8	931	1277,95

*Densidad de nieve considerada = 0.5 g/cm³ Santibáñez et al (2008) **Densidad de hielo considerada = 0.89 g/cm³.

Utilizando como base la cartografía de Moreno y con los datos obtenidos en terreno, se ha realizado la cartografía de la extensión de los depósitos del lahar de 1971.

A partir de la extensión de los depósitos cartografiados se ha estimado el volumen de los depósitos que pudieron dejar los lahares de 1971, contabilizando tanto el material todavía remanente como el desaparecido a causa de la erosión posterior. A partir del volumen de depósito estimado y considerando que los lahares en el Villarrica se comportan como un flujo hiperconcentrado se ha procedido a calcular

los posibles volúmenes de lahares en función de las concentraciones en volumen teóricas (Beverage y Culbertson, 1964). Los resultados se recogen en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2. Volúmenes estimados de depósito y lahar en las cuencas afectadas en 1971.

Cauce	Vol. de depósito estimado [m ³]	Vol estimado [m ³] 66% de sólidos	Vol. estimado [m ³] 60% de sólidos	Vol. estimado [m ³] 20% de sólidos
Pedregoso-Turbio	13.685.203	20.735.156	22.717.438	68.426.019
Zanjón Seco	1.875.247	2.841.283	3.112.911	9.376.238
Correntoso	4.682.231	7.094.289	7.772.505	23.411.159
Voipir	19.666.640	29.797.939	32.646.623	98.333.201
Pino Huacho-Esteros Seco	5.749.201	8.710.911	9.543.673	28.746.005

A partir de la revisión de los cauces realizada y del análisis sedimentológico (visual) de los depósitos se ha estimado el comportamiento reológico de los flujos laháricos de la erupción de 1971. De forma general el inicio de los depósitos ocurre en la zona del cambio de pendiente entre la zona superior y la intermedia, es decir donde comienzan las pendientes inferiores a 15[°], aproximadamente a los pies del cono superior.

Debido a la capacidad erosiva del flujo y su importante altura de flujo, en los cañones más confinados los pulsos/eventos posteriores erosionarían los restos de otros anteriores, dejando solamente depósitos no muy potentes resultado de la fase final del flujo cuando este comienza a perder capacidad de transporte.

Según los diferentes escenarios eruptivos considerados y del volumen de agua disponible en forma de hielo y nieve, y añadiendo las cantidades de sólidos teóricas de entre un 20 y un 60% en volumen (Beverage y Culbertson, 1964), se han estimado los volúmenes de los lahares que pudieran darse en caso de una erupción. Otros autores consideran un 66% de concentración de sólidos como límite superior (Tom Pierson *USGS Fact Sheet 2004-3142*).

Para el escenario 1, erupción de tipo hawaiano-estromboliana con fusión de hielo/nieve debida fundamentalmente a coladas de lava, los resultados se recogen en la Tabla 6-3, tanto para volúmenes por cuenca como totales.

La cuenca con mayor volumen de flujo es la del río Turbio ($173,34 \cdot 10^6$ [m³], en el caso más desfavorable) seguida por la cuenca del Estero Chaillupén ($71,26 \cdot 10^6$ [m³] en el caso más desfavorable).

Se estima que en un escenario tipo 1 las velocidades y caudales máximos tendrían valores similares a los estimados por Naranjo y Moreno (2004), en la erupción del mismo tipo ocurrida en 1971 en el volcán Villarrica. Según los autores las velocidades de los flujos en la parte media alta (>400 m s.n.m.) son de 10-14 [m/s] a más de 14 [m/s], y en las zonas más bajas las velocidades disminuyen a 5-10 [m/s] o menos. Los caudales son del orden de 5.000-20.000 [m³/s] variando según el cauce y la zona. Se debe tener en cuenta que estos son los caudales máximos estimados en las oleadas pero no representan un caudal promedio constante en el tiempo.



Tabla 6-3 Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 1 (erupción hawaiano-estromboliana).

Cuenca	Vol. de agua solo de hielo	Vol. de agua hielo+ nieve máxima	Vol. lahar con 20% de sólidos y agua solo de hielo	Vol. lahar con 20% de sólidos y agua hielo+ nieve máxima	Vol. lahar con 60% de sólidos y agua solo de hielo	Vol. lahar con 60% de sólidos y agua hielo y nieve máx.	Vol. lahar con 66% de sólidos y agua solo de hielo	Vol. lahar con 66% de sólidos y agua hielo+ nieve máxima
	$10^6 [m^3]$	$10^6 [m^3]$	$10^6 [m^3]$	$10^6 [m^3]$	$10^6 [m^3]$	$10^6 [m^3]$	$10^6 [m^3]$	$10^6 [m^3]$
Estero Chaillupén	25,00	28,50	31,25	35,63	62,51	71,26	73,53	83,82
Estero Seco	11,28	15,76	14,10	19,70	28,19	39,41	33,18	46,35
Río Voipir	5,49	10,01	6,86	12,52	13,72	25,03	16,15	29,44
Estero Huichatío	2,21	5,85	2,76	7,31	5,53	14,62	6,50	17,21
Estero Molco	3,42	9,22	4,27	11,52	8,55	23,05	10,06	27,12
Estero Correntoso	2,94	6,78	3,68	8,48	7,36	16,96	8,65	19,94
Zanjón Seco	5,55	9,69	6,94	12,11	13,88	24,21	16,32	28,50
Río Pedregoso	14,83	20,54	18,54	25,67	37,07	51,34	43,62	60,41
Río Turbio	60,13	69,56	75,17	86,95	150,34	173,91	176,85	204,59
Total	130,86	175,92	163,57	219,9	327,14	293,19	384,85	517,38

Para el escenario 2, erupción de tipo sub-pliniana con fusión de hielo/nieve debida fundamentalmente a flujos de piroclastos y avalanchas mixtas de hielo, nieve y sedimentos, los resultados se recogen en la Tabla 6-4, tanto para volúmenes por cuenca como totales.

Las cuencas con mayor volumen de flujo son la cuenca del río Turbio con un máximo de $229,92 \cdot 10^6 [m^3]$ en el caso más crítico, 60% de sólidos en invierno, mucho mayor al volumen de las otras cuencas debido a la mayor extensión del hielo en esta zona.

Debido a que no es posible estimar de forma directa las características de los flujos laháricos provocados por un escenario tipo 2 en el volcán Villarrica, se estima que estos tendrían velocidades y caudales máximos mayores que las estimadas por Pierson (1990) en el Nevado del Ruiz pero del mismo orden de magnitud. A continuación se describen las características de los flujos estimadas por Pierson (1990). En la parte alta las velocidades promedio de la crecida son entre 15 [m/s] y 8 [m/s], alturas hidráulicas entre 20 [m] y 4 [m], y caudales máximos entre 15.000 [m^3/s] y 710 [m^3/s]. En las zonas más bajas las velocidades promedio de la crecida son entre 6 m/s y 5 m/s, alturas hidráulicas entre 7 [m] y 5 [m], y caudales máximos entre 4.000 [m^3/s] y 1.000 [m^3/s].

Para el escenario 3, erupción de tipo pliniana con fusión de hielo/nieve debida a flujos de piroclastos de gran magnitud y fusión mecánica por colapso del edificio volcánico, los resultados se recogen en la Tabla 6-5, tanto para volúmenes por cuenca como totales.



Tabla 6-4 : Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 2 (erupción sub-pliniana) para cada cauce.

Cuenca	Vol. de agua solo de hielo 10^6 [m ³]	Vol. de agua hielo+ nieve máxima 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 20% de sólidos y agua solo de hielo 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 20% de sólidos y agua hielo+ nieve máxima 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 60% de sólidos y agua hielo+ nieve solo de hielo 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 60% de sólidos y agua hielo+ nieve máxima 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 66% de sólidos y agua hielo+ nieve solo de hielo 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 66% de sólidos y agua hielo+ nieve máxima 10^6 [m ³]
Estero Chaillupén	11,71	17,56	14,64	21,95	29,28	43,90	34,44	51,65
Estero Seco	1,93	2,88	2,41	3,59	4,83	7,19	5,68	8,47
Río Voipir	1,39	2,07	1,74	2,59	3,48	5,17	4,09	6,09
Estero Huichatío	0,31	0,45	0,39	0,56	0,78	1,12	0,91	1,32
Estero Molco	0,50	0,72	0,62	0,9	1,24	1,80	1,47	2,12
Estero Correntoso	0,72	1,08	0,90	1,35	1,80	2,70	2,12	3,18
Zanjón Seco	1,03	1,53	1,29	1,91	2,58	3,82	3,03	4,50
Río Pedregoso	4,85	7,28	6,07	9,11	12,14	18,21	14,26	21,41
Río Turbio	61,32	91,97	76,66	114,96	153,31	229,92	180,35	270,50
Total	83,78	125,54	104,72	156,92	209,44	313,84	246,35	369,24

Tabla 6-5 : Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 3 (erupción pliniana).

Cuenca	Vol. de agua solo de hielo 10^6 [m ³]	Vol. de agua hielo+ nieve máxima 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 20% de sólidos y agua solo de hielo 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 20% de sólidos y agua hielo+ nieve máxima 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 60% de sólidos y agua hielo+ nieve solo de hielo 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 60% de sólidos y agua hielo+ nieve máxima 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 66% de sólidos y agua hielo+ nieve solo de hielo 10^6 [m ³]	Vol. lahar con 66% de sólidos y agua hielo+ nieve máxima 10^6 [m ³]
Estero Chaillupén	130,00	32,00	162,50	202,50	325,00	405,00	382,35	476,47
Estero Seco	21,00	19,50	26,25	50,63	52,50	101,25	61,76	119,12
Río Voipir	15,00	24,00	18,75	48,75	37,50	97,50	44,12	114,71
Estero Huichatío	3,00	14,50	3,75	21,88	7,50	43,75	8,82	51,47
Estero Molco	5,00	18,50	6,25	29,38	12,50	58,75	14,71	69,12
Estero Correntoso	8,00	23,00	10,00	38,75	20,00	77,50	23,53	91,18
Zanjón Seco	11,00	28,00	13,75	48,75	27,50	97,50	32,35	114,71
Río Pedregoso	54,00	40,50	67,50	118,13	135,00	236,25	158,82	277,94
Río Turbio	681,00	92,00	851,25	966,25	1702,50	1932,50	2002,94	2273,53
Total	928,00	292,00	1160,00	1525,00	2320,00	3050,00	2729,41	3588,24

La cuenca con mayor volumen de flujos es la cuenca del río Turbio, que en el caso más desfavorable tiene un volumen de flujo estimado de $1932,50 \times 10^6 [\text{m}^3]$, un volumen mucho mayor al de las otras cuencas ya que el área y volumen del glaciar correspondiente a esta cuenca son mucho mayores que las del resto.

Las velocidad y caudales producidos por este tipo de erupción no han sido estimados ya que no existen registros ni datos de este tipo de erupciones y las características de los flujos dependen de como colapse el edificio volcánico, lo que es muy difícil de prever.

7 Modelación Numérica Flujos Laháricos

La presente investigación aplicada tuvo por objeto determinar el potencial peligro de flujos laháricos producidos por erupciones del volcán Villarrica, utilizando cuatro tipos de modelos numéricos: LAHARZ, MSF, FLO-2D PRO y TITAN-2D.

El modelo LAHARZ utiliza un método semi-empírico, combinando análisis dimensional y estadístico para la determinación de las áreas de inundación. En el caso del modelo MSF, que da como resultados probabilidades de inundación, utiliza componentes de trayectoria y confinamiento, relacionadas con la dirección del flujo en función de la mayor pendiente topográfica y la relación entre la distancia vertical y horizontal que el flujo escurre, respectivamente. El modelo FLO-2D utiliza un método que resuelve el proceso físico del flujo, considerando las ecuaciones de continuidad y movimiento, entregando áreas de inundación, alturas máximas y velocidades máximas del flujo. Finalmente, con respecto al modelo TITAN-2D, éste ha sido diseñado para simular flujos de masas geológicas, considerando las ecuaciones de conservación de masa y moméntum, entregando resultados de áreas de inundación, profundidad de flujo y moméntum.

Se compararon los cuatro modelos en base a las áreas de depósito laharico obtenidas del estudio realizado por GEOESTUDIO, 2013 en la cuenca del río Voipir para la erupción de 1971, resultando que los modelos LAHARZ y FLO-2D son los óptimos a utilizar, debido a que entregaron áreas de inundación acordes con el evento medido y tiempo de cómputos razonables en la modelación.

Luego, con los modelos seleccionados, se procedió a un análisis de sensibilización de los parámetros, con el objetivo de identificar los parámetros de mayor relevancia en cuanto a la obtención de las áreas afectadas, justificando al mismo tiempo la configuración seleccionada para ambos modelos, en la selección de los modelos.

En la tercera instancia, se realizó una calibración de los modelos en términos de áreas de influencia, con respecto a la cuenca del río Voipir, en función del evento de 1971 catastrado en terreno, finalizando con la simulación de los tres eventos volcánicos definidos en el estudio geológico, glaciológico y vulcanológico.

Considerando los resultados de los modelos seleccionados ambos siguen una tendencia similar, sin embargo es probable que el modelo LAHARZ tienda a subestimar las áreas de inundación debido a que no considera el comportamiento físico del flujo en su cálculo de área de inundación y no es capaz de representar divisiones del flujo como ocurre en el delta del Trancura, no representando la dispersión real

del flujo o ciertas acumulaciones, por lo que se estima para los siguientes análisis considerar las áreas y forzantes de inundación que entrega el modelo FLO-2D.

Si bien en términos destructivos, el evento 3 es el más destructivo, seguido por el evento 1 y 2 respectivamente, su peligrosidad está más asociada a flujos y caída de piroclastos y el posible colapso del edificio volcánico por lo que para el diseño de obras de mitigación estructurales, se utilizó el evento 1, debido a que dicho evento tiene una recurrencia entre 5-10 años, menor en comparación con los otros que tienen 800 y 10.000 años del evento 2 y 3 respectivamente.

Se debe tener en cuenta que el modelo Flo-2D, considera una concentración constante en el flujo, esto quiere decir que, durante todo el dominio el flujo se mueve y mantiene la concentración indicada en el modelo, en la realidad, los cambios de pendiente a lo largo del cauce provocan que los sedimentos más grandes queden en el camino, modificando la cantidad de material que transporta el flujo.

7.1 Resultados

Considerando un hidrograma de 3 horas de duración y parámetros reológicos utilizados por Worni et al. (2012), se obtienen como resultado:

Para el Estero Zanjón Seco (Figura 7-1 y Figura 7-2) se observan alturas de inundación predominantemente entre 5 y 9 [m] pudiendo llegar a 12 [m] en zonas puntuales, en el caso de la velocidad predominantemente son de entre 3 y 6 [m/s] pudiendo llegar a 8 [m/s].

En la cuenca Correntoso la alturas de inundación predominantemente son entre 5 y 7 [m], con velocidades predominantes en el rango entre 5 y 8 [m/s], pudiendo alcanzar 12 [m/s] (Figura 7-3 y Figura 7-4).

Para el caso de la cuenca Huichatio las alturas de inundación predominantes van entre los 4 y 6 [m], con velocidades predominantes entre 2 y 5 [m/s] (Figura 7-5 y Figura 7-6).

En cuenca Molco las alturas pueden llegar a ser entre 10 y 20 m, en lugares de estrechamiento del canal, pero predominantemente son entre 2 y 6 m, con velocidades predominantes entre 2 y 8 [m/s] (Figuras 52 y 53).

Para el caso del sistema de cuencas Melillahuén Challupén las alturas de inundación, pueden alcanzar los 18 [m] en lugares de estrechamiento, siendo predominantemente en el rango entre 6 y 13 m, con velocidades que pueden alcanzar los 12 [m/s] en las pendientes altas, y predominantemente van entre 5 y 8 [m/s] (Figura 7-9 y Figura 7-10).

En el caso de la cuenca Voipir las alturas de inundación predominantemente van entre los 4 y 7.5 [m], con velocidades predominantemente que van entre los 4 y 7 [m/s] (Figura 7-11 y Figura 7-12).

Finalmente en el sistema de cuencas Turbio, Correntoso y Trancura, las alturas de inundación pueden alcanzar los 22 [m], con alturas predominantes que van entre 7 y 16 [m], cuyas velocidades fluctúan predominantemente entre 5 y 11 [m/s], pudiendo alcanzar velocidades de 15 [m/s] (Figuras 58 y 59).



De los resultados obtenidos del sistema Molco-Huichatio, se puede decir que en los primeros 6 [km], recorriendo el cauce del Molco desde el lago Villarrica hacia el volcán, las velocidades no superan los 2 [m/s] y 5[m] de altura de inundación (Figura 7-15 y Figura 7-16).

Desde ahí en adelante existen estrechamientos en el cauce, donde se registran alturas de hasta 20 [m] en concordancia con lo obtenido en la modelación de los cauces de Molco y huichatio por separado.

Otro aspecto importante es que al realizar la descarga completa por un cauce del Molco se tiene menor influencia hacia el río Voipir (comparación de Figura 7-15 y Figura 7-5), pero aumenta el área de inundación en el sector bajo de cada cauce, esto se produce porque existe sensibilidad producto de la topografía con respecto en el encauzamiento del flujo en el sector de descarga.

