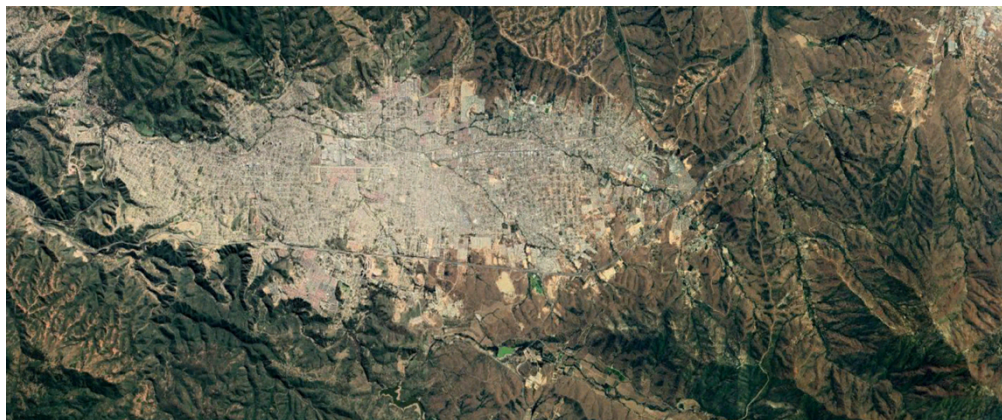


ACTUALIZACIÓN PLAN REGULADOR COMUNAL DE VILLA ALEMANA



ETAPA 4

Anteproyecto, informe ambiental y consulta pública

Anexo Estudio de Riesgos

Agosto 2025



ILUSTRE
MUNICIPALIDAD
DE VILLA ALEMANA
Ciudad de la Eterna Juventud

Contenido

1	Introducción	9
1.1	Objetivos del estudio	9
1.1.1	Objetivos generales del estudio	9
1.1.2	Objetivos específicos	9
1.2	Ubicación del área de estudio	9
1.3	Alcances y limitaciones	11
1.4	Marco jurídico y nomenclaturas	11
1.5	Metodología general del estudio	12
1.5.1	Recopilación de antecedentes	13
1.5.2	Elaboración de líneas de base	13
1.5.3	Catastro de peligros	14
1.5.4	Diagnóstico de peligros	14
1.5.5	Modelación de peligros	14
1.5.6	Elaboración de mapas de peligros	14
1.5.7	Definiciones de áreas de riesgo y recomendaciones	15
2	Líneas de base	16
2.1	Marco geodinámico	16
2.2	Marco geomorfológico	16
2.2.1	Unidades morfoestructurales	16
2.2.2	Aspectos geomorfológicos relevantes	18
2.2.3	Parámetros morfométricos	20
2.3	Marco geológico	23
2.3.1	Depósitos no consolidados	23
2.3.2	Unidades Cuaternarias Pleistocénicas	24
2.3.3	Rocas estratificadas del Jurásico	24
2.3.4	Intrusivos Jurásicos	24
2.4	Sismicidad	26
2.4.1	Tipos de sismos	26
2.5	Clima e hidrología	27

2.5.1	Marco climático	27
2.5.2	Marco hidrológico	28
3	Inundaciones terrestres	31
3.1	Catastro	31
3.2	Diagnóstico	40
3.2.1	Inundaciones por desborde de cauce	40
3.2.2	Inundaciones por anegamiento	42
3.3	Modelación hidráulica	42
3.3.1	Construcción de modelos hidráulicos	42
3.3.2	Síntesis de resultados de resultados	44
3.4	Susceptibilidad y zonificación	45
3.4.1	Inundación por desborde de cauce	45
3.4.2	Inundación por anegamiento	46
4	Remociones en masa	48
4.1	Catastro	48
4.2	Diagnóstico	51
4.2.1	Flujos de barro y/o detrito	51
4.2.2	Procesos de ladera	51
4.3	Susceptibilidad y zonificación	52
4.3.1	Flujos de barro y/o detrito	52
4.3.2	Procesos de ladera	53
5	Sismicidad	56
5.1	Catastro	56
5.2	Diagnóstico	64
6	Incendios forestales	67
7	Recomendaciones y conclusiones	73
7.1	Zonificación de la susceptibilidad	73
7.2	Definición de las áreas de riesgo	74
7.3	Conclusiones y recomendaciones específicas	77
7.3.1	Inundaciones	77
7.3.2	Remociones en masa	78

7.3.3	Sismicidad	79
8	Bibliografía	80
9	Anexo A Definiciones de peligro y riesgo utilizadas en este informe	83
9.1	Bibliografía	85
10	Anexo B Descripción de peligros geológicos analizados	87
10.1	Procesos exógenos o externos de la tierra	87
10.1.1	Inundaciones terrestres y litorales	87
10.1.2	Procesos de remoción en masa	89
10.2	Procesos endógenos o internos de la tierra	95
10.2.1	Sismicidad	95
10.3	Bibliografía	101
11	Anexo C Revisión de antecedentes	103
11.1	Instrumentos de planificación	104
11.2	Geología	109
11.3	Hidrología	109
11.4	Peligros Naturales	109
11.5	Información vectorial	117
12	Anexo D Estimación de caudales	123
12.1	Metodología	123
12.1.1	Revisión de antecedentes	123
12.1.2	Caracterización de cauces y definición de caudales de crecida	123
12.2	Delimitación y Caracterización de Cuencas	127
12.3	Determinación de Caudales de Crecidas	129
12.4	Coeficiente de Escorrentía	129
12.5	Intensidad	130
12.6	Área	132
12.7	Resultados	132
13	Anexo E Modelación hidráulica	133
13.1	Metodología	133
13.2	Coeficiente de Manning	134
13.3	Resultados modelos HEC RAS	136