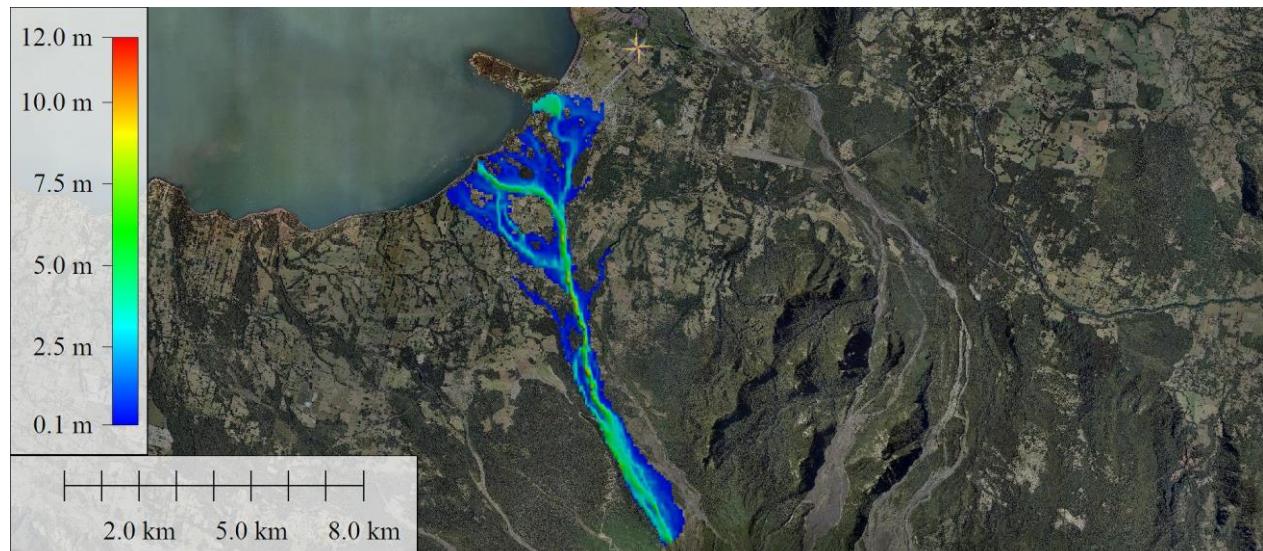


Figura 7-1: Evento 1 cuenca Zanjón Seco, altura de inundación

Fuente: Elaboración Propia.



Instituto
Nacional de

Hidráulica

Ministerio de Obras
Públicas

Gobierno de Chile

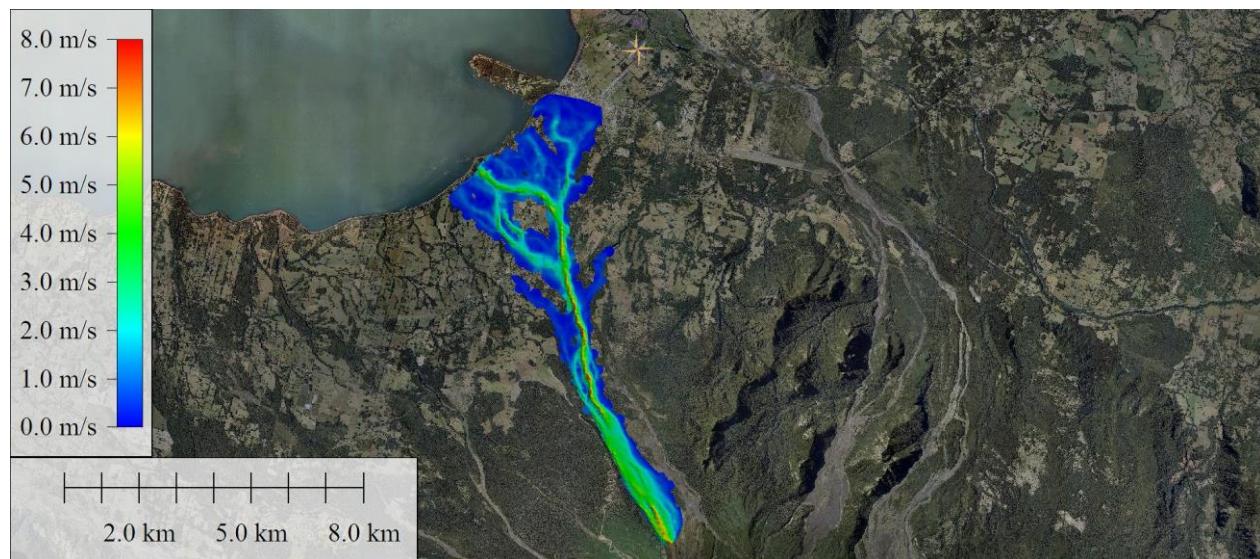


Figura 7-2: Evento 1 cuenca Zanjón Seco, velocidad de inundación.

Fuente: Elaboración Propia.

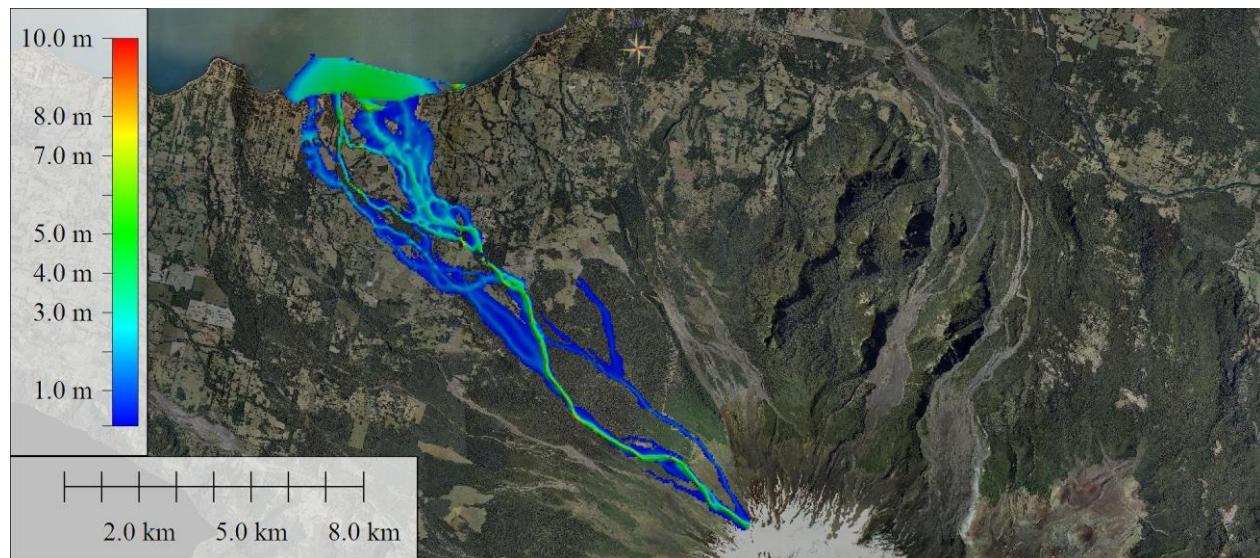


Figura 7-3: Evento 1 cuenca Correntoso, altura de inundación.

Fuente: Elaboración Propia.



Instituto
Nacional de
Hidráulica

Ministerio de Obras
Públicas

Gobierno de Chile

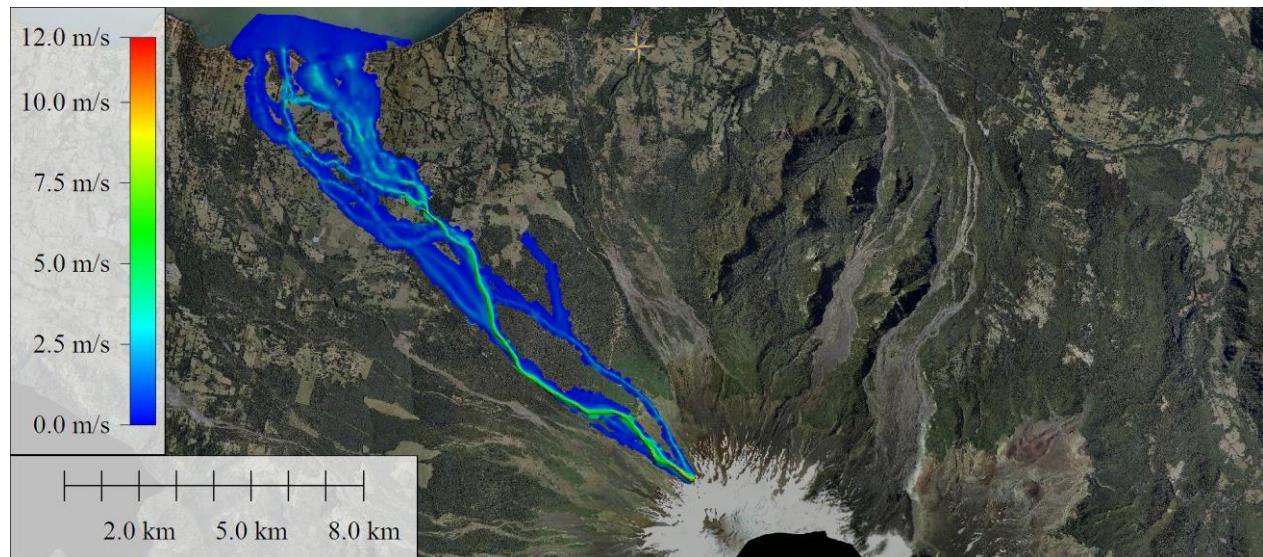


Figura 7-4: Evento 1 cuenca Correntoso, velocidad de inundación.

Fuente: Elaboración Propia.

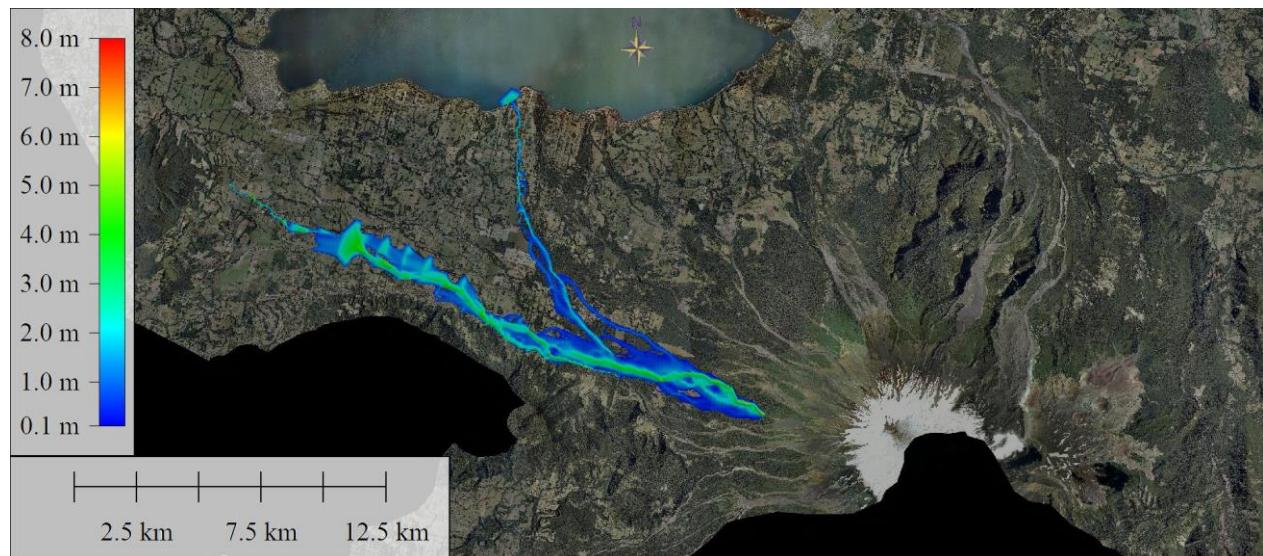


Figura 7-5: Evento 1 cuenca Huichatio, altura de inundación

Fuente: Elaboración Propia.



Instituto
Nacional de
Hidráulica

Ministerio de Obras
Públicas

Gobierno de Chile

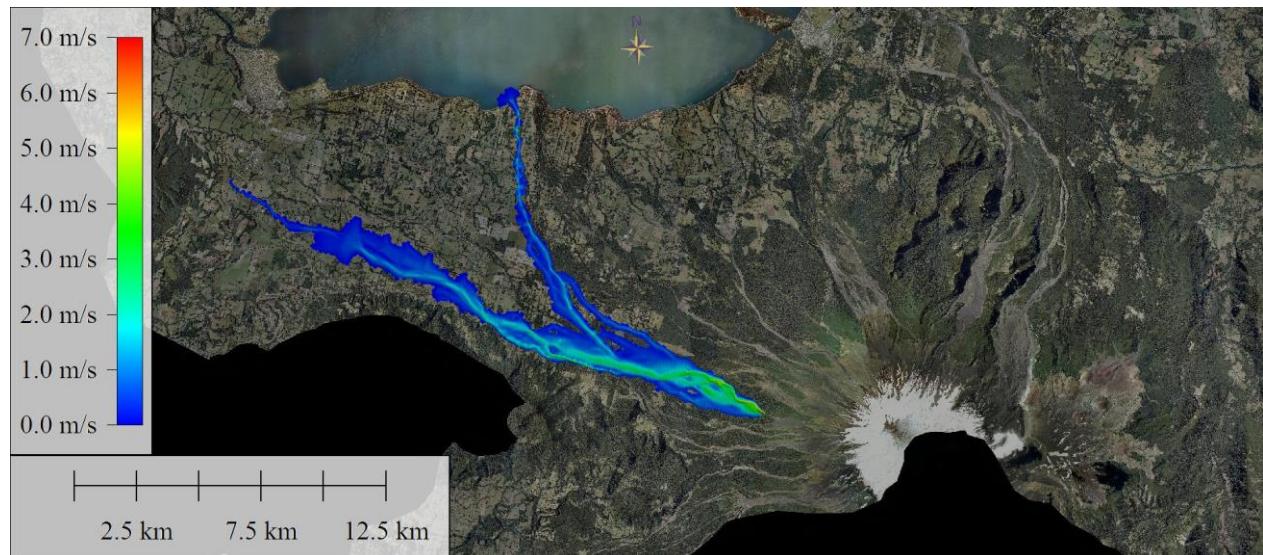


Figura 7-6: Evento 1 cuenca Huichatío, velocidad de inundación

Fuente: Elaboración Propia.

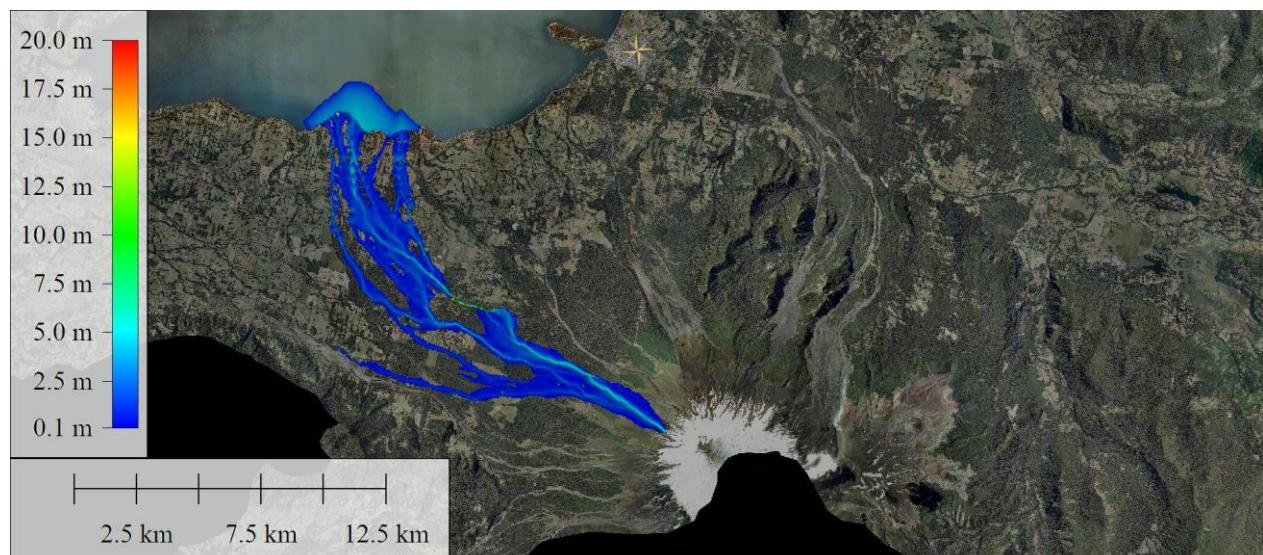


Figura 7-7: Evento 1 cuenca Molco, altura de inundación

Fuente: Elaboración Propia.



Instituto
Nacional de
Hidráulica

Ministerio de Obras
Públicas

Gobierno de Chile

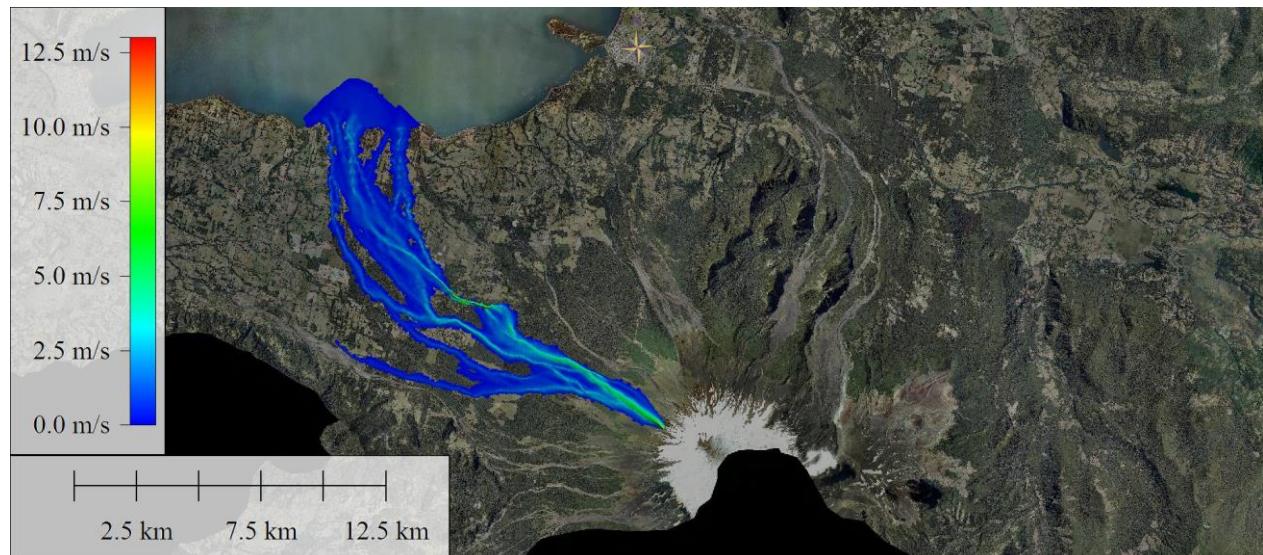


Figura 7-8: Evento 1 cuenca Molco, velocidad de inundación
Fuente:
Elaboración Propia.

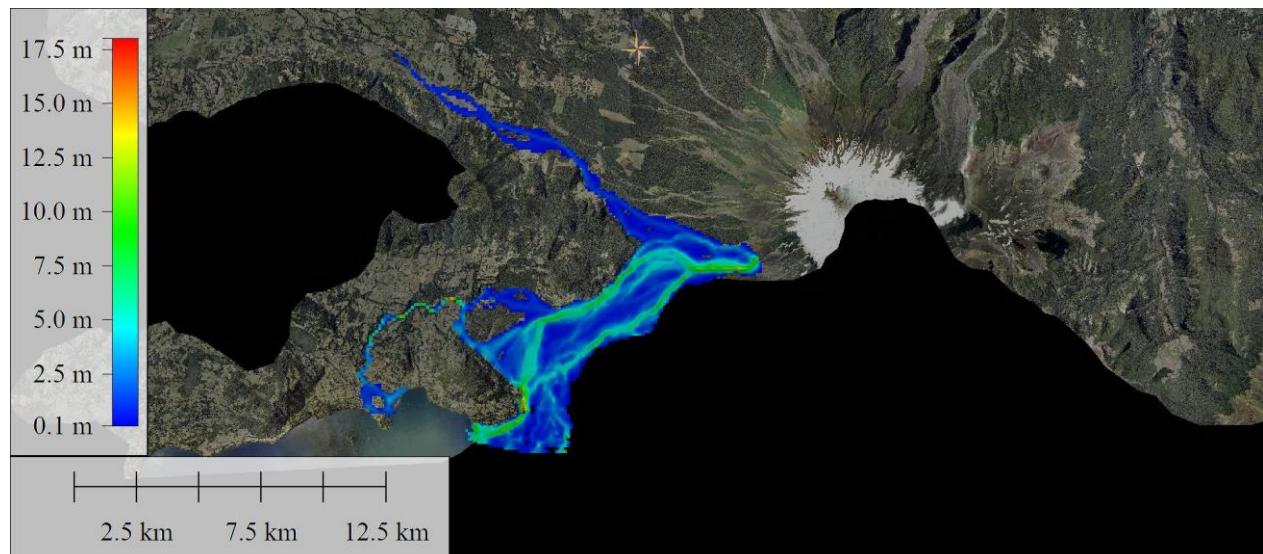


Figura 7-9: Evento 1 sistema de cuencas Melillahuén Challupén, altura de inundación
Fuente: Elaboración Propia.



Instituto
Nacional de

Hidráulica

Ministerio de Obras

Públicas

Gobierno de Chile

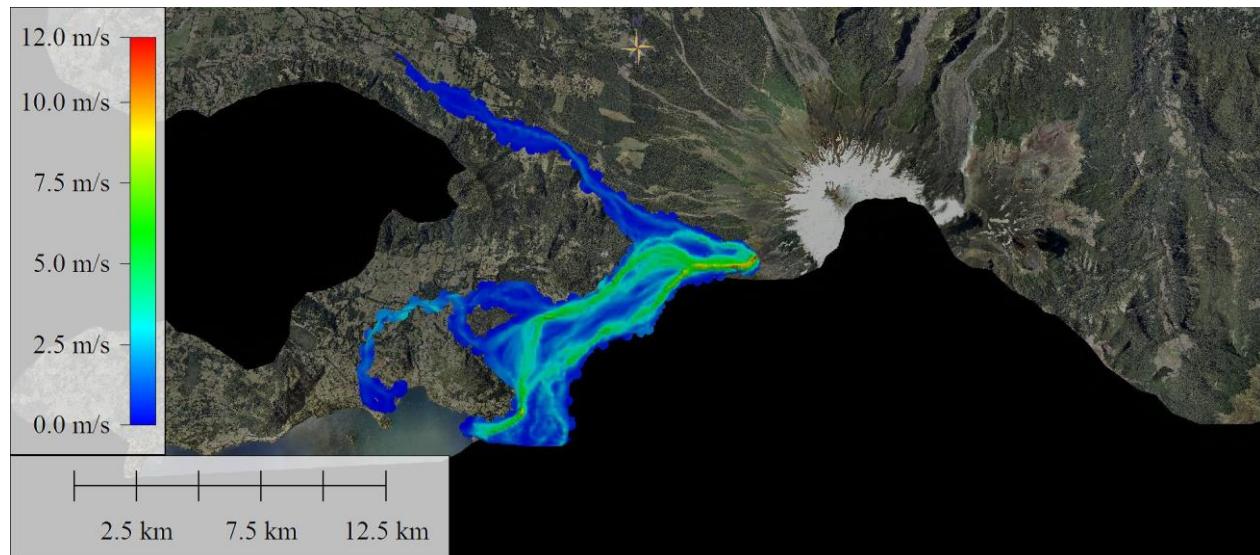


Figura 7-10: Evento 1 sistema de cuencas Melillahuén Challupén, velocidad de inundación

Fuente: Elaboración Propia.

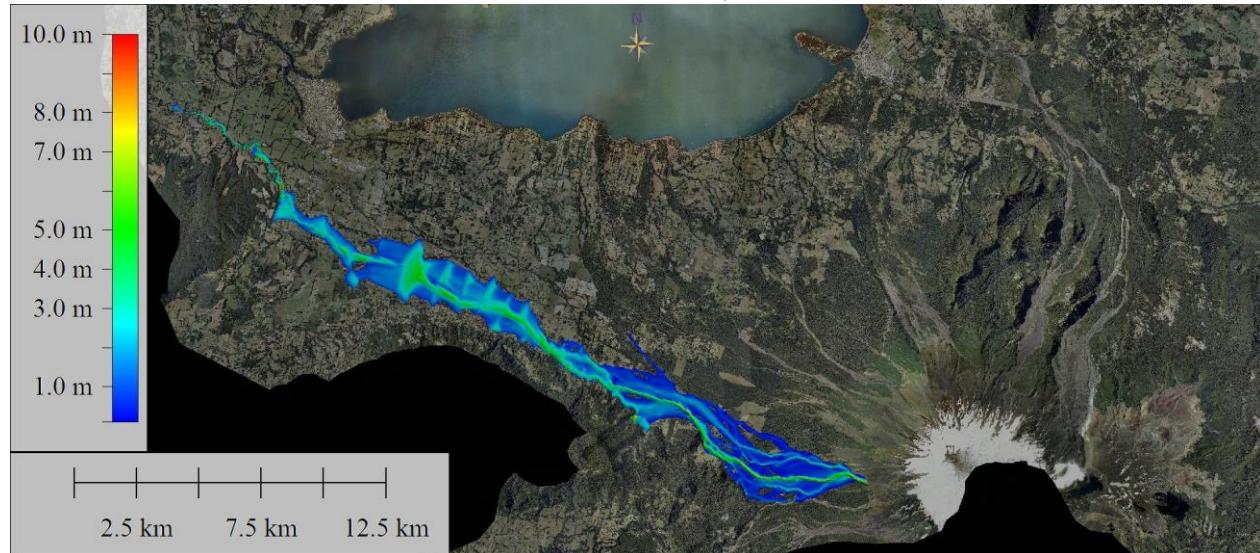


Figura 7-11: Evento 1 cuenca Voipir, altura de inundación

Fuente: Elaboración Propia.



Instituto
Nacional de
Hidráulica

Ministerio de Obras
Públicas

Gobierno de Chile

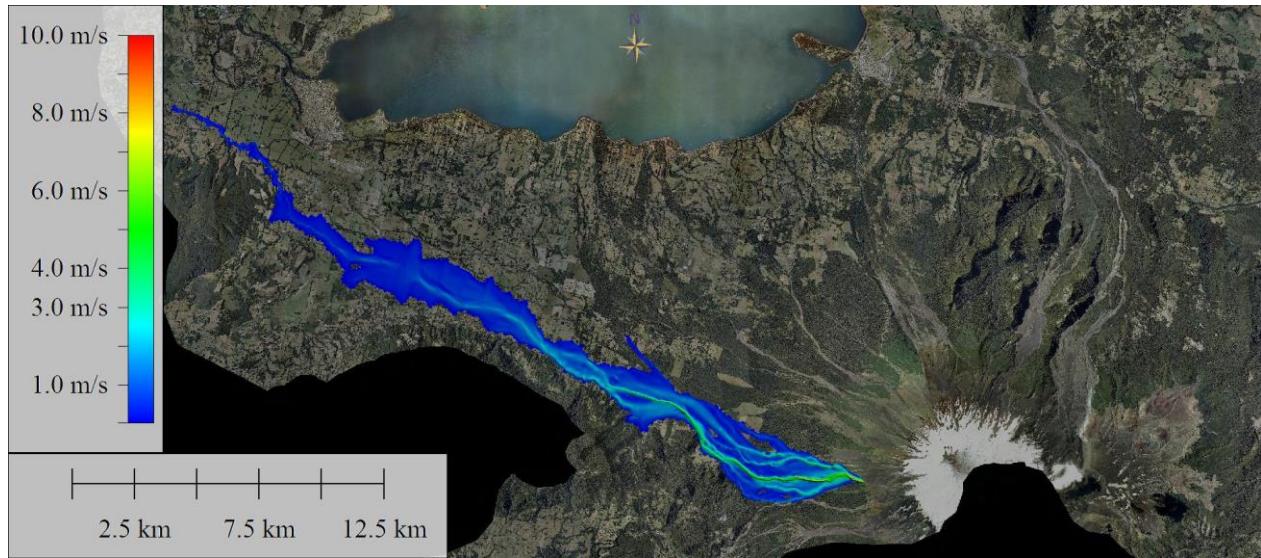


Figura 7-12: Evento 1 cuenca Voipir, velocidad de inundación

Fuente: Elaboración Propia.

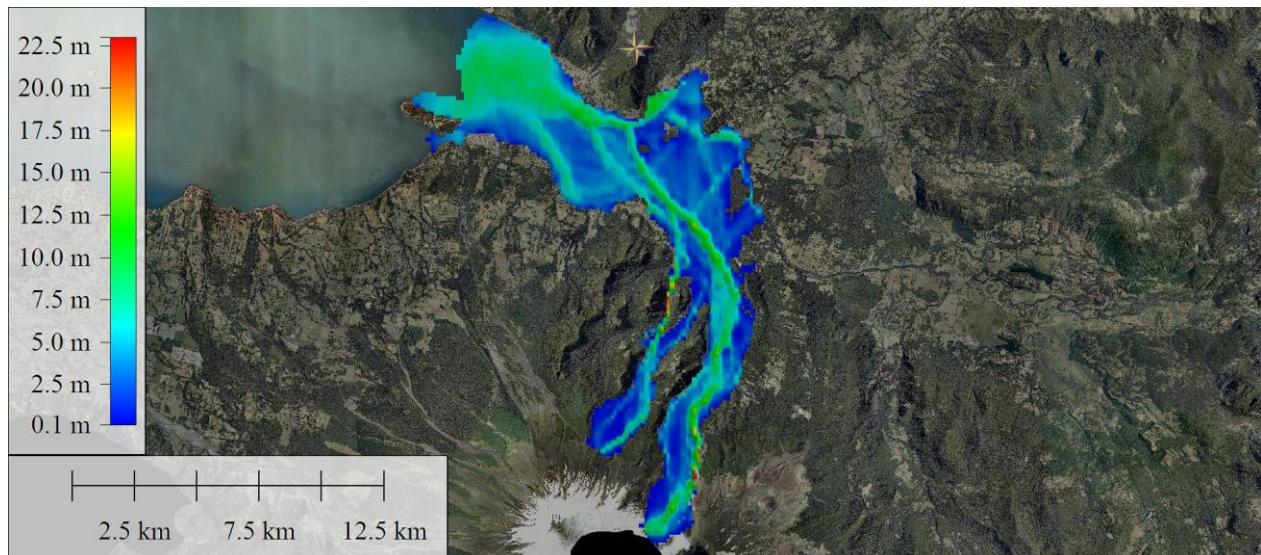


Figura 7-13: Evento 1 sistema de cuencas Turbio, Pedregoso y Trancura, altura de inundación

Fuente: Elaboración Propia.



Instituto
Nacional de
Hidráulica

Ministerio de Obras
Públicas

Gobierno de Chile

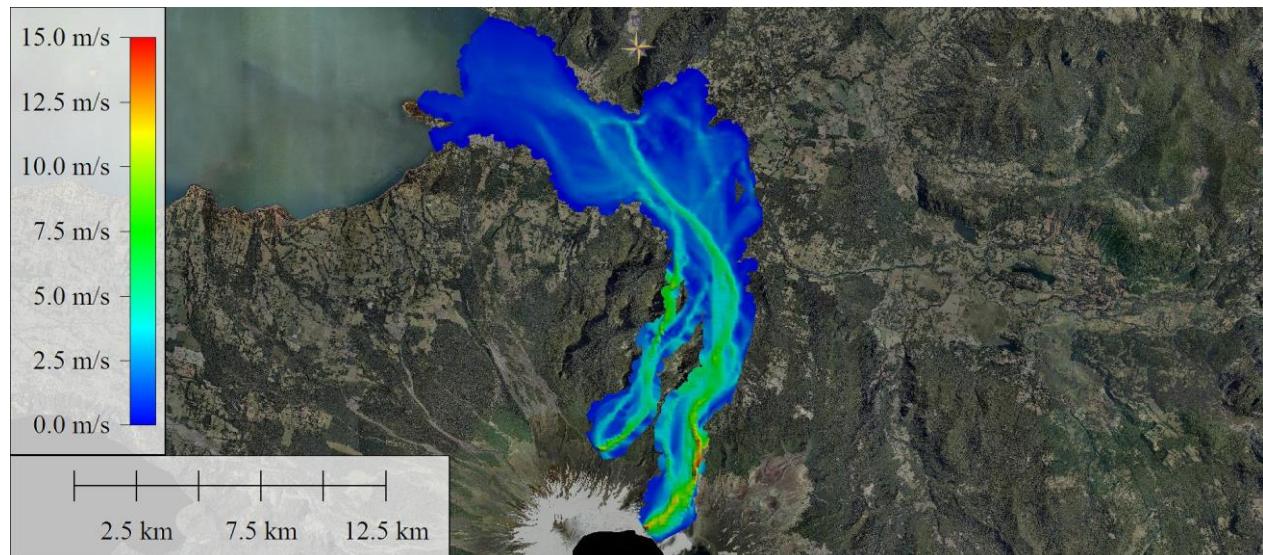


Figura 7-14: Evento 1 sistema de cuencas Turbio, Pedregoso y Trancura, velocidad de inundación

Fuente: Elaboración Propia.