13.3.1	Resultados Estero Pejerreyes Modelo 1	136
13.3.2	Resultados Estero Pejerreyes Modelo 2	139
13.3.3	Resultados Estero Pejerreyes Modelo 3	142
13.3.4	Resultados Estero Pejerreyes Modelo 4	145
13.3.5	Resultados Estero Quilpué Modelo 1	148
13.3.6	Resultados Estero Palmilla Modelo 1	152
13.3.7	Resultados Estero Huanhualí Modelo 1	156
13.3.8	Resultados Estero Huanhualí Modelo 2	159
13.3.9	Resultados Estero Huanhualí Modelo 3	163

Índice de Figuras

Figura 1-1	Ubicación del área de estudio	10
Figura 1-2	Metodología general del estudio	13
Figura 2-1	Marco geodinámico representado en 3D	16
Figura 2-2	Unidades morfoestructurales a escala regional 1:1.000.000	17
Figura 2-3	Mapa geomorfológico de la comuna de Villa Alemana a escala gráfica 1:50.000	19
Figura 2-4	Carta morfométrica de elevaciones de la comuna de Villa Alemana	21
Figura 2-5	Carta morfométrica de pendientes de la comuna de Villa Alemana	22
Figura 2-6	Mapa geológico de la comuna de Villa Alemana a escala gráfica 1:50.000	25
Figura 2-7	Representación gráfica de los terremotos de subducción históricos con magnitud estimada superior a 7.2 y sus respectivos largos de ruptura (abajo, escala en años). En color rojo se resalta la región de Valparaíso y en la franja, los principales terremotos ocurridos frente a sus costas	27
Figura 2-8	Estaciones meteorológicas cercanas a la comuna de Villa Alemana. Nombre de las estaciones en la Tabla 2-3	30
Figura 3-1	Catastro de inundaciones en la comuna de Villa Alemana	39
Figura 3-2	Zona adyacente al Colegio San Antonio de Villa Alemana donde el Estero Pejerrey sale a superficie	41
Figura 3-3	Zona donde se junta el Estero Pejerrey y Quilpué	42
Figura 4-1	Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente el terreno	53
Figura 5-1	Mapa regional del contexto del área de estudio con los epicentros de la sismicidad registrada de magnitud superior a 2,5, según el Catálogo NEIC entre 1970 y 2020	64
Figura 5-2	Perfil de franja topográfica sobre localización de hipocentros sísmicos a lo largo de una franja de 50 km de ancho por 350 km de largo demarcada con rectángulo punteado en la Figura 5-1 (Notar diferencia en escala vertical de ambos gráficos)	65
Figura 6-1	Número de incendios, provincias de la R. de Valparaíso (2015-2020)	67
Figura 6-2	Número de incendios por comunas, provincia del Marga-Marga, 2015-2020.	68
Figura 6-3	Incendios forestales período 2022-2023	69

Figura 6-4 Focos de incendios, comuna de Villa Alemana	70
Figura 6-5 Áreas de amenaza de incendio forestal y evento de incendio de febrero de 2024, comuna de Villa Alemana	71
Figura 7-1 Esquema para ejemplificar del daño provocado por eventos de inundación por desborde de cauces con diferente magnitud en zonas que presentan distinto grado de susceptibilidad	74
Figura 9-1 Etapas de evaluación de un evento geológico peligroso.	85
Figura 10-1 Clasificación de los tipos de inundaciones	88
Figura 10-2 Clasificación de tipos de remociones en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera	91
Figura 10-3 Ejemplo de deslizamientos. A: Deslizamiento rotacional, B: Deslizamiento traslacional	92
Figura 10-4 Ejemplo de erosión por retrocesos de terrazas, aplicado al desarrollo de planicies de abrasión	92
Figura 10-5 Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representa en puntos rojos los epicentros con magnitud >5. Nótese como la sismicidad “ilumina” los límites de las placas tectónicas, dibujadas en amarillo.	95
Figura 10-6 Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile	96
Figura 10-7 Tipos de sismos ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto)	97
Figura 10-8 Tipos de falla y esfuerzos asociados	98
Figura 10-9 Tipos de ondas sísmicas	99
Figura 10-10 Amplificación de la vibración generada por un terremoto	100
Figura 11-1 Plano PR-VA-01	105
Figura 11-2 Temperatura y precipitaciones normalizadas	106
Figura 11-3 Red Hídrica Principal Villa Alemana	107
Figura 11-4 Principales Áreas de Inundaciones en la zona urbana de la comuna de Villa Alemana	108
Figura 11-5 Ciclo anual de temperatura media para la región de Valparaíso en base al CR2MET	111
Figura 11-6 Ciclo anual de precipitaciones para la región de Valparaíso en base a CR2MET	111
Figura 11-7 Climogramas de temperatura y precipitación para Punta Ángeles, Lago Peñuelas, Lliu Lliu y Quillota.	112
Figura 11-8 Áreas de inundación por desborde de cauces.	113
Figura 11-9 Eventos de inundación y anegamiento en el AMV entre el año 1980 y 2017.	114
Figura 11-10 Localización de incendios forestales en el AMV entre 1998 y 2018.	114
Figura 11-11 Amenaza de incendio forestal en Villa Alemana.	116
Figura 11-12 Amenaza sísmica en Villa Alemana	117
Figura 12-1 Curva IDF	126
Figura 12-2 Delimitación de cuencas en la zona de estudio	127
Figura 12-3 Modelos priorizados	128
Figura 12-4 Coeficientes de escorrentía cuencas Villa Alemana	130
Figura 12-5 Curva IDF	131
Figura 13-1 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 1, T = 100 años	137

Figura 13-2 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 1, T = 100 años	138
Figura 13-3 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 2, T = 100 años	140
Figura 13-4 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 2, T = 100 años	141
Figura 13-5 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 3, T = 100 años	143
Figura 13-6 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 3, T = 100 años	144
Figura 13-7 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 4, T = 100 años	146
Figura 13-8 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 4, T = 100 años	147
Figura 13-9 Resultados modelo hidráulico estero Quilpué, Modelo 1, T = 100 años	150
Figura 13-10 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Quilpué, Modelo 1, T = 100 años	151
Figura 13-11 Resultados modelo hidráulico estero Palmilla, Modelo 1, T = 100 años	154
Figura 13-12 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Palmilla, Modelo 1, T = 100 años	155
Figura 13-13 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 1, T = 100 años	157
Figura 13-14 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 1, T = 100 años	158
Figura 13-15 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 2, T = 100 años	161
Figura 13-16 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 2, T = 100 años	162
Figura 13-17 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 3, T = 100 años	164
Figura 13-18 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 3, T = 100 años	165