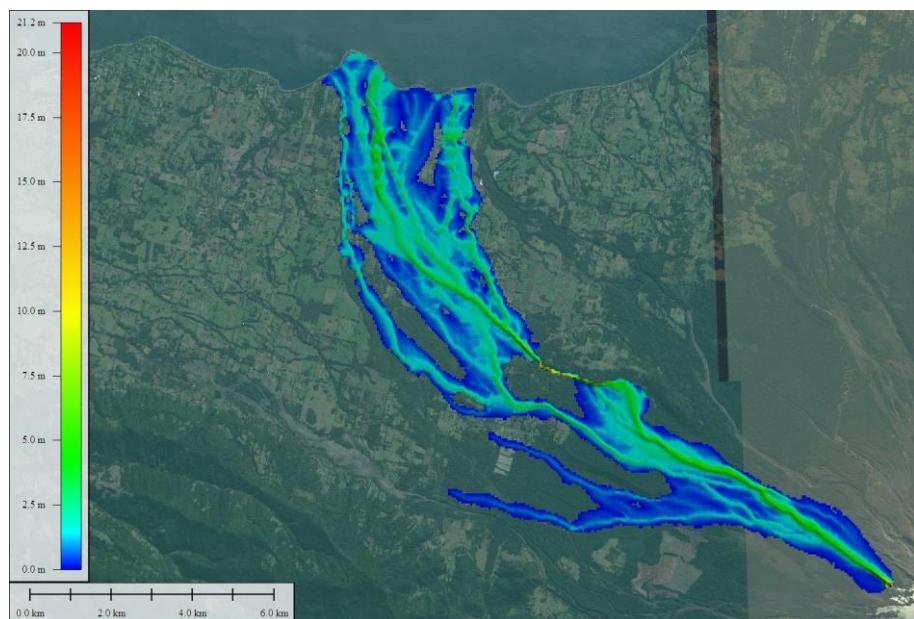


Figura 7-15 : Evento 1 Esteros Molco-Huichatío, altura de inundación

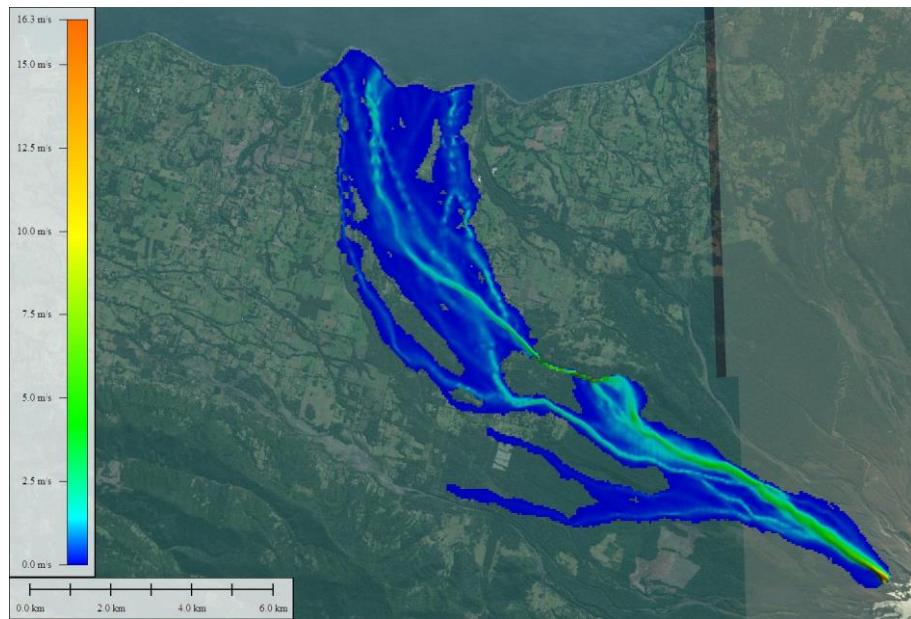


Figura 7-16 : Evento 1 Esteros Molco-Huichatío, Velocidades

8 Propuesta de Medidas de Mitigación

Las soluciones estructurales son de altísimo costo, no son de fácil implementación y requieren aún un complejo desarrollo tanto de ingeniería como la evaluación de impactos de todo tipo.

Estas soluciones estructurales no aseguran una efectividad a todo evento, ya que el fenómeno que se pretende controlar no se conoce bien y la magnitud de los eventos volcánicos puede sobrepasar los cálculos realizados.

En este contexto se recomienda poner énfasis en las medidas blandas como dar acceso y entregar información acerca de los riesgos y procedimientos asociados a erupciones volcánicas, así como la educación a la Comunidad residente y flotante.

Por otra parte se hace altamente recomendable poner restricciones más estrictas a la construcción en áreas de riesgo, realizar análisis crítico permanentemente de las medidas a tomar en caso que el fenómeno se presente y profundizar el conocimiento de la situación por parte de la población.

8.1 Medidas Estructurales

Con base en los resultados obtenidos a través de la modelación de los flujos laháricos, se propusieron soluciones preliminares de mitigación para los sistemas: Ríos Turbio–Correntoso–Trancura, Zajón Seco, Estero Correntoso y Estero Seco (Figura 8-1). Para lo cual, se desarrolló alternativas de mitigación a nivel de prefactibilidad, evaluándolas desde los puntos de vista ambientales, legales, administrativos, técnico-económicos y sociales, de modo de determinar la magnitud de las inversiones involucradas. Para llevar



esto a cabo, se desarrolló una evaluación socio económica que permitió caracterizar los daños generados por los diferentes eventos

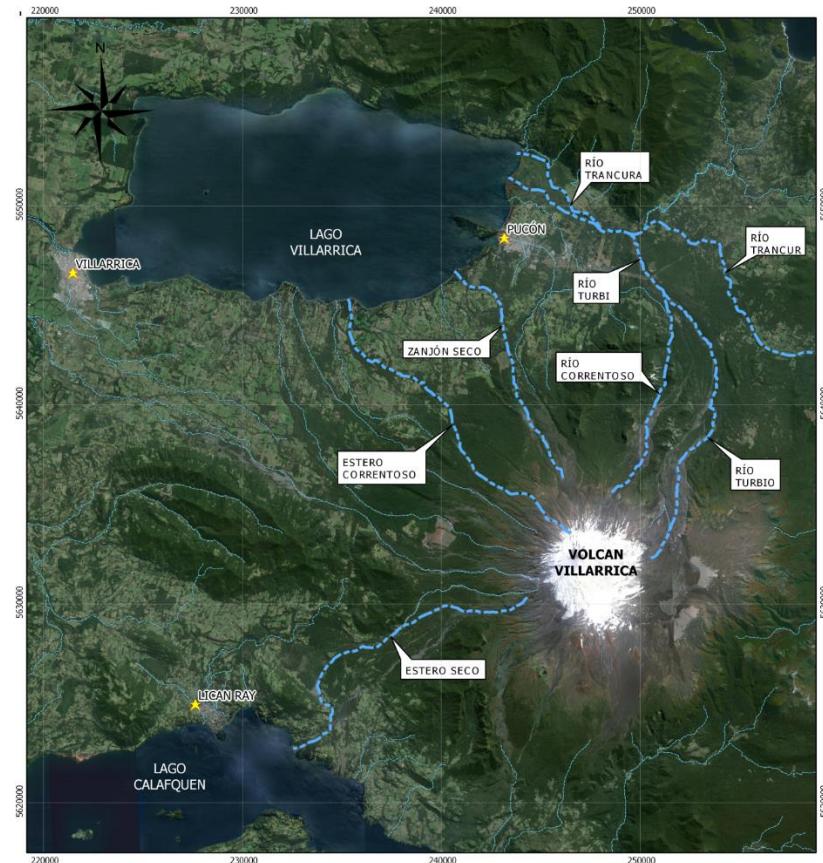


Figura 8-1 : Esquema General Cauces en Estudio

8.1.1 Sistema Ríos Trancura-Turbio-Correntoso

Muro encauzador para evitar la posibilidad de que se generen desbordes de la ribera sur de los ríos Correntoso y Trancura hacia la localidad de Pucón ante la ocurrencia de flujos laháricos

- Longitud 10,5 km
- Altura variable de 7 a 30 m, altura promedio 16 m
- Material del muro: arena gravosa compactada
- Enrocado de protección (Consolidado), bloques de 1,5 Ton

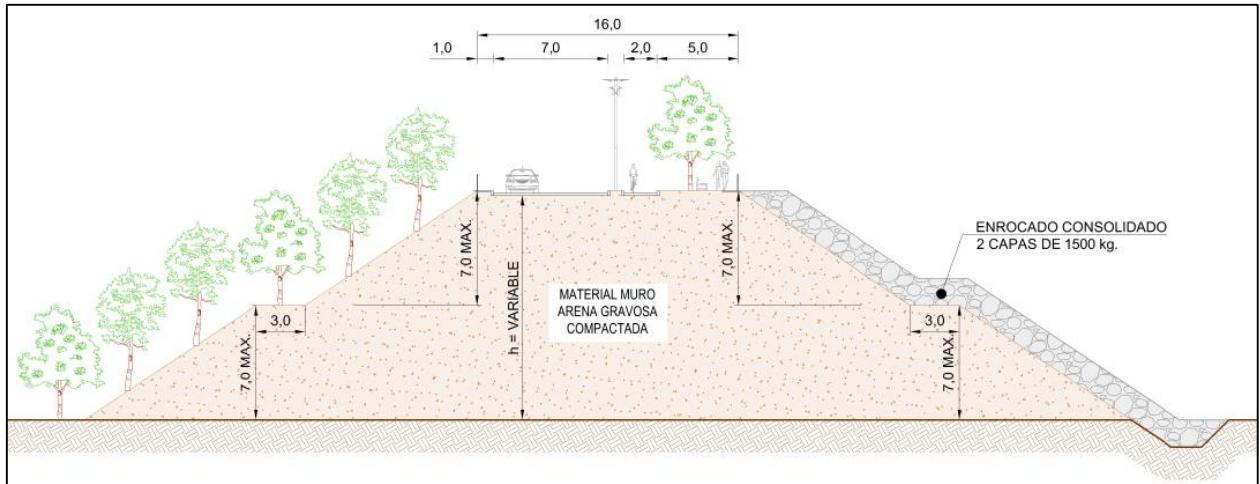
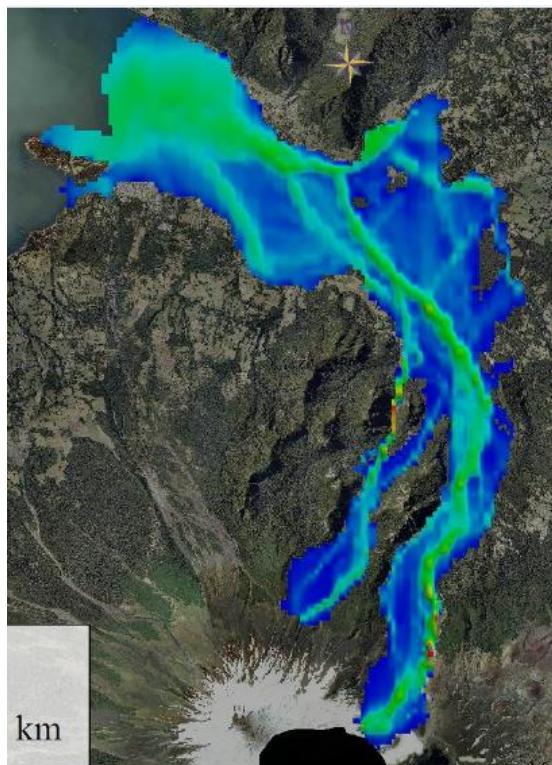
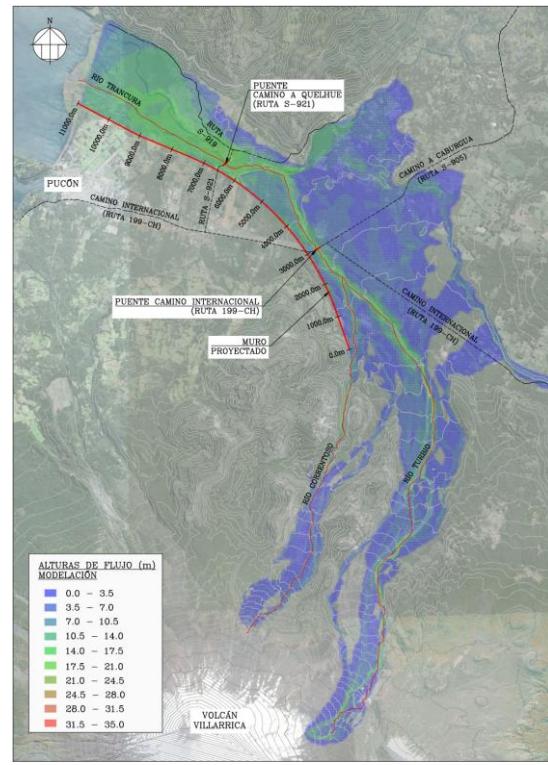


Figura 8-2 : Perfil de la obra.



a) Sin Obra de Mitigación



b) Con Obra de Mitigación

Figura 8-3 : Resultados de la modelación con y sin obra en el sistema Turbio-Correntoso

8.1.2 Zanjón Seco

La obra corresponde a una canalización de 60 m de ancho por el eje del cauce del Zanjón Seco desde el Km 6,9 hasta el Km 11,7. Desde el Km 11,7 se proyecta un ensanchamiento de la canalización de 150 m hasta aguas abajo del puente ruta internacional 199-CH (Km 12,6).

De acuerdo lo expuesto en el Informe de Caracterización Geotécnica (Anexo D), los taludes de corte son los que se muestran a continuación:

- Talud de excavación en suelos: H:V = 1,5: 1,0.
- Talud de excavación en roca: H:V = 1,0: 2,5.

Así mismo, en el Informe de Caracterización Geotécnica, se concluye que en la zona del tramo a excavar la roca está a la vista, con profundidades que alcanzan 4 a 5 m de espesor. Por lo tanto de manera conservadora, dado el nivel de ingeniería de prefactibilidad, se considera que en todo el largo del tramo a excavar la roca está a la vista con profundidad hasta de 5,0 m.

A continuación en la Figura 8-4 se presenta la sección tipo de la obra de mitigación adoptada para el Zanjón Seco y en la Figura 8-5 los resultados de la modelación numérica con y sin proyecto.

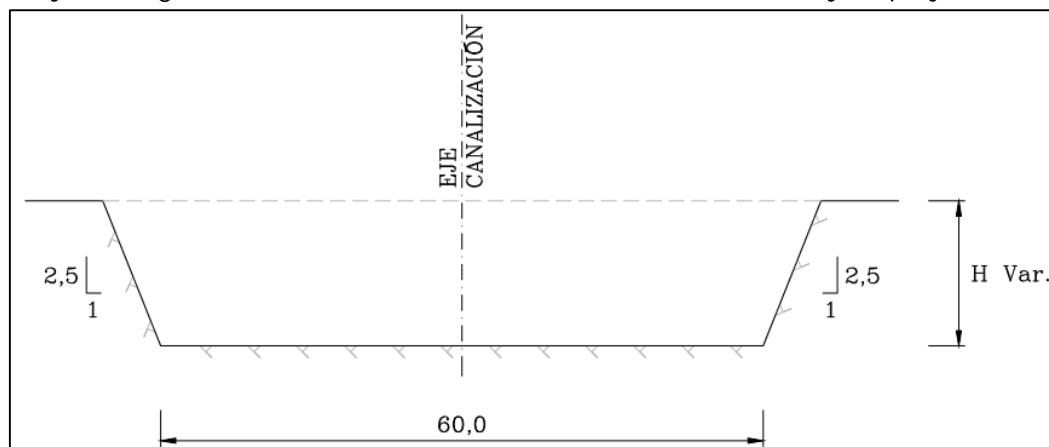
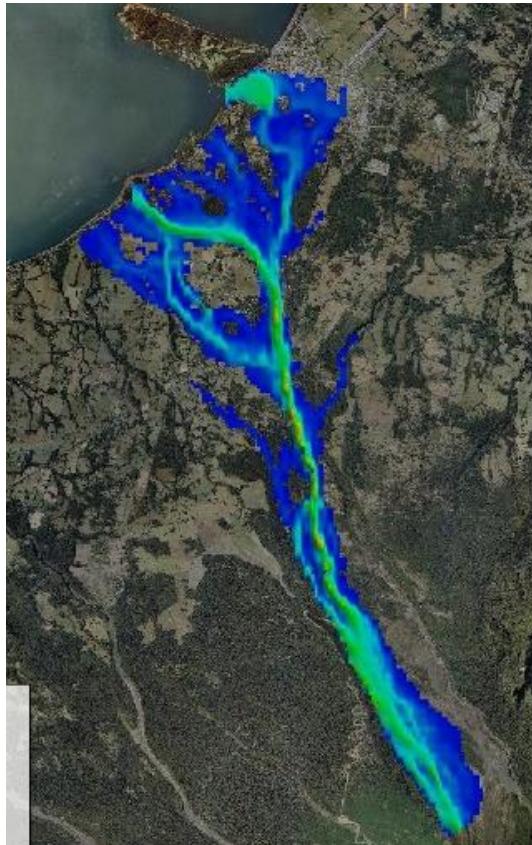
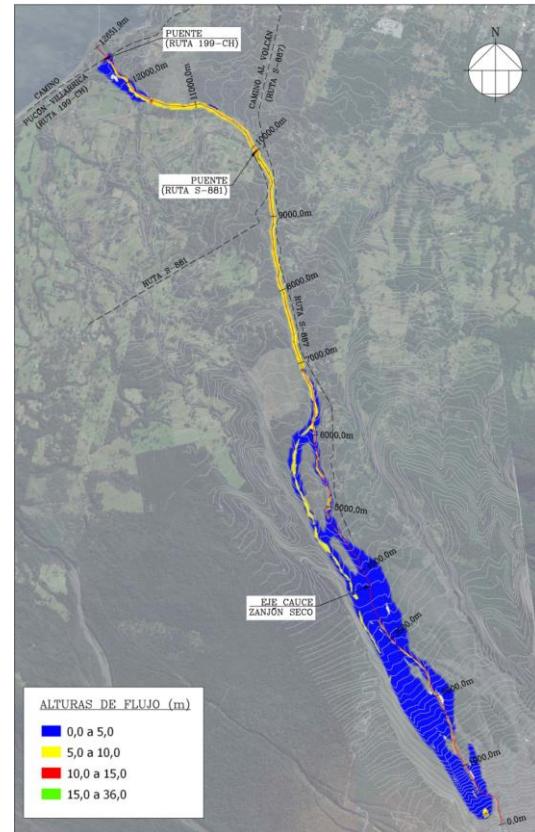


Figura 8-4: Sección Tipo Canalización (Km 6,9 hasta Km 11,7)



a) Sin Obra de Mitigación



b) Con Obra de Mitigación

Figura 8-5 : Resultados de la modelación con y sin obra en el cauce Zanjón Seco

8.1.3 Estero Correntoso

La obra corresponde a una canalización de 50 m de ancho por el eje del cauce del Estero Correntoso desde el Km 10,9 hasta el Km 17,9.

De acuerdo a lo expuesto en el Informe de Caracterización Geotécnica (Anexo D), los taludes de corte son los que se muestran a continuación:

- Talud de excavación en suelos: H:V = 1,5: 1,0.
- Talud de excavación en roca: H:V = 1,0: 2,5.

Así mismo, en el Informe de Caracterización Geotécnica se concluye que en la zona superior del tramo a excavar (12,3 km aproximadamente) la roca está a 2,0 m de profundidad, mientras que en la zona inferior del tramo a excavar (16,5 km aproximadamente) aparentemente no existe roca superficial. Por lo tanto de manera conservadora, dado el nivel de ingeniería de prefactibilidad, se considera que en todo el largo del tramo a excavar la roca está a 2,0 m de profundidad.



A continuación en la Figura 8-6 se presenta la sección tipo de la canalización adoptada como solución para el estero Correntoso, que se proyecta en el tramo desde el Km 10,9 hasta el Km 17,9. En la Figura 8-7 se presentan los resultados de la modelación numérica con y sin proyecto.

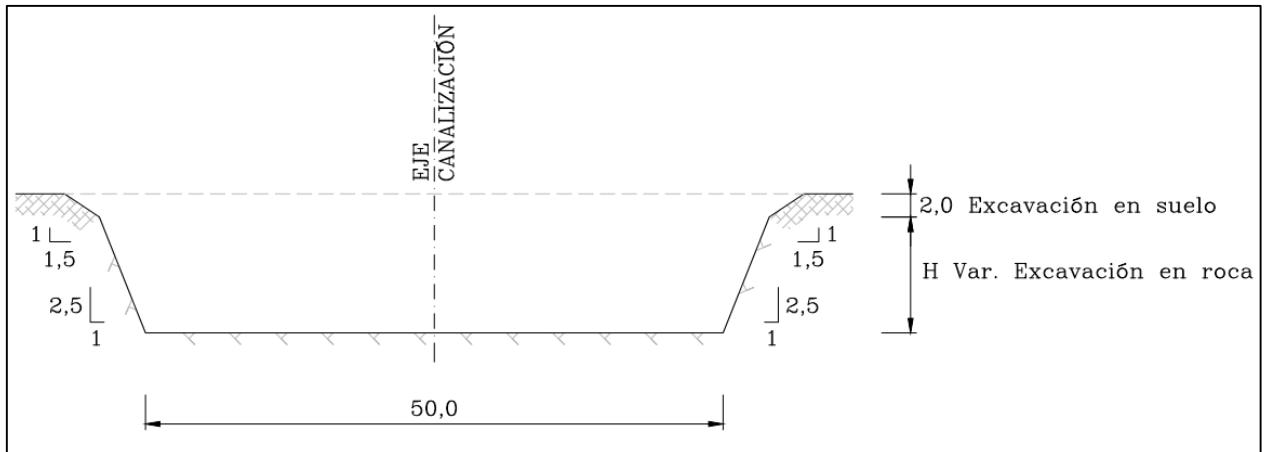
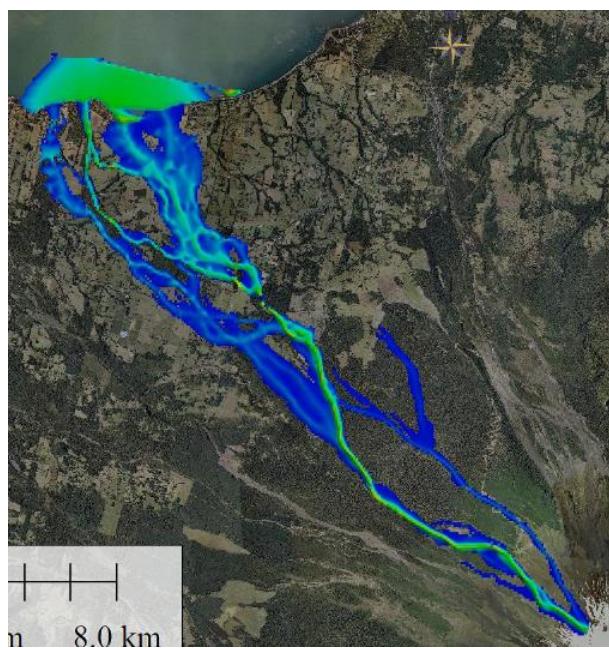
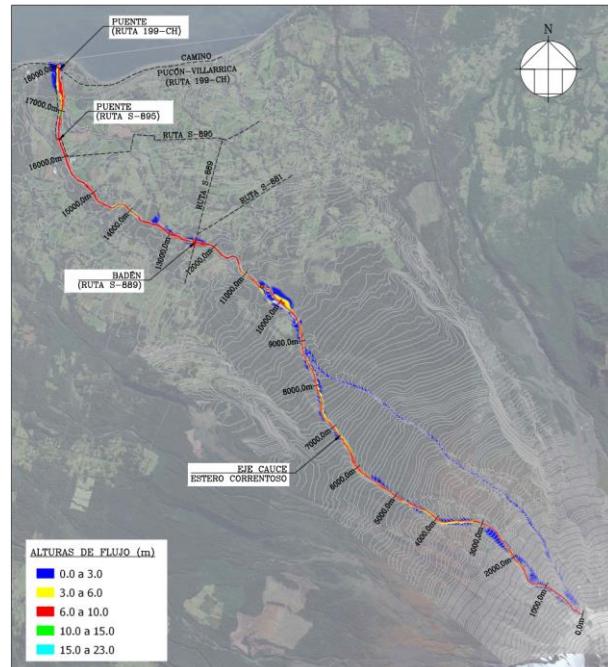


Figura 8-6: Sección Tipo Canalización Estero Correntoso



a) Sin Obra de Mitigación



b) Con Obra de Mitigación

Figura 8-7 : Resultados de la modelación con y sin obra en el cauce Correntoso



8.1.4 Sistema Estero Seco Pino Huacho- Melilahuen

La obra corresponde a una canalización de 50 m de ancho por el eje del cauce del estero Seco desde el Km 7,4 hasta el Km 16, y de 100 m de ancho desde el Km 16 hasta el Km 17.

De acuerdo lo expuesto en el Informe de Caracterización Geotécnica (Anexo D), los taludes de corte son los que se muestran a continuación:

- Talud de excavación en suelos: H:V = 1,5: 1,0.
- Talud de excavación en roca: H:V = 1,0: 2,5.

Así mismo, en el Informe de Caracterización Geotécnica, se concluye que en la zona superior del tramo a excavar (Km 9,5 aproximadamente) la roca está superficial a no más de 1,0 m de profundidad, mientras que en la zona inferior del tramo a excavar (Km 17,0 aproximadamente) la roca está más profunda. Por lo tanto de manera conservadora, dado el nivel de ingeniería de prefactibilidad, se considera que en todo el largo del tramo a excavar la roca está a 1,0 m de profundidad.

A continuación en las Figura 8-8 y Figura 8-9 se presentan las secciones tipo de la obra de mitigación adoptada para el estero Seco y descrito anteriormente: En la Figura 8-10 se presentan los resultados de la modelación numérica con y sin proyecto.

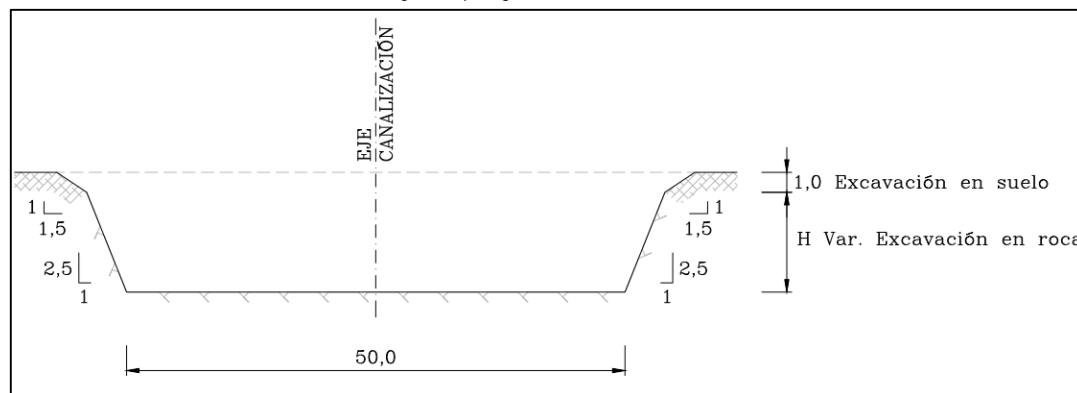


Figura 8-8: Sección Tipo Canalización Estero Seco (Km 7,4 hasta Km 16,0)

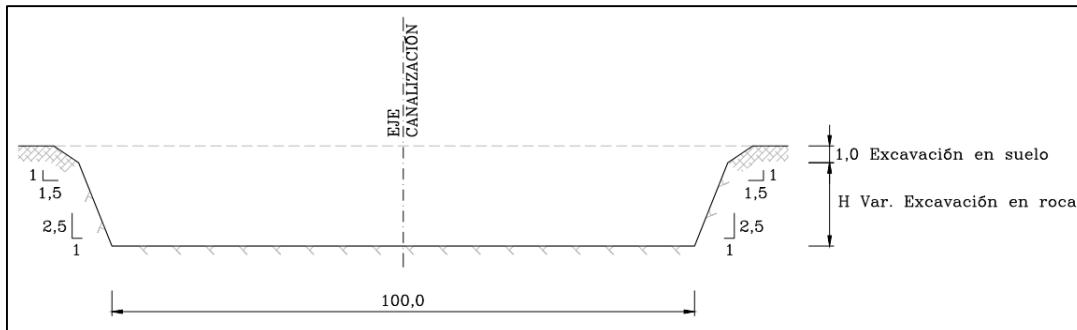


Figura 8-9: Sección Tipo Canalización Estero Seco (Km 16,0 hasta Km 17,0)

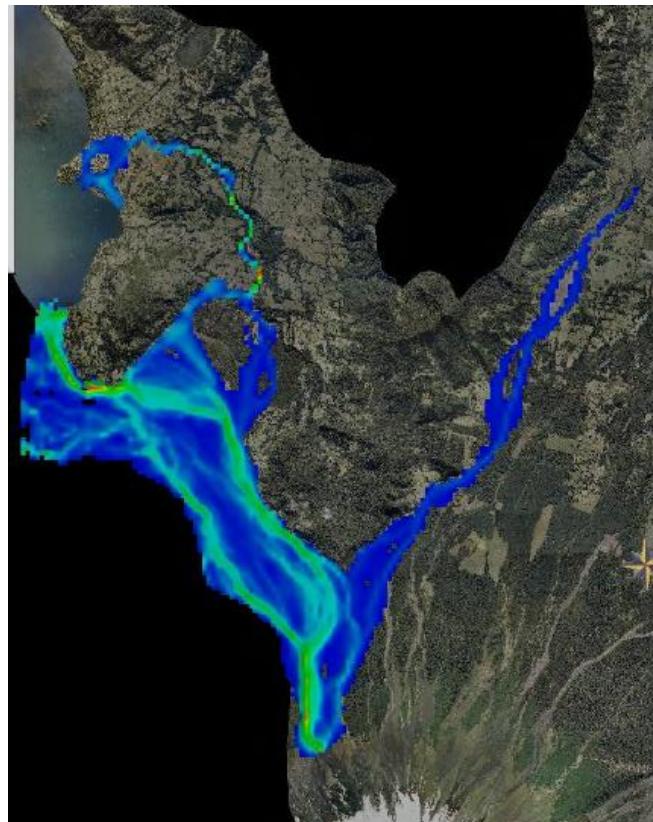


Instituto
Nacional de

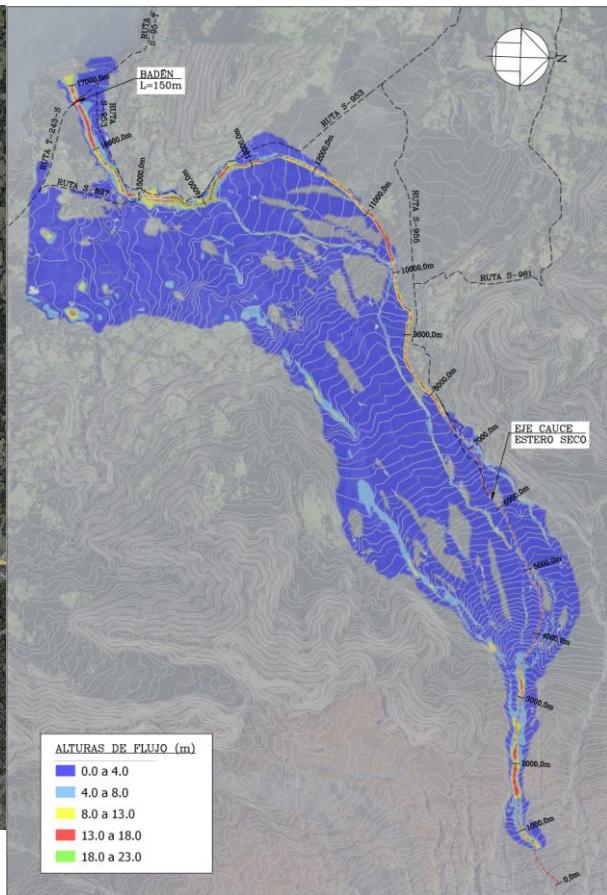
Hidráulica

Ministerio de Obras
Públicas

Gobierno de Chile



a) Sin Obra de Mitigación



b) Con Obra de Mitigación

Figura 8-10 : Resultados de la modelación con y sin obra sistema Estero Seco-Pino Huacho-Melilahuen

8.1.4.1 Presupuesto Preliminar de las Obras

De acuerdo con los antecedentes del prediseño, cubicaciones y precios unitarios presentados con anterioridad se resume en la Tabla 8-3 el presupuesto general de las obras de control de flujos laharicos para el escenario de erupción hawaiano-estromboliano cuyo períodos de retorno es estimó de entre 8 a 10 años.

8.1.5 Beneficios Esperados

En general, la magnitud de los daños producidos en un eventos catastrófico de tipo hidrológico extremo, como crecidas líquidas, aluvionales o laháricas depende de múltiples factores siendo los más importantes: altura media y/o altura local del flujo en la zona amagada, velocidad de escurrimiento, época del año en que sucede la inundación, tiempo transcurrido desde la inundación anterior (frecuencia) y duración de las mismas.

Los beneficios que se obtienen con la ejecución del proyecto, medidos como el daño evitado, dependen directamente de la magnitud del evento que se presenten anualmente, así como también de la capacidad de contención del evento generada por la implementación del proyecto, así como de su vida útil.

Surge así el problema de cómo estimar los beneficios futuros, si no se sabe a priori la magnitud de los caudales que se pueden presentar. Este problema ha sido resuelto mediante la determinación de la esperanza matemática de los daños (beneficios), con base a la curva de daños totales en función de la probabilidad de excedencia (período de retorno) conforme a lo descrito en la descripción metodológica del presente informe.

Esta última cifra, representa las pérdidas anuales por ocurrencia de eventos aluvionales en situación sin proyecto, que se obtiene del cálculo de la esperanza matemática de los daños; multiplicando, a partir de la relación daños - probabilidad de excedencia, el incremento de probabilidad asociado a cada nivel de inundación por el monto de los daños correspondiente. De la suma de todos estos resultados se obtiene el monto de pérdidas anuales esperado.

En la Tabla 8-1 se resumen los daños totales y esperanza matemática de los mismos. Cabe señalar que para el cálculo de este último valor, se ha considerado 3 diferentes escenarios posibles de ocurrir.

La determinación de las pérdidas anuales tomó en cuenta que para eventos de menos de 5 años de período de retorno, no se producen daños asociados a flujos laháricos, por lo que el daño en este caso es cero.