Índice de Tablas

Tabla 1-1 Cuadro de homologación “áreas de riesgo” según el artículo 2.1.17 del OGUC	12
Tabla 1-2 Categorías en el análisis del nivel de amenaza y susceptibilidad comparable	15
Tabla 2-1 Precipitaciones medias mensuales registradas en las estaciones Quillota, Lliu Lliu Embalse y Colliguay	28
Tabla 2-2 Temperaturas medias mensuales registradas en las estaciones Quillota y Lliu Lliu Embalse	28
Tabla 2-3 Estaciones meteorológicas	29
Tabla 2-4 Extensión registro de estaciones meteorológicas	30
Tabla 3-1 Catastro de inundaciones por desborde de cauce y anegamiento en la comuna de Villa Alemana y sus alrededores	32
Tabla 3-2 Estimación del coeficiente de Manning, utilizando el método de Cowan	43
Tabla 3-3 Condiciones de borde modelos hidráulicos	44
Tabla 3-4 Síntesis de los resultados del estudio	45
Tabla 4-1 Catastro de remociones en masa en la comuna de Villa Alemana	49
Tabla 4-2 Valores de los parámetros de modelación utilizados para estimar el alcance de procesos de ladera	54
Tabla 5-1 Sismos históricos importantes que tuvieron el potencial o que generaron daños en el área comunal de Villa Alemana	57

Tabla 5-2 Datos de terremotos históricos con magnitud superior a 7.0 cuya zona de ruptura coincide con la comuna de Villa Alemana	66
Tabla 6-1 Superficie afectada por incendios forestales, período 2015-2020	68
Tabla 7-1 Resumen de factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y criterios de zonificación	73
Tabla 7-2 Criterios de definición de las áreas de riesgo en el área de estudio (escala 1:5.000) según el artículo 2.1.17 de la OGUC para cada peligro estudiado	76
Tabla 11-1 Resumen de coberturas entregadas por la municipalidad (formato .shp)	117
Tabla 11-2 Resumen de coberturas entregadas por la municipalidad (formato .gdb)	119
Tabla 11-3 Resumen de coberturas entregadas por la municipalidad (formato .gdb)	120
Tabla 12-1 Coeficiente de escorrentía Villa Alemana (T = 100 años).	124
Tabla 12-2 Coeficiente de escorrentía Plan Maestro de Evacuación y drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar.	124
Tabla 12-3 Coeficiente de escorrentía Manual de Carreteras	125
Tabla 12-4 Características cauces por zona de modelación	129
Tabla 12-5 Coeficiente de escorrentía Villa Alemana (T = 100 años)	130
Tabla 12-6: Determinación del tiempo de concentración (Hr)	131
Tabla 12-7: Caudales $T_r=100$ años según tramo de modelación	132
Tabla 13-1 Valores para el cálculo del coeficiente de Manning mediante el método de Cowan	134
Tabla 13-2 Estimación del coeficiente de Manning mediante el método de Cowan para los cauces modelados	135
Tabla 13-3 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 1, T = 100 años	136
Tabla 13-4 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 2, T = 100 años	139
Tabla 13-5 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 3, T = 100 años	142
Tabla 13-6 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 4, T = 100 años	145
Tabla 13-7 Resultados modelo hidráulico estero Quilpué, Modelo 1, T = 100 años	148
Tabla 13-8 Resultados modelo hidráulico estero Palmilla, Modelo 1, T = 100 años	152
Tabla 13-9 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 1, T = 100 años	156
Tabla 13-10 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 2, T = 100 años	159
Tabla 13-11 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 3, T = 100 años	163

1 Introducción

Este documento forma parte del Estudio de Riesgos y Protección Ambiental para el estudio “Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana”. En él se incluyen las metodologías y antecedentes utilizados, las líneas de base necesarias para la elaboración del estudio, un catastro de los peligros geológicos relevantes, un diagnóstico de cada uno de ellos y su zonificación por susceptibilidad.

Los resultados de este trabajo corresponden a la identificación y zonificación de las áreas urbanas susceptibles a ser afectadas por un peligro de origen natural, de acuerdo con las definiciones expuestas en el Capítulo 7 “Definición de peligro y riesgo utilizadas en este informe”. Éstos se presentan en mapas de riesgos y cuadros de resumen, de acuerdo con la nomenclatura propuesta por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC)¹. La zonificación aquí presentada sirve de base para definir las áreas de riesgo para la formulación del Plan Regulador Comunal.

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivos generales del estudio

El objetivo de este informe es definir las “áreas de riesgo” asociadas a los peligros de origen natural que se definen en el artículo 2.1.17 de la OGUC, que corresponden a los territorios que cumplen con las siguientes características:

1. Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.

1.1.2 Objetivos específicos

Para lograr lo anterior se han definido los siguientes objetivos específicos:

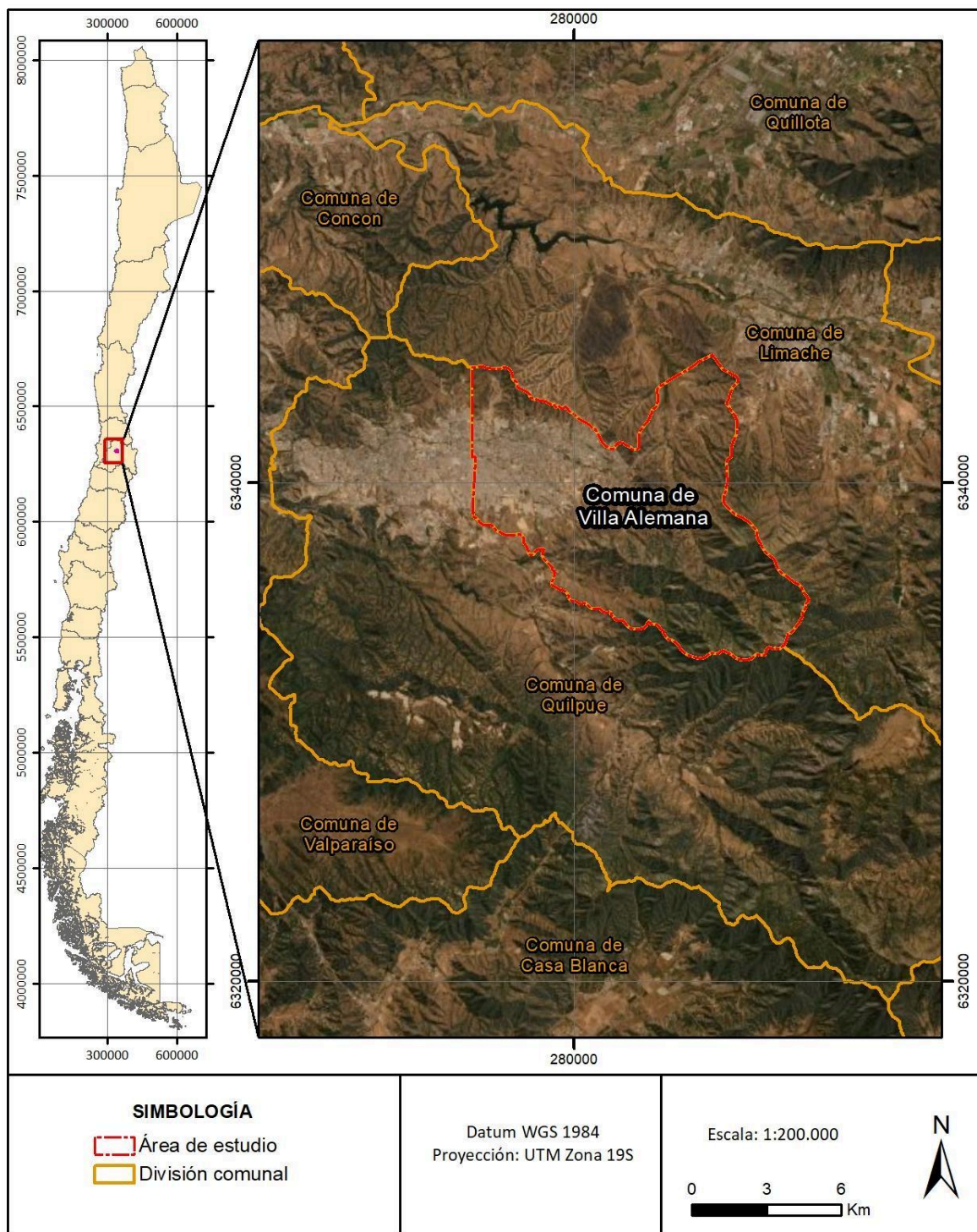
- Identificar las zonas que han sido afectadas por peligros de origen natural en la comuna.
- Identificar y caracterizar, a escala comunal y de su área urbana, los factores que pudieran condicionar la ocurrencia de peligros de origen natural.
- Elaborar cartografía donde se definan las áreas que pueden ser afectadas por los peligros presentes en la comuna.
- Definir las “áreas de riesgo” asociadas a peligros de origen natural, según los criterios definidos en el artículo 2.1.17 de la OGUC.
- Proponer criterios generales respecto a limitaciones que debieran establecerse en el uso del territorio como consecuencia de los peligros naturales que lo pudieran afectar.

1.2 Ubicación del área de estudio

El área de estudio corresponde al área urbana de la comuna de Villa Alemana, localizada en el sector oriente del Área Metropolitana de Valparaíso. Forma parte de la Provincia de Marga Marga, Región de Valparaíso. La comuna limita al norte y este con la comuna de Limache y al sur y oeste con la comuna de Quilpué (Figura 1-1).

¹ Versión Noviembre 2021.

Figura 1-1 Ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

1.3 Alcances y limitaciones

Los estudios que se utilizaron para desarrollar este trabajo se elaboraron a partir de antecedentes con los que cuenta el municipio o recopilados y generados para este estudio por parte del consultor. Esta información ha permitido la elaboración de líneas de base de geología, geomorfología, hidrología y sismicidad, así como catastros detallados de los peligros que han afectado a la comuna.

Los antecedentes recopilados fueron suficientes para la elaboración de las líneas de base y entregan una cobertura razonable de los peligros que han afectado a la comuna, de manera que se puede elaborar un catastro adecuado para la realización del estudio. Por lo general, este tipo de catastros recopila información de los peligros que afectan a áreas pobladas y suelen contar con más información en el caso de los peligros ocurridos en años más recientes. En muchas ocasiones, esto dificulta la estimación de la recurrencia de los peligros que afectan al área estudiada, especialmente en los sectores que se poblaron más recientemente.

1.4 Marco jurídico y nomenclaturas

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), en su apartado 2.1.17 “Disposiciones complementarias” indica que: “En los planes reguladores podrán definirse áreas restringidas al desarrollo urbano, por constituir un riesgo potencial para los asentamientos humanos. Dichas áreas, se denominarán “zonas no edificables” o bien, “áreas de riesgo”, según sea el caso, como se indica a continuación:

Por “zonas no edificables”, se entenderán aquéllas que *por su especial naturaleza y ubicación no son susceptibles de edificación, en virtud de lo preceptuado en el inciso primero del artículo 60° de la Ley General de Urbanismo y Construcciones. En estas áreas sólo se aceptará la ubicación de actividades transitorias.*

Por “áreas de riesgo”, se entenderán aquellos territorios en los cuales, *previo estudio fundado, se limite determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole, suficientes para subsanar o mitigar tales efectos.*

En el marco de este informe, las “áreas de riesgo” son definidas como las zonas susceptibles a ser afectadas por un peligro geológico, puesto que la zonificación fue realizada a partir de mapas de susceptibilidad y de factores condicionantes (ver las definiciones presentadas en el Capítulo 7: Anexo A “Definiciones de peligro y riesgo utilizadas en este informe”).