Tabla 8-1: Beneficios Totales y Valor Anual Esperado Eventos Laháricos

Tipología Daños	Monto Daños Sistema General (UF)		
	T = 8 - 10 años	T = 800 años	T = 10.000 años
Subtotal Daños Directos (UF)	17,416,475	14,120,901	29,146,751
Subtotal Daños Indirectos (UF)	6,787,900	6,061,736	11,196,500
Subtotal Intangibles (UF)	7,261,313	10,091,319	20,171,626
TOTAL DAÑOS (UF)	31,465,688	30,273,956	60,514,877
BENEFICIO TOTAL ANUAL ESPERADO (UF)	4,679,934		
BENEFICIO ANUAL ESPERADO (UF)	ESCENARIO 1	4,719,853	
	ESCENARIO 2	1,573,284	
	ESCENARIO 3	2,457,508	

Para determinar los indicadores de rentabilidad del proyecto se ha considerado el cálculo del Valor Actualizado Neto (VAN) de los beneficios e inversiones del proyecto y la TIR.

Para el análisis se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- El horizonte de evaluación se estableció en 30 años, considerando que la vida útil de las obras es superior a este plazo.
- El plazo de ejecución del proyecto se estableció en 5 años.

- Los costos de mantención anuales se supusieron equivalentes a un 1% de las inversiones iniciales.
- Los beneficios de los años 0 a 3 son nulos, y los años 4 y 5 equivalentes a 1/3 de los beneficios, finalmente desde el año 6 en adelante, se reciben los beneficios totales.
- La tasa de descuento conforme a las recomendaciones de MIDESO se estableció en un 6%.
- La inversión en obras incluyó el IVA de 19 %

En la

Tabla 8-2 los indicadores de rentabilidad para los diferentes escenarios analizados

Tabla 8-2: Indicadores de Rentabilidad Proyecto de Obras de Control Laharico

Escenario Beneficios	VAN (Miles UF)	TIR (%)
1	24,451,352	13.5%
2	-10,449,820	1.6%
3	-642,173	5.8%

Se desprende de los resultados presentados que bajo los Escenarios 2 y 3 propuestos se presentan indicadores de rentabilidad negativos, es decir el VAN es negativo y la TIR resulta menor de un 6 % que es la tasa fijada por MIDESO como límite inferior para aceptar posibilidad de realizar inversión pública.

Solo se presenta rentabilidad positiva para el Escenario 1 en donde se considera que las obras resisten el embate de flujos de mayor magnitud y su efecto es reducir la magnitud de los daños. Sin embargo en el caso del muro de confinamiento del sistema Turbio-Trancura esta hipótesis es bastante optimista, en tanto las obras no se encuentran diseñadas con este fin (soportar un flujo laharico que los pudiera sobrepasar).

La evaluación más cercana a la realidad debiera estar entre los resultados de los Escenarios 1 y 3, siendo este último caso el que supone que las canalizaciones efectivamente reducen los daños al reducir los volúmenes que escurrirían por las zonas habitadas y el muro de confinamiento del sistema Turbio-Trancura, se destruiría.

Un análisis más detallado de las inversiones debería ser un mejor indicador para el desarrollo de la evaluación económica, en razón de lo anterior se generaron los Términos de Referencia para la ejecución de la etapa siguiente de la ingeniería de las obras. Conforme al nivel de precisión utilizado en este estudio, es razonable considerar que la etapa siguiente debe corresponder a una ingeniería de factibilidad, la que permitiría precisar en mejor forma las inversiones.

Tabla 8-3: Resumen Presupuesto de Obras para el Control de Flujos Laharicos Asociados al Volcán Villarrica (Pesos de julio 2014; valores no incluyen IVA)

Cauce	Erupción hawaiana-estromboliana		
	Millones \$	UF	(millones US\$)
Trancura-Turbio-Correntoso	282.092	11.723.558	512.895
Zanjón Seco	92.794	3.856.446	168.716
Estero Correntoso	72.743	3.023.149	132.260
Estero Seco	88.307	3.669.973	160.558
TOTAL	535.936	22.273.126	974.429

8.2 Medidas No Estructurales

8.2.1 Monitoreo e Instrumentación.

Los sistemas de detección flujos de lodo o lahares han sido probados a nivel mundial con un alto nivel de éxito, la experiencia internacional muestra que invertir en programas como este constituye una estrategia adecuada para construir a que las comunidades tengan las herramientas para anticiparse ante un evento volcánico.

El sistema de detección de flujos de lodo en el Volcán Villarrica estará conformado por 4 estaciones, tres de ellas ubicadas en la parte alta del volcán y la ultima en la zona baja del cauce. Cada estación cuenta con un geófono, una tarjeta TMP para el procesamiento de los datos registrados por el geófono, un equipo de telecomunicación entre estaciones y con la estación base que es la encargada de recopilar y transmitir la información al Observatorio Vulcanológico y una estación para la protección de los equipos. Los costos de este sistema de detección de flujos de lodo se estimaron realizando cotizaciones con proveedores autorizados por los fabricantes de los componentes, valores de mercado publico según disponibilidad y con proveedores nacionales (para cables y partes pequeñas).

En total un sistema de detección de lahares tendría un costo estimado de USD\$158,605. El costo anual estimado de mantención seria de USD\$2,000.- por estación de monitoreo. A continuación se desglosan los costos del sistema de detección.

Ítem	Descripción	Costo
A	Sistema de monitoreo Básico	52,806
B	Sistema eléctrico	2,960
C	Sistema de Comunicación	17,859
D	Adecuaciones físicas	18,480
E	Instalación	66,500
	Total (USD)	158,605

El sistema de detección debe ser integrado como una herramienta importante en la toma de decisiones de las autoridades pertinentes, por lo que en etapas posteriores este se debe integrar al sistema de alerta temprana (como el que posee Pucón), el que tiene como fin entregar la información para que las autoridades comunales, líderes institucionales y la ciudadanía en general conozcan la forma de actuar ante la emergencia causada por el Volcán Villarrica

Siempre se debe tener en cuenta que la vigilancia volcánica tiene una probabilidad muy alta de pronosticar un evento lahárico si la dinámica del volcán muestra síntomas premonitorios, si el volcán no presenta signos premonitorios no existe sistema de vigilancia volcánica que sea capaz de predecir la formación de un flujo lahárico.

8.2.2 Integración de áreas laharicas a los planos reguladores.

8.2.2.1 Plan Regulador Comunal Pucón.

En el actual plan regulador de Pucón se establecen los siguientes criterios de zonificación territorial para los centros poblados sujetos a crecimiento urbano

- **ZUC Áreas Urbanas Consolidadas:** Áreas que cuentan con urbanización completa, entendiéndose por tales las que han capacitado el suelo para ser dividido y para recibir edificación, debidamente conectada a las redes de los servicios de utilidad pública.
- **ZCED Áreas Condicionadas Expansión y Densificación Urbana:** Son aquellos sectores proyectados como zonas de reserva de suelo urbano, que se ubican externas a las áreas consolidadas y que cuentan con medidas de mitigación ambiental.
- **ZE Áreas Especiales:** Son las áreas planificadas que en razón de su especial destino o naturaleza, están sujetas a restricciones de diverso grado en cuanto a su urbanización y edificación.
- **ZR Áreas Restringidas:** Son aquellas que por su condición, de peligrosidad o valor paisajístico y ambiental, están sujetas a restricciones o normativas específicas.

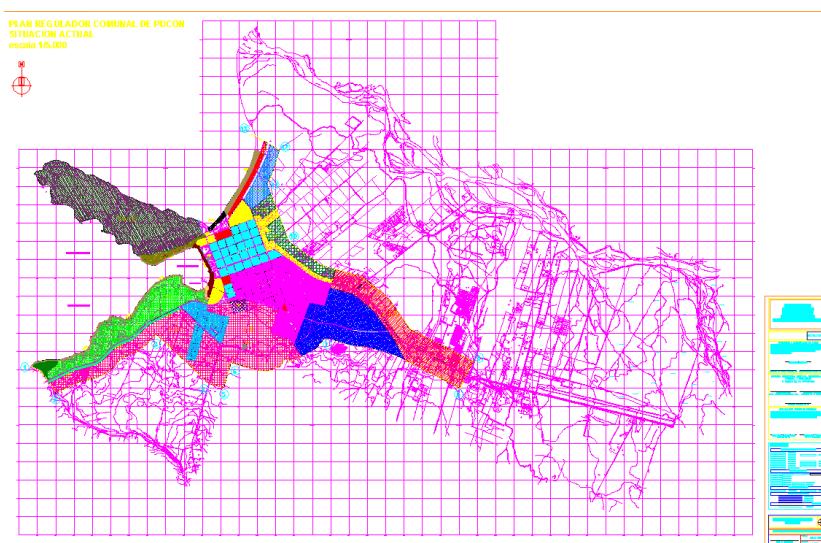


Figura 8-11 Esquema del Plan Regulador Vigente de la Ciudad de Pucón

(Fuente: <http://www.municipalidadpucon.cl/web2010/para%20descarga/Plan%20regulador/Plan%20Regulador.dwg>)

Se deben modificar las zonas de expansión, áreas restringidas y áreas especiales integrando las áreas de inundación obtenidas en el presente proyecto, además se deben analizar los resultados de las modelaciones que contemplan las obras de mitigación estructurales para planificar la nueva zonificación territorial. La transposición de las áreas de zonificación territorial en conjunto con las áreas de inundación por efectos de un Lahar tipo evento 1 que corresponde a erupciones Hawaiano-Estromboliana, se observa que la zona urbana y de expansión de Pucón se encuentra por completo dentro del área afectada.

En el Plan Regulador Comunal, solo incluye como zona de riesgo (ZR-6) a aquella área correspondiente a la desembocadura del estero Zanjón Seco. En el momento en que se intentó modificar en el año 2003, se utilizó el mapa de Peligros Volcánicos del SERNEGEOMIN (2000) solo para efectos indicativos, ya que existen zonas tales como la Z-8E en donde a pesar de encontrarse en un área con un altísimo peligro de lahar, tiene permitido la construcción de viviendas, equipamientos y actividades productivas.

A pesar que dentro del límite urbano, existan áreas consolidadas (Z-2, Z-3 y Z-6) y de expansión urbana (Z-2E y Z-6E) definidas en el Plan Regulador Comunal de Pucón, todas ellas se encuentran insertas en una superficie con un muy alto peligro de ser afectada por flujos laharícos y lávicos. Ante este escenario, la prohibición de viviendas, equipamientos y actividades productivas es casi imposible, pero si se hace necesario que las autoridades reconozcan cuales son los sectores con mayor amenaza de lahar y vulnerabilidad intrínseca del territorio. Ante este problema, se hace necesaria la identificación de aquellas zonas que requieren medidas de mitigación, estructurales y/o no estructurales, llevadas a cabo por medio del Índice de Riesgo por Lahares.

En la figura Figura 8-12 se presenta el plan regulador actual para la comuna de Pucón y las áreas afectas por un Lahar asociado al evento, se identifica que existen dos sectores fuera del área afectada por los flujos, estas son la península y sector calabozo. Las zonificación territorial actual se encuentran mayoritariamente dentro del área de riesgo (

Tabla 8-4). En este contexto, de no existir medidas de mitigación estructurales que permitan liberar espacios del riesgo no se debería permitir el crecimiento desde Pucón hacia el río Trancura.

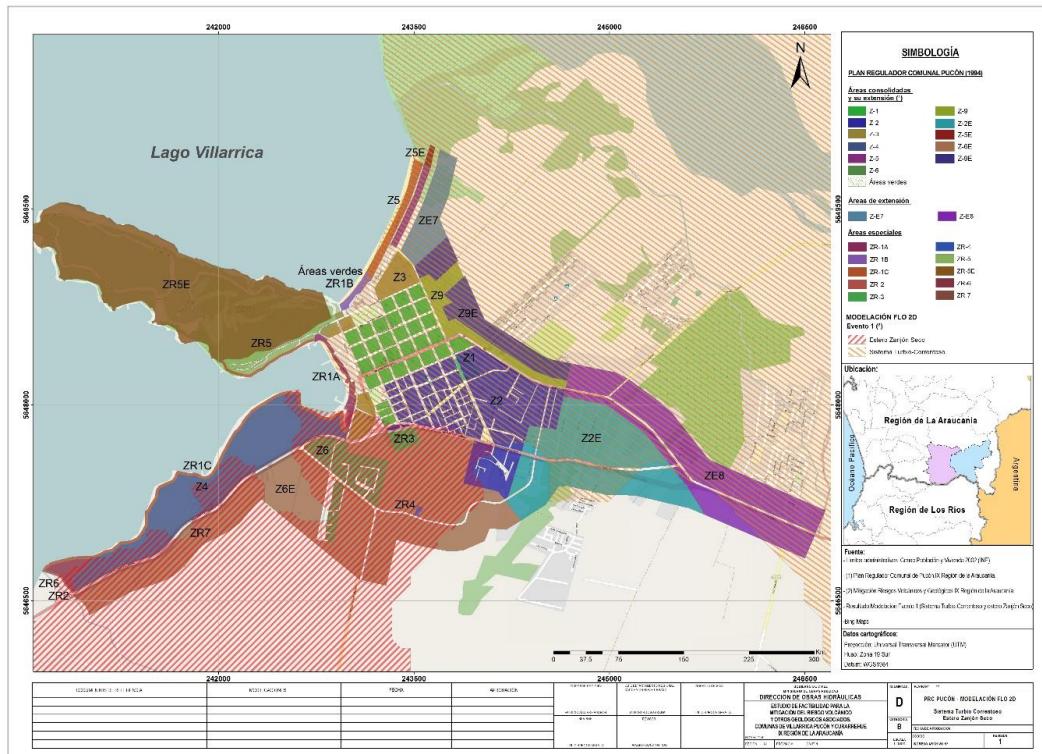


Figura 8-12: Áreas de zonificación territorial para la ciudad de Pucón y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.

Tabla 8-4 : Porcentaje de zona afectado, según área de inundación por flujo Laharico (evento 1)

(fuente:ep)

Zona	Porcentaje afectado
Z1	100%
Z2	87%
Z2E	66%
Z3	92%
Z4	45%
Z5	100%
Z5E	100%
Z6	100%
Z6E	80%
Z9	100%
Z9E	100%
ZE7	100%

Zona	Porcentaje afectado
ZE8	89%
ZR1A	76%
ZR1B	25%
ZR1C	50%
ZR2	74%
ZR3	100%
ZR4	100%
ZR5	0%
ZR5E	0%
ZR6	42%
ZR7	77%



En la Figura 8-13 se encuentran los loteos irregulares dentro de la comuna, el loteo la Turbina (4) y El Triunfo (7) quedarían fuera del área de riesgo. Estos loteos tienen la característica de estar construidas son tener ningún permiso o reglamento, por lo que de reubicar los loteos se deberá tener en cuenta las áreas de riesgos expuestas.

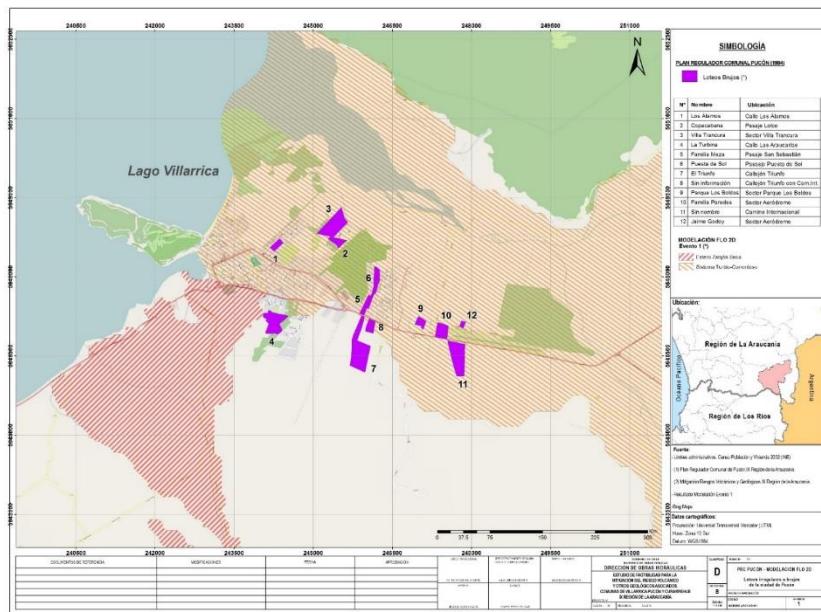


Figura 8-13 : Loteos irregulares o brujos de la ciudad de Pucón y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.

En la Figura 8-14 se encuentran las poblaciones o viviendas sociales en Pucón, las poblaciones Los robles, Cordillera alto y Ramón Guiñez darían fuera del área de riesgo. Lo mencionado en la actualización del Plan Regulador en su informe de Diagnóstico el departamento de vivienda de la municipalidad, está promoviendo la ubicación de las viviendas sociales en el sector de Cordillera Alto, al sur de la población Ramón Guiñez, en donde la municipalidad ya adquirió 3 hectáreas para la construcción de 120 viviendas.

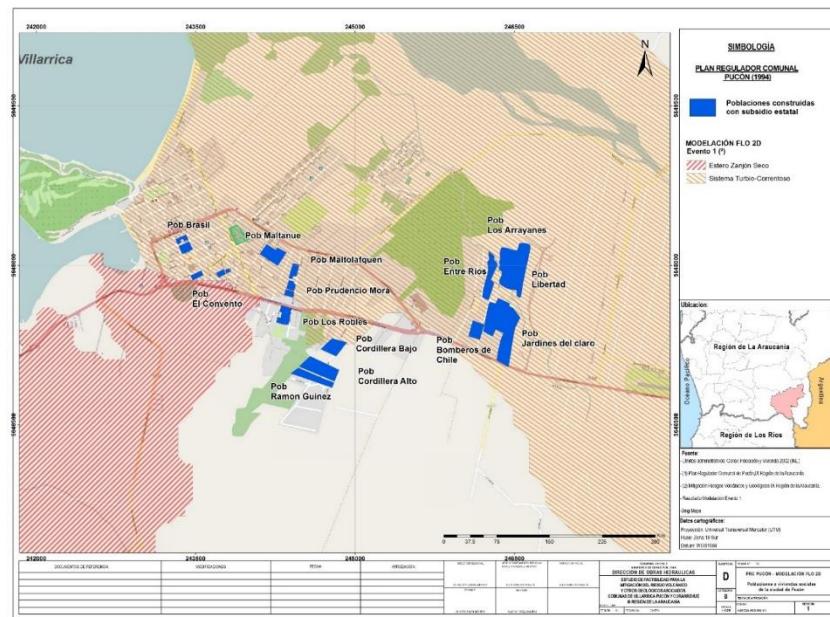


Figura 8-14 : Poblaciones o viviendas sociales de la ciudad de Pucón y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.

En la Figura 8-15 se encuentran los proyectos inmobiliarios identificados en la Actualización del plano regulador de Pucón en conjunto con las áreas de influencia del Lahar (evento 1), se aprecia que la mayoría de ellos se encuentran dentro del área de influencia del Lahar

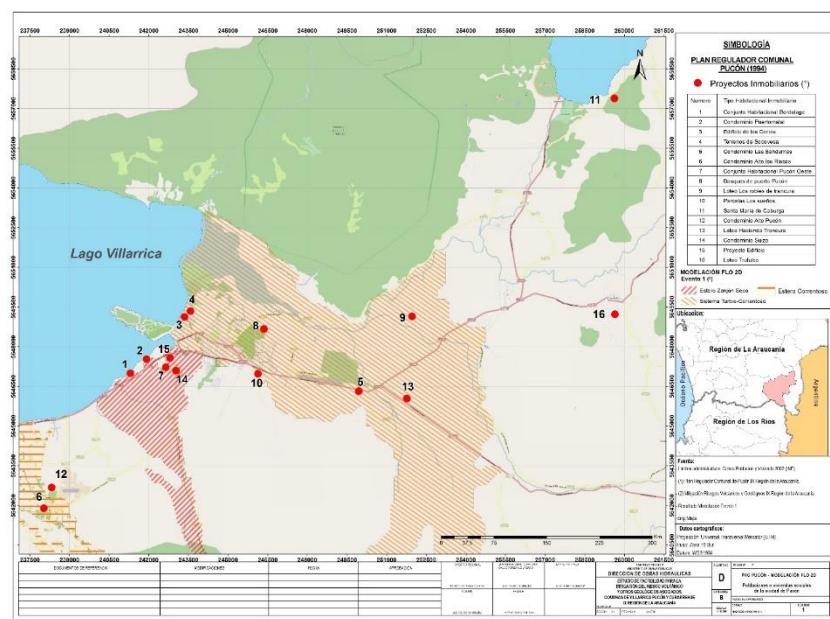


Figura 8-15 : Proyectos Inmobiliarios, ciudad de Pucón y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.



8.2.2.2 Plan Regulador Villarrica

La última actualización del Plan regulador de la comuna de Villarrica, se realiza el año 2003, en esta actualización se establecen la ampliación de los límites urbanos y algunas zonas de extensión.

8.2.2.2.1.1 Plan Regulador Vigente

A continuación se muestra una digitalización del PRC y el área afecta por flujos laharicos que descienden por el cauce del río Voipir. Por el lado este de la ciudad el cauce más cercano es el estero Huichatio, pero es no tendría influencia sobre el sector urbano de Villarrica. Se ha observado que el crecimiento de la comuna de Villarrica es hacia el lado Sur-oriente en donde se encuentra el cauce del río Voipir. Existe una distancia aproximada de 1,5 [km] entre el área calculada para el lahar y la zona de planificación existe.

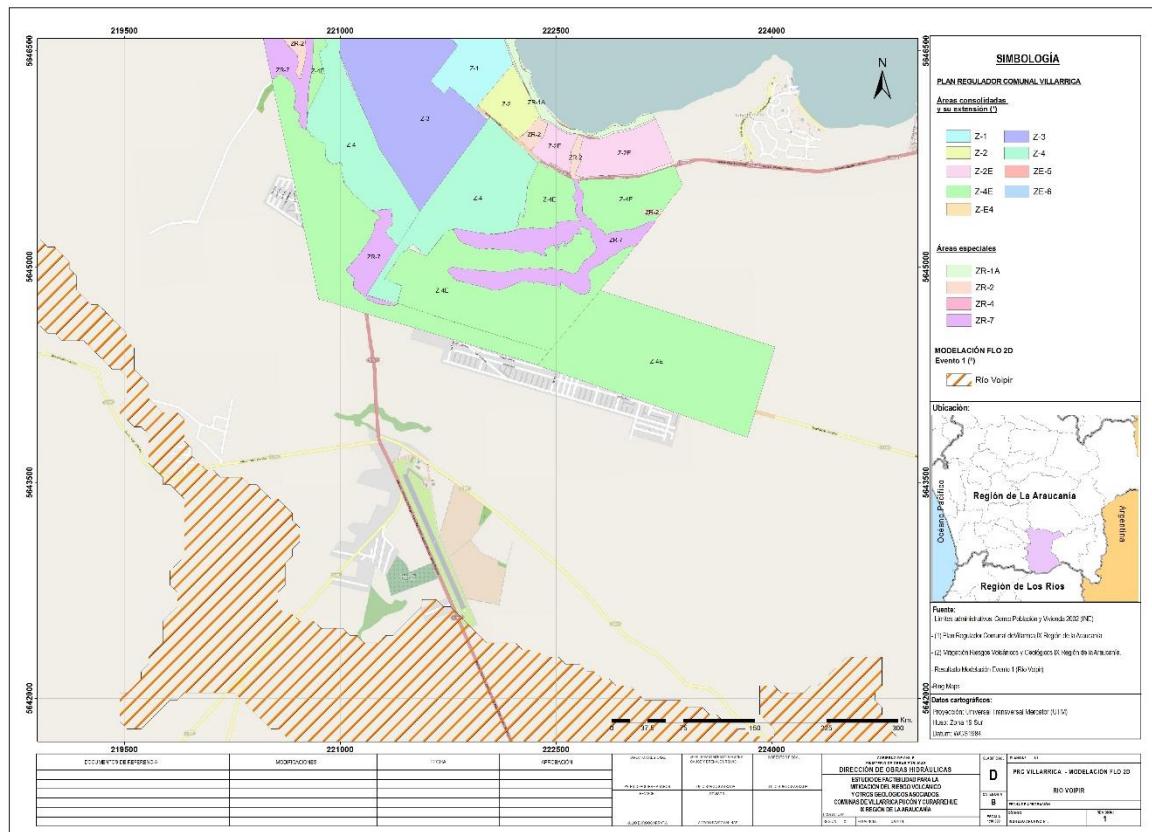


Figura 8-16 : Plan regulador actual para Villarrica y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.

(Fuente: Digitalización del Plan Regulador Villarrica -Flo2d del evento 1 para el río Voipir.)

8.2.2.2.1.2 Plan Regulador Propuesto

A continuación se muestra una digitalización de la propuesta del Plan Regulador Comunal (PPRC) y el área afecta por flujos laharicos que descienden por el cauce del río Voipir, estero Molco y Huichatio. En el lado este se puede observar que los cauces de Molco y Huichatio tienen influencia en la parte baja

del volcán o llegada al lago Villarrica afectando la nueva zona propuesta, en total la zona Z-H5 tiene un 76% de su área afectada por la zona de inundación por lahar (evento1), cabe destacar que la playa de Molco fue formada por la bajada de lahar anteriores.

Por otra parte en el PPRC se propone una expansión de la zonificación de la comuna de Villarrica hacia el lado Sur en donde se encuentra el cauce del río Voipir. En este caso a diferencia del PRC actual se están proponiendo áreas que se encuentran dentro del área afecta a lahares con un 42% del área ZE-p1 (gris) y un 4% del área ZE-M2 (café). Se observa que la zona oriente y poniente de la ciudad de Villarrica quedan fuera y lejanas de las zonas de flujos laharicos.

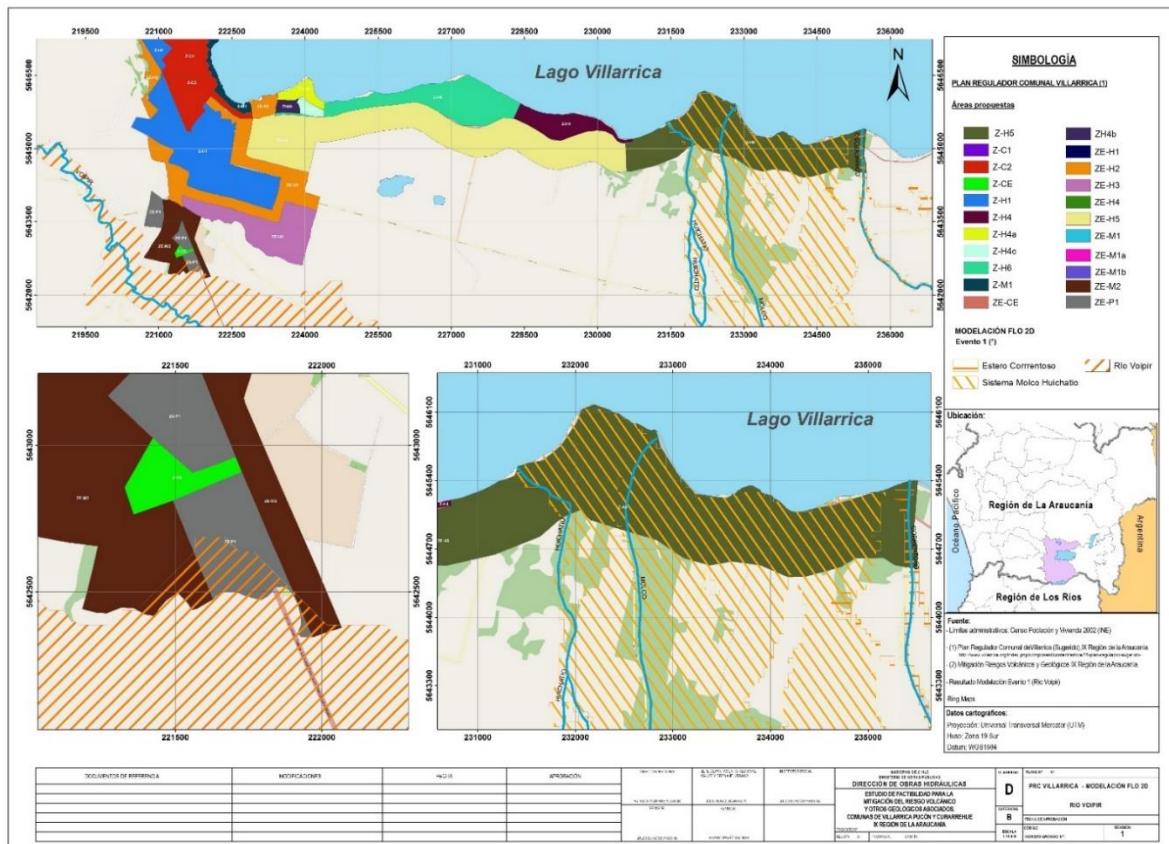


Figura 8-17 : Plan regulador propuesto para Villarrica y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.

8.2.2.3 Plan Regulador comunal Villarrica- Sector Lican-Ray

A continuación se muestra una digitalización del PRC Villarrica, sector Lican Ray y el área afectada por flujos laharicos que descienden por el cauce del Estero Seco - Pino Huacho. Gran parte de la zonificación actual de Lican-Ray se encuentra dentro del área de inundación por efectos de flujos

laharicos, quedando dentro del área un 11% de la zona Z-3, 85 % del área Z-5 , 68% del área Z-3E, 32% del área Z-3b, 10% del área ZR-2, 98% del área Z-4, 58% del área ZR-4 y el 100% del área z-2a.

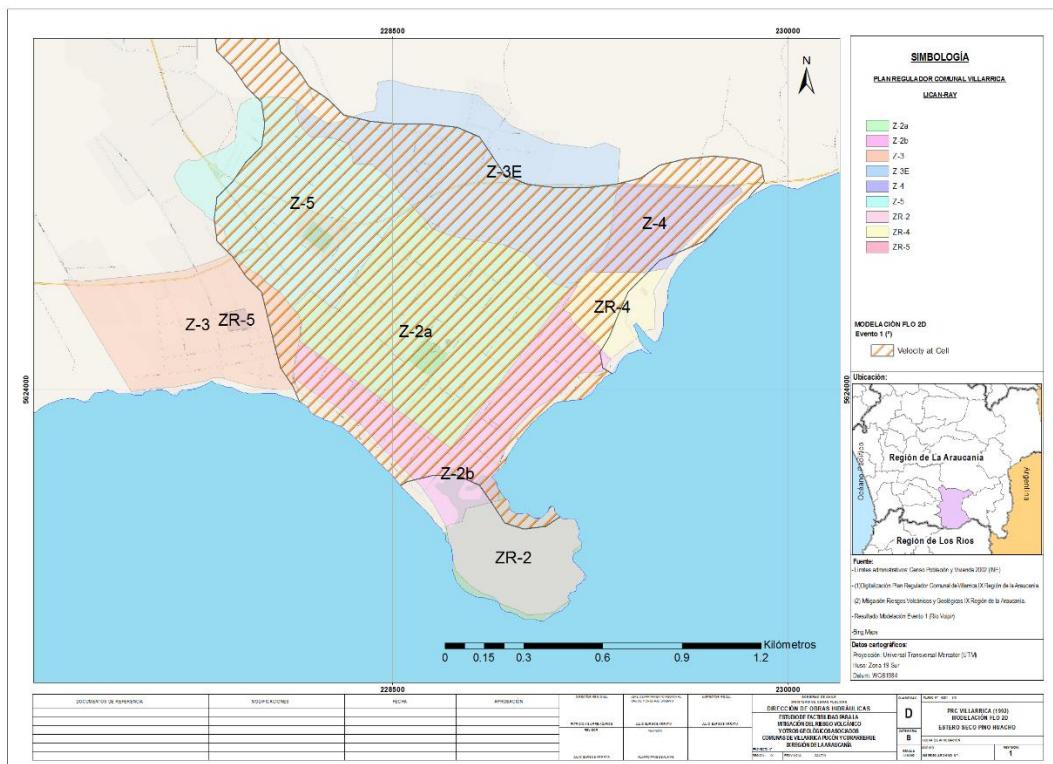


Figura 8-18 : Plan regulador Comunal de Villarrica, Sector Lican-Ray y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.

8.2.2.4 Plan Regulador Intercomunal Villarrica Pucón

El Plan Regulador Intercomunal de Villarrica - Pucón, considera solo áreas de riesgo por corrientes de barro o aluviones a la desembocadura del estero Zanjón Seco, estero Correntoso (límite comunal con Villarrica) y la desembocadura del río Trancura (al oriente de la ciudad de Pucón). El año 2005, cuando se intentó actualizar este instrumento, considerando el Mapa de Peligros del Volcán Villarrica (SERNAGEOMIN, 2000), esta actualización se enfocó especialmente aquellas áreas con un muy alto peligro de ser afectadas por lahares (ALI1 y AI1), los actores regionales mencionan que es necesario abarcar los recorridos completos de los lahares y su impacto en todo el sistema del volcán Villarrica. Como esto no se ha podido llevar a cabo, por el momento se sigue manteniendo el área de riesgo acotada a las desembocaduras de ríos y esteros, postergando la acción de este tipo de eventos dentro del límite urbano.



Aquí se muestra una digitalización del Plan Regulador Intercomunal (PRI) y el área afecta por flujos laharicos que descienden por el cauce del río Voipir, esteros Molco, Huichatio, Correntoso, Zanjón Seco y ríos Turbio–Correntoso.