En la Tabla 1-1 se presentan los peligros naturales definidos en el artículo 2.1.17 de la OGUC y la homologación con la nomenclatura internacional utilizada por este informe. A continuación, se presenta la definición de estos peligros geológicos y sus criterios de zonificación.

- Apartado 1 del artículo 2.1.17 de la OGUC: Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.

De acuerdo con las definiciones utilizadas en este informe, el Apartado 1 del artículo 2.1.17 de la OGUC corresponde a los peligros geológicos de inundaciones terrestres e inundaciones litorales. Dentro de inundaciones terrestres se incluyen las inundaciones por desborde de cauces e inundaciones por anegamientos. En relación con las inundaciones litorales el territorio comunal no es susceptible de ser afectado por este peligro.

- Apartado 2 del artículo 2.1.17 de la OGUC: Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.

El Apartado 2 del artículo 2.1.17 de la OGUC corresponde a los peligros geológicos de remociones en masa, analizados separadamente como: (1) flujos de barro y detritos, (2) procesos de ladera, entendidos como

aquellos desplazamientos de masas de tierra o rocas que se encuentran en pendiente que ocurren debido a la inestabilidad de los materiales que forman la ladera (incluyendo caída de bloques, deslizamientos y retrocesos de laderas).

- Apartado 3 del artículo 2.1.17 de la OGUC: Zonas con riesgo de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.

Dentro de este apartado definido por la OGUC se analizan conceptualmente los procesos endógenos internos de la tierra, es decir, sismicidad y volcanismo. Dada a ubicación y características de la comuna, no es susceptible de ser afectada por peligros asociados al volcanismo.

Tabla 1-1 Cuadro de homologación “áreas de riesgo” según el artículo 2.1.17 del OGUC

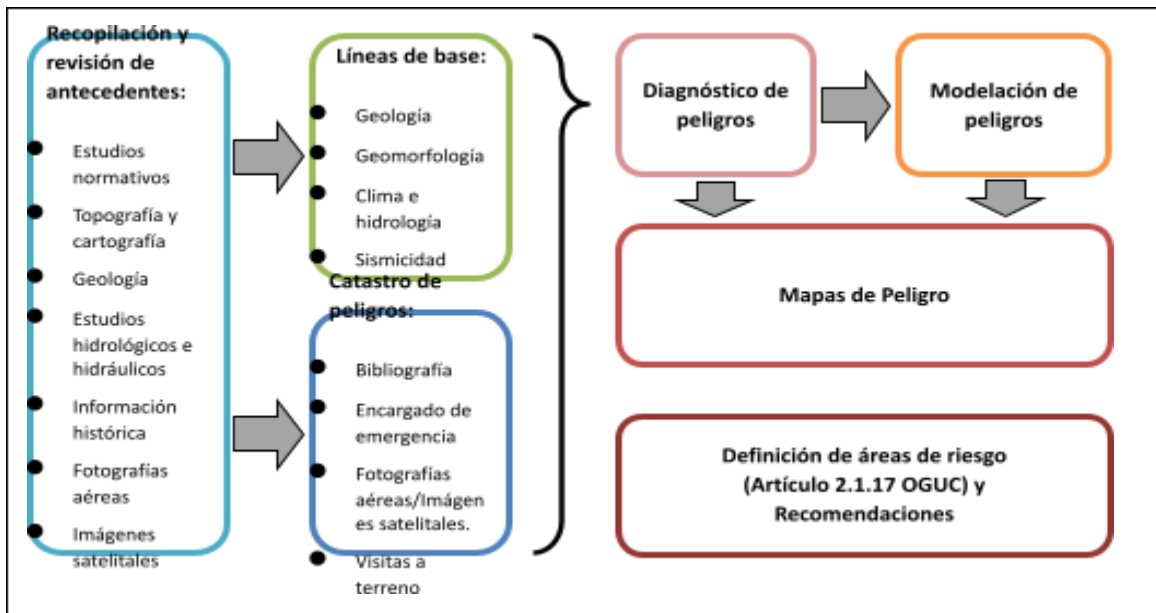
“Áreas de riesgo” según artículo 2.1.17 de la OGUC	Peligros Geológicos estudios en este informe		Análisis	Descripción conceptual
1. Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos	Inundaciones terrestres	Por desborde de cauces	Capítulo 3	Capítulo 8.1.1
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas		Anegamiento		
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas	Remociones en masa	Flujos de barro y/o detrito	Capítulo 4	Capítulo 8.1.2
		Procesos de ladera		
	Sismicidad		Capítulo 5	Capítulo 8.2.1

Fuente: Elaboración propia en base a la normativa 2.1.17.

1.5 Metodología general del estudio

En función de los objetivos propuestos, la metodología de este estudio está orientada a identificar, caracterizar y delimitar las áreas que presenten peligro por causas naturales que pudieran afectar a la población y/o su infraestructura asociada dentro del área de estudio; además de aquellas áreas ocupadas por la población, se considerarán aquellas donde se puedan establecer nuevas poblaciones u obras de infraestructura, según corresponda. De esta forma, en la Figura 1-2 se esquematiza de forma general la metodología del estudio.

Figura 1-2 Metodología general del estudio



Fuente: Elaboración propia.

1.5.1 Recopilación de antecedentes

Se recopilaron y revisaron los antecedentes que entregó la municipalidad, que fueran relevantes para la elaboración del estudio de riesgos de la comuna. Adicionalmente, se utilizó información disponible en instituciones públicas y privadas. La información recopilada es:

- Definición de áreas de riesgos en instrumentos de planificación vigentes, junto con las memorias correspondientes.
- Información topográfica y cartográfica, ya sea levantada para este estudio o en alguno anterior.
- Cartografía geológica de la comuna.
- Estudios hidrológicos e hidráulicos.
- Registros de datos hidrológicos (precipitación y caudales) y sísmicos (datos instrumentales).
- Información histórica y estudios de carácter técnico relativos a peligros que han afectado a la comuna.
- Fotografías aéreas e imágenes satelitales.