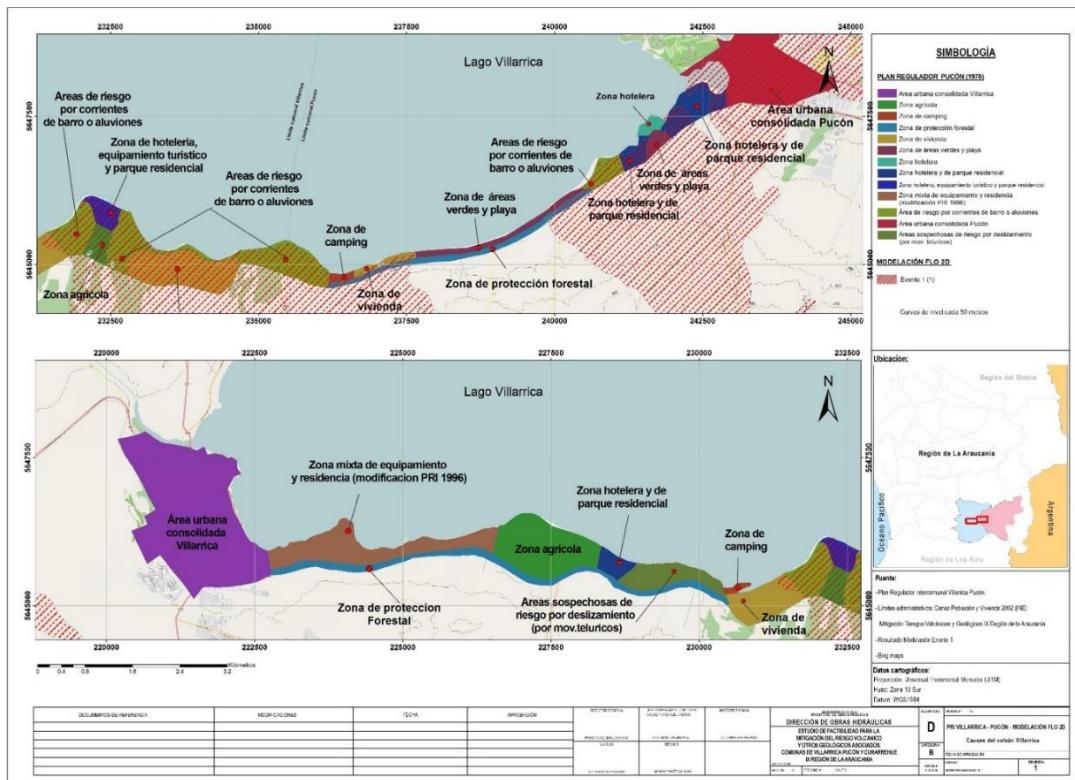


Figura 8-19 : Plan regulador Intercomunal y áreas de influencia de un Lahar tipo evento 1.

Tabla 8-5 : Porcentaje de zona afectada, según área de inundación por flujo Laharico (evento 1)
(fuente:ep)

Zonas	Área Afectada
Área de riesgo por corrientes de barro o aluviones	93%
Área urbana consolidada Pucón	95%
Área urbana consolidada Villarrica	0%
Áreas sospechosas de riesgo por deslizamiento (por mov. teluricos)	0%
Zona agrícola	14%
Zona de áreas verdes y playa	23%
Zona de camping	35%
Zona de protección forestal	16%
Zona de vivienda	64%
Zona hotelera	1%
Zona hotelera y de parque residencial	49%
Zona hotelera, equipamiento turístico y parque residencial	93%
Zona mixta de equipamiento y residencia (modificación PRI 1996)	0%

8.2.2.5 Costos

Los costos asociados a la actualización de los planes reguladores, se presentan en la siguiente tabla.

Elaboración de actualización de Plan Regulador	ETAPA I - DIAGNÓSTICO Etapa II - PROPUESTA Y ACUERDO. Etapa III ANTEPROYECTO DEL PLAN Etapa IV PLAN Etapa V :APROBACIONES	\$80.000.000
	Total	\$80.000.000

8.2.3 Medidas de información y educación a la comunidad.

Todas las medidas preventivas o de mitigación que se adopten deben estar necesariamente acompañadas de una campaña de difusión de información, estas tienen que tener como objetivo dar a conocer los tipos de alerta y los procedimientos que se deben aplicar en caso de un evento lahárico. Por lo que es fundamental que las comunidades urbanas y rurales tengan un canal de comunicación claro y accesible ante un evento de actividad Volcánica.

8.2.3.1 Comunitaria

Se debe transmitir a la comunidad la importancia de vivir en conjunto con el volcán, generando conciencia del manejo de los riesgos naturales. También se debe dar a conocer las acciones a ejecutar al momento de una alarma de Lahar, tales como acceso a las vías de evacuación y zonas seguras, además de informar cuales son los medios de comunicación válidos, etc. Esta se podrá hacer mediante talleres orientados a los líderes comunitarios y/o a la comunidad en general.

La población en general sabe que está expuesta a las amenazas, pero el no tener conciencia de su grado de vulnerabilidad les impide identificar posibles medidas de mitigación del riesgo a partir de las condiciones existentes y de los recursos disponibles. Durante la etapa de inicio de los SAT, la comunidad debe identificar el sistema propuesto como una medida no estructural para la reducción de la vulnerabilidad y por ende del riesgo a los que están expuestos (Silva Rotela).

También es esencial que los planes de gestión de desastres estén en su lugar, bien practicados y probados. La comunidad debe estar bien informada acerca de las opciones de seguridad y comportamiento, las vías de evacuación disponibles, y la mejor manera de evitar daños y pérdidas materiales.

8.2.3.2 Escolar

Los programas de educación y preparación juegan un papel clave. Es fundamental que la comunidad escolar tenga intrínsecamente inculcados los procedimientos antes, durante y después de una emergencia. Esto se logra con material educativo para el apoyo en la realización de eventos de

difusión e inclusión en clases, simulacros de emergencia, educación por parte de los padres. Esto permite percibir, interpretar y reaccionar de forma correcta ante un evento.

8.2.3.3 *Turística*

Por el gran atractivo turístico que representa el Volcán y sus alrededores existe un aumento explosivo de población flotante en la época estival o vacaciones en general, generando una dificultad adicional y que se debe tener en cuenta en el manejo del plan de evacuación. Es fundamental informar de manera efectiva los turistas que visitan la zona, indicando claramente cuáles son las señales de alerta, zonas de menor riesgo, vías de evacuación y recomendaciones sobre las acciones a realizar en caso de una alerta.

La colaboración de las agencias turísticas, hoteles, campings o cualquier entidad que se relaciona con el turismo se hace indispensable para la difusión de la información.

8.2.3.4 *Costos*

La realización de un plan de comunicación y difusión en medios escritos y electrónicos regionales y comunales (Villarrica, Pucón y Curarrehue) y capacitación de personal, tendría como mínimo un costo aproximado de \$60.000.000 .-

8.2.4 **Mantención de Cauces**

En general los esteros en estudio tienen su origen en el volcán Villarrica y descargan en una corta distancia en el lago Villarrica, por lo que el flujo transportado proveniente mayoritariamente de los deshielos en la alta montaña.

En esta condición los cauces cuentan con caudales menores que permiten el crecimiento de abundante vegetación en su lecho y ribera. Hecho que se constató en las distintas visitas a terreno encontrando gran cantidad de pasto, arbustos y árboles dentro canal principal y en las riberas de los cauces.

En los eventos laháricos anterior se pudo observar que producto de la gran energía con la que se desplaza el flujo, este arrastraría con la vegetación que se encuentra a su paso acumulándose en las obras hidráulicas generando represamientos del flujo los que pueden los siguientes efectos

- Dañar las obras
- Peraltar el flujo y aumentar el nivel de inundación
- Hacer fallar la obra
- Producto del represamiento del flujo y falla de la obra se podría provocar un “rompimiento de presa”.

Como se define en el *“Programa De Mantenimiento y Conservación de Cauce”* del Ministerio de Medio Ambiente, de España, un programa de mantención de cauces tiene como finalidad principal es la

de facilitar la circulación de las aguas superficiales para evitar los problemas por inundaciones en las crecidas de nuestros ríos, salvaguardando al máximo los valores medioambientales que tienen los ecosistemas acuáticos e incluso, favoreciendo su recuperación.

De lo observado en las distintas campañas de terreno en relación a el estado de mantención de los cauces, se hace altamente necesario y recomendable realizar una mantención de los todos cauces en estudio, además de contar con un programa de mantención (anual o bi-anual), con el fin de recuperar la capacidad portante de estos, permitiendo un mejor escurrimiento (sin obstáculos) del flujo que desciende desde el volcán, para lograr que este llegue de forma rápida al lago.

Si bien esta medida la solución principal ante los efecto de los flujos laháricos, es un complemento para las demás obras a ejecutar.

Dicha mantención deben considerar principalmente:

- Desbroce o eliminación de flora introducida existente en el cauce.
- Eliminación y poda de arbolado que obstruyan el flujo en el eje y riberas del cauce.
- Retiro a botadero autorizado de los escombros, árboles caídos y material removido en toda la extensión del cauce.
- Retiro de obras en desuso.
- Recuperación de zonas húmedas inundables.

8.2.4.1 *Costo asociado.*

En la estimación del costo asociado a una limpieza de un cauce, se consideró un equipo que consta de mano de obra no calificada con las herramientas necesarias para la limpieza, desbroce y/o tala de árboles como son escaleras, podadora en altura, desbrozadora, motosierra y EEPP adecuados para cada actividad.

Además se debe incluir el uso de maquinaria pesada adecuada según las condiciones del cauce, para acopiar cargar y trasladar el material al lugar designado (retiro a botadero), como mínimo se deben utilizar una retroexcavadora y un camión tolva.

El costo de esta actividad, con una duración máxima de 2 meses es de \$30.000.000.- de pesos (iva incluido) por kilómetro (considerando un área a intervenir de 15.000 m² por kilómetro de cauce).

9 Proceso de Participación Ciudadana

9.1 Objetivos

Los objetivos generales de la participación ciudadana, requeridos en los términos de referencia, consideraron los siguientes puntos:

- Socializar el estudio con la comunidad en general, informando y difundiendo sus alcances y los procedimientos técnicos y administrativos que los conforman (naturaleza, etapas, características, avances, plazos, etc.).
- Detectar e identificar las implicancias sociales y económicas de los problemas asociados a los riesgos volcánicos, y geológicas en los cauces que incluye el estudio, y las posibles medidas de mitigación, levantando información de campo para incorporarla al estudio de ingeniería, cuando fuera pertinente.
- Describir y determinar las principales implicancias socioculturales y potenciales conflictos presentes y futuros, asociados al estudio en otras etapas de su ciclo de vida.

9.2 Metodología utilizada

Para la elaboración del modelo de Participación Ciudadana desarrollado se realizó un análisis estratégico y de focalización siguiendo los lineamientos del MOP. La información, centrada en el análisis del territorio y la comunidad involucrada en el proyecto, permitió elaborar la estrategia de participación pertinente, considerando: actores claves y sus características, demandas de participación, factores críticos y ventanas de oportunidad, entre otras variables.

De acuerdo a ello, se definió desarrollar una estrategia cualitativa, abocada a la recopilación de antecedentes pertinentes, así como a la socialización del proyecto, de carácter más bien informativo y de forma secundaria consultivo, en relación al relevamiento de impresiones y valoraciones de los actores relevantes en aspectos generales. Cabe mencionar que la propuesta originalmente contemplada sufrió una serie de modificaciones.

9.2.1 Realización de entrevistas en profundidad

Se realizaron 24 entrevistas individuales a actores relevantes de las comunas consideradas, de acuerdo a la tipología de actores identificada en el análisis estratégico y de focalización realizado previamente. A través de esta técnica se accedió a la información verbal oral que expresara las maneras de ver, pensar y sentir de los propios entrevistados que participan de esta interacción regulada por preguntas abiertas y respuestas libres.

9.2.2 Actividades participativas

Además se realizó una serie de actividades participativas, consistentes en la realización de talleres participativos. Al respecto, se identificaron de manera previa a 'grupos de actores clave', los

cuales tuvieran alguna relación o pudieran ejercer influencia con respecto al posterior desarrollo de la etapa de factibilidad y ejecución del proyecto. Se desarrollaron 6 talleres participativos con distintos grupos de actores sociales, como Concejo Municipal, empresarios, comunidad indígena Villarrica, comunidad Pucón, comunidad indígena Pucón, comunidad escolar y un taller participativo con expertos Pucón/Villarrica.

9.2.3 Difusión

Junto con lo anterior, se realizó una difusión del proceso de participación ciudadana enfocada en la socialización del contexto del proyecto, y en la convocatoria a aquellas actividades participativas abiertas a la comunidad. Los medios utilizados fueron las invitaciones directas, contactos con medios de prensa locales (8 radios, 6 diarios escritos, 3 diarios digitales, 2 canales de TV) y por último la difusión en redes sociales asociadas a medios de comunicación

9.3 Conclusiones y recomendaciones

9.3.1 Acuerdos alcanzados y pendientes

Por el tipo de proceso participativo, de carácter informativo, no se desarrollaron acuerdos explícitos, sin embargo, se plantearon una serie de elementos a desarrollar y compromisos de trabajo a futuro, entre los que se cuentan:

- *Continuidad del proceso participativo:* Se demuestra un alto interés en la temática, relevando la necesidad de tomar parte en el proceso participativo de la etapa de factibilidad, a lo que se compromete la realización de nuevas actividades hacia fin del 2014.
- *Disponibilidad de actores claves para actuar como agentes transmisores de la información:* Diversos agentes considerados relevantes se muestran disponibles e interesados en poder transmitir la información del proyecto, así como en cuanto a la prevención y datos de seguridad respecto al volcán en sus propias comunidades. Manifiestan interés en capacitarse en mayor medida en la temática para poder ejercer esta función.
- *Disposición de participación de la autoridad local:* la autoridad local, a nivel comunal y regional se muestra interesada y proclive a participar de forma activa en el proceso, y en recibir la información que de éste se derive para la toma de decisiones relevantes en su planificación.

9.3.2 Recomendaciones a tener en cuenta

A consecuencia del proceso de participación ciudadana desarrollado, de los resultados, así como problemas evidenciados en su ejecución, se proponen las siguientes recomendaciones:



Situación Identificada	Recomendaciones
Baja convocatoria a actividades de participación masiva	(1) Desarrollar las actividades de participación en horarios posteriores a la jornada laboral (después de las 18:00 hrs), o fines de semana, en particular día sábado.
Participantes consideran necesario transmitir información en lenguaje menos técnico	(1) Transmitir la información en lenguaje más simple, y con menos tecnicismos a la comunidad. (2) Esto se complementa con la moderación efectiva de las actividades de participación por profesionales de las ciencias sociales, con experiencia en el trabajo de grupo y socialización de la información. (3) realización de actividades específicas enfocadas en detallar aspectos técnicos del proyecto.
Empresarios del rubro inmobiliario considerados como posiblemente adversos a las iniciativas consideradas, prácticamente nula participación de éstos en el proceso	(1) intencionar el trabajo con este grupo en particular, con el fin de conocer su percepción efectiva respecto al proyecto de mitigación, así como respecto al proyecto de mitigación, así como respecto a las medidas contempladas. (2) Socializar el proyecto enfatizando en los beneficios que estas medidas traerán especialmente al rubro.
Buena disposición e interés de actores relevantes por apoyar en la transmisión de conocimientos pertinentes.	Desarrollar una escuela de líderes, enfocada en la capacitación de agentes claves del territorio para socializar y apoyar la concientización respecto al riesgo en sus propias comunidades.
Percepción de mayor viabilidad, y requerimiento de desarrollo de medidas de mitigación blandas.	Potenciar el desarrollo de medidas de mitigación blandas que ya se avizoran como necesarias. En especial profundizar los aspectos educativos mediante la utilización de material informativo y de difusión.
Necesidad de contar con material claro y atractivo respecto al contexto del estudio e información sobre zonas de riesgo y reacción.	(1) incorporar a la estrategia comunicacional el desarrollo de material educativo (afiches, volantes, trípticos, etc.) que presente información clara y precisa para los distintos públicos. (2) Generar una identidad gráfica que permita asociar de mejor manera el proyecto, tanto a una imagen como un eslogan. Estos deben apuntar a la prevención.

10 Estudio de Análisis Ambiental

Se caracterizó un área de influencia preliminar que es factible de ser afectada por la ejecución del proyecto, la cual fue determinada para cada componente ambiental y analizada en base a antecedentes bibliográficos recopilados, junto con un análisis espacial y por medio de campañas realizadas en terreno. Con lo mencionado, se presentó una visión bastante clara y específica de los componentes que pudieran ser impactados por la ejecución del proyecto, graficando los sectores donde el componente factible de impactar se emplaza, lo que resulta un valioso aporte a la hora de planificar el desarrollo de las obras.

El análisis de la legislación ambiental aplicable al proyecto presentó un resumen de las normativas que tendrán implicancia para su desarrollo, pudiendo visualizar en etapas tempranas las exigencias que se podrían suscitar para la materialización de las obras.

El examen de pertinencia de ingreso al SEIA concluyó que el proyecto debe ingresar por medio de un EIA. Dicho ingreso al SEIA involucra a parte de la elaboración propiamente tal del EIA, una serie de estudios específicos y en detalle, los cuales han sido indicados y descritos en este estudio, dando pautas para su adecuada realización.

La representación espacial de los componentes ambientales factibles de impactarse por la ejecución y operación del proyecto, ayuda considerablemente a determinar la mejor forma de abordar las acciones y medidas a emplear para la mitigación de los impactos ambientales probables. En este contexto, la definición de zonas de restricción ambiental representa un antecedente importante para no cometer errores que generen una complicación mayor en este ámbito.

La identificación y descripción de los estudios de las etapas posteriores, permite proyectar fundamentadamente los recursos humanos y monetarios que deberán considerarse para un apropiado desarrollo ambiental, en todas las etapas del proyecto, correspondiendo a un valioso elemento para la toma de decisiones y orientación a nivel de prefactibilidad.

Finalmente, cabe destacar que el Estudio de Análisis Ambiental llevado a cabo se ha desarrollado de forma específica y dirigida hacia las características del proyecto y su emplazamiento, englobando ampliamente el espectro de acciones, estudios, gestiones y elementos que deben ser considerados para la materialización de las obras en concordancia con las exigencias medio ambientales y el correspondiente desarrollo sustentable dentro de las iniciativas civiles en nuestro país.