Los antecedentes recopilados, son la base para el desarrollo de este trabajo, y se complementaron con información generada durante el estudio. Ellos se utilizaron para elaborar las líneas de base y para definir las metodologías más adecuadas al territorio comunal.

Los antecedentes recopilados se revisan en el Anexo C Revisión de antecedentes.

1.5.2 Elaboración de líneas de base

Se elaboraron líneas de base para caracterizar factores que se relacionan con la ocurrencia de los peligros que pueden afectar a la comuna. Para ello, se identificaron aquellos sectores que son más propensos a la ocurrencia de los distintos procesos y estimaron, aunque fuera de manera general, la recurrencia de estos peligros. De esta forma, la línea de base para el estudio de riesgos considera las siguientes componentes:

- Geología: En ella se identifica y caracteriza los materiales y estructuras presentes en el territorio estudiado.

- Geomorfología: Se reconoce y describe las formas presentes en el área de estudio, junto con los procesos que les dan forma, y se cuantifica sus parámetros morfométricos.
- Clima e hidrología: En ella se caracterizan las precipitaciones y temperaturas medias mensuales.

1.5.3 Catastro de peligros

Se elaboraron cuadros con los eventos peligrosos que han afectado al área estudiada, que contienen, en la medida que es posible, tipo de peligro, fecha de ocurrencia, tipo y magnitud de evento desencadenante, daños y fuentes de información utilizados. La información contenida en estos cuadros se utilizó para elaborar los diagnósticos de cada uno de los peligros estudiados y, en los casos que correspondía, para calibrar modelos utilizados. Las fuentes de información utilizadas fueron:

- Fuentes bibliográficas.
- Revisión de fotografías aéreas e imágenes satelitales.

1.5.4 Diagnóstico de peligros

La información recopilada y generada se sistematizó, para definir las áreas donde existen condiciones para que sean afectadas por cierto peligro. El resultado de esta actividad es un análisis de los factores condicionantes, que permiten identificar los sectores que presentan condiciones más favorables para la ocurrencia del peligro, y desencadenantes, que sirven como insumo para estimar la recurrencia de los eventos del peligro en cuestión. Esto se realiza para cada uno de los peligros reconocidos a partir de la información disponible y las características físicas de los peligros estudiados.

A partir del diagnóstico de peligros, se definieron los cauces donde la información existente no permite definir las áreas inundables con un nivel de certeza adecuado. En estos casos, se utilizaron los antecedentes hidrológica e hidráulica existente y los datos instrumentales de precipitaciones y caudales para estimar los caudales de estos cauces. Posteriormente, se construyeron modelos hidráulicos para representar las crecidas en dichos cauces.

1.5.5 Modelación de peligros

Se construyeron modelos desinados a definir mejor las áreas de inundación. Estos modelos consideran dos actividades principales: la estimación de caudales y la modelación hidráulica.

Para la estimación de caudales se utilizó la hidrología desarrollada en el “Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar, V Región (PM-03)”, elaborado por GSI Ingenieros Consultores Ltda. (2001) para la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

En áreas urbanas, es preferible el uso de modelos de inundación en 2 dimensiones (2D), pero debido a que los cauces se encuentran bien definidos y al mayor tiempo de ejecución y desarrollo que demandan los modelos 2D, se optó por utilizar modelos unidimensionales (1D).

De esta forma, se construyeron modelos hidráulicos en tramos específicos de los cauces de la comuna, utilizando el software HEC-RAS.

1.5.6 Elaboración de mapas de peligros

A partir de los factores condicionantes reconocidos anteriormente se definieron criterios objetivos que permitieran asignar un nivel de susceptibilidad en el territorio.

En términos generales, se asignó un grado de susceptibilidad ‘muy alta’ a aquellas zonas que muy probablemente serán afectadas en caso de ocurrir un evento del peligro analizado, una susceptibilidad ‘alta’ a aquellas afectadas por eventos extremos (en muchos casos son los eventos de mayor magnitud de los que se tenga registros históricos) y susceptibilidad ‘moderada’ a las áreas afectadas por eventos excepcionales,

de los que muchas veces no existen registros históricos, pero si otro tipo de evidencias, como evidencias geológicas o morfológicas.

En la Tabla 1-2 se comparan los grados de susceptibilidad anteriormente propuestos con las categorías establecidas por la SUBDERE. Estos criterios se presentaron gráficamente mediante mapas de peligro que representan la distribución espacial de los diferentes niveles de susceptibilidad.

Tabla 1-2 Categorías en el análisis del nivel de amenaza y susceptibilidad comparable

Estratificación		Descripción	Probabilidad	Susceptibilidad comparable
Muy probable	5	Ocurre más de una vez por año	1,0	Muy alta
Bastante probable	4	Ocurre una vez entre 1 y 10 años	0,99-0,10	Muy alta
Probable	3	Ocurre una vez entre 10 y 50 años	0,1 – 0,02	Alta
Poco probable	2	Ocurre una vez entre 50 y 100 años	0,02 – 0,01	Alta o moderada
Improbable	1	Ocurre cada 100 años y más años	< 0,01	Moderada

Fuente: Modificado de “Guía análisis de riesgos naturales para el ordenamiento territorial” (SUBDERE, 2011).

1.5.7 Definiciones de áreas de riesgo y recomendaciones

Una vez que se tienen los mapas de susceptibilidad, se definieron las “áreas de riesgo” de acuerdo con lo establecido en el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Para ello, se asignó esta categoría en función de los mapas de peligros generados anteriormente y de los criterios utilizados para asignar cada categoría. Adicionalmente, se establecieron recomendaciones de carácter general con respecto a los criterios de uso de suelo en el área estudiada, a partir del nivel de peligrosidad representada por los resultados de las modelaciones o, en su defecto, mediante los distintos niveles de susceptibilidad.

2 Líneas de base

2.1 Marco geodinámico

Chile se ubica en un margen convergente activo de placas oceánica-continental (Figura 2-1), en donde la placa oceánica Nazca subducta bajo el margen occidental de la placa continental Sudamericana dando origen a los Andes Centrales. Este proceso de subducción se reconoce activo posiblemente desde el Pérmico (Coloma, et al., 2017). A partir del Eoceno, la tasa de convergencia ha variado entre 5 y 15 cm/año (Somoza, 1998), siendo actualmente de 7,5 cm/año (DeMets, et al., 1994).

Las condiciones descritas anteriormente, así como sus variaciones, tanto temporales como espaciales, definen las unidades morfoestructurales y condicionan las unidades geológicas y geomorfológicas presentes en Chile. Todo lo anterior actúa como un determinante de los peligros presentes en Chile, tanto a escala regional como local.

Figura 2-1 Marco geodinámico representado en 3D



Fuente: Elaboración propia. La Dorsal de Juan Fernández es subductada a los 33° S. La línea verde señala la fosa, lugar donde subducta la Placa Nazca bajo la Placa Sudamericana, y las flechas muestran direcciones y velocidades de convergencia entre ambas.

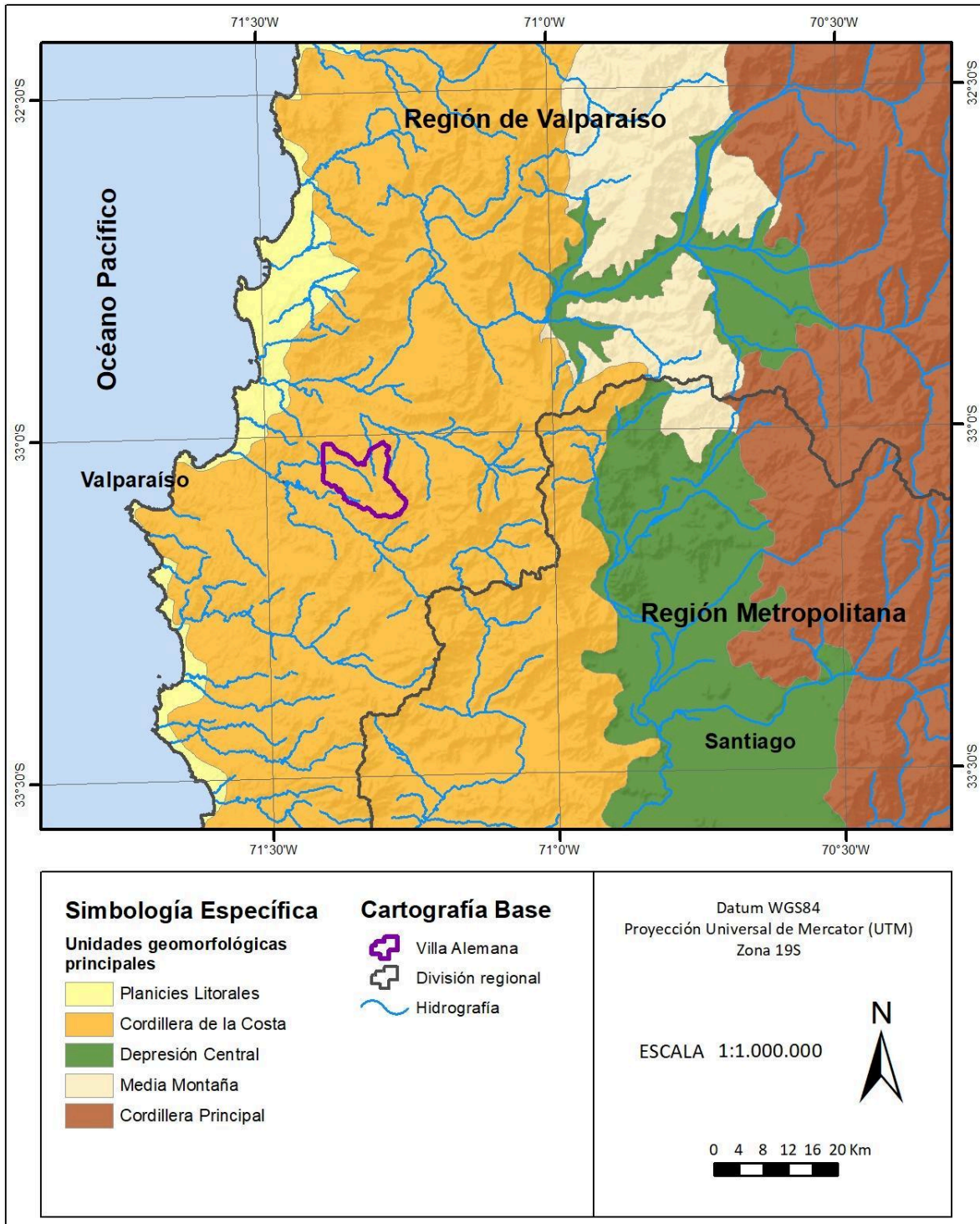
2.2 Marco geomorfológico

2.2.1 Unidades morfoestructurales

La región de Valparaíso se encuentra dentro de una zona de transición geomorfológica de escala regional (Figura 2-2). En el segmento al sur de los 33°S, al sur del Cordón de Chacabuco, se reconocen tres unidades morfoestructurales de primer orden dispuestas en franjas de orientación norte-sur: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal. En cambio, en el segmento al norte de los 33°S (y hasta los 27°S), llamado zona de valles transversales, no se desarrolla la unidad morfoestructural de Depresión Central y, por lo tanto, no es posible diferenciar entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera Principal, dando lugar al llamado sector de Media Montaña (Charrier, Pinto, & Rodríguez, 2007).

Particularmente, la comuna de Villa Alemana se ubica en la Cordillera de la Costa. Esta es la cadena montañosa más próxima al mar, compuesta por cerros con alturas variables entre 800 a 2.300 m s.n.m. A la latitud de la comuna, su ancho promedio cercano a 60 kilómetros. El sector entre los 33-34°S se caracteriza por un predominio de rocas plutónicas con edades comprendidas entre el Paleozoico Superior y el Cretácico (Gana, et al., 1994).

Figura 2-2 Unidades morfoestructurales a escala regional 1:1.000.000



Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Aspectos geomorfológicos relevantes

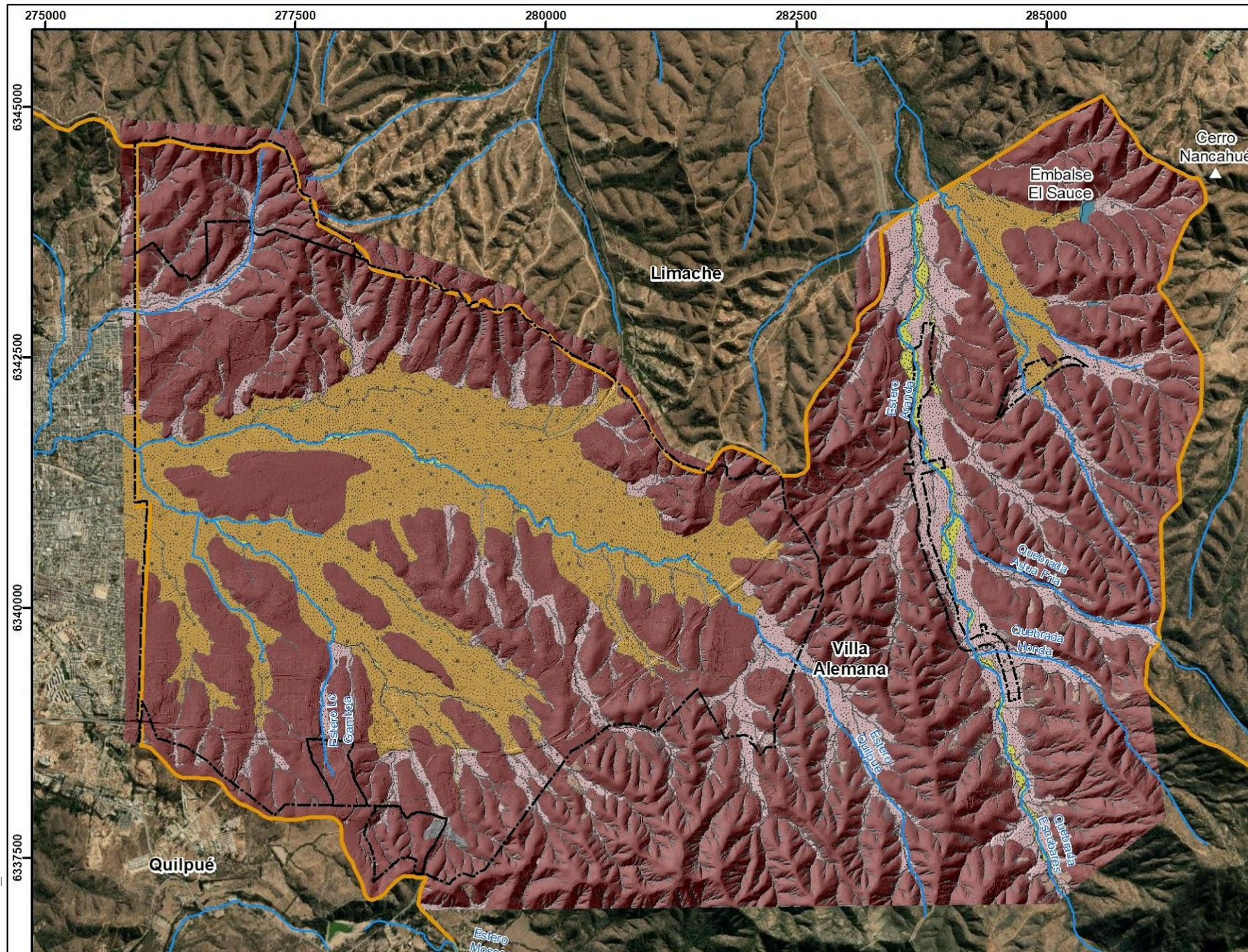
Como fue mencionado anteriormente, la comuna de Villa Alemana está emplazada en la Cordillera de la Costa. El sector urbano de la comuna se ubica en una planicie fluvio-aluvial (aunque algunos autores como Gana et al 1996 y Wall et al 1996 le asignan un origen marino), la cual corresponde a una forma depositacional asociada al sistema fluvial y aluvial. Esta presenta escasas pendientes y se ha formado debido a la depositación de materiales sedimentarios en zonas topográficamente deprimidas. Corresponde, por lo tanto, a una superficie plana a una altura de aproximadamente 150 m s. n. m., formando un ancho valle que ha permitido el asentamiento humano. La comuna se encuentra en la parte alta de las cuencas de los esteros Quilpué, Aranda y Moscoso, dando paso a la formación de terrazas fluviales asociados a estos esteros.

Bordeando la zona urbana y en el sector oriental de la comuna se reconocen un paisaje montañoso, con afloramiento de rocas y presencia de rinconadas, quebradas y terrazas fluvio-aluviales que disectan fuertemente este sector. Esta zona forma parte del dominio occidental de la Cordillera de la Costa, que se caracteriza por un relieve suave, con alturas locales de hasta 1000 m s. n. m. aproximadamente y laderas con pendientes bajas de alrededor de 15° a 25°.

Sobre las unidades de roca presentes en la Cordillera de la Costa se generan procesos como meteorización, erosión, procesos gravitacionales y coluviales-aluviales que dan origen al material de relleno entre afloramientos, que se identifican como remociones en masa.

Las unidades geomorfológicas se pueden observar en el mapa geomorfológico levantado a escala 1:5.000 y representado en la Figura 2-3 a una escala gráfica de 1:50.000. La topografía utilizada para este mapa es un modelo de elevación digital de 1 m de resolución.

Figura 2-3 Mapa geomorfológico de la comuna de Villa Alemana a escala gráfica 1:50.000



Fuente: Elaboración propia.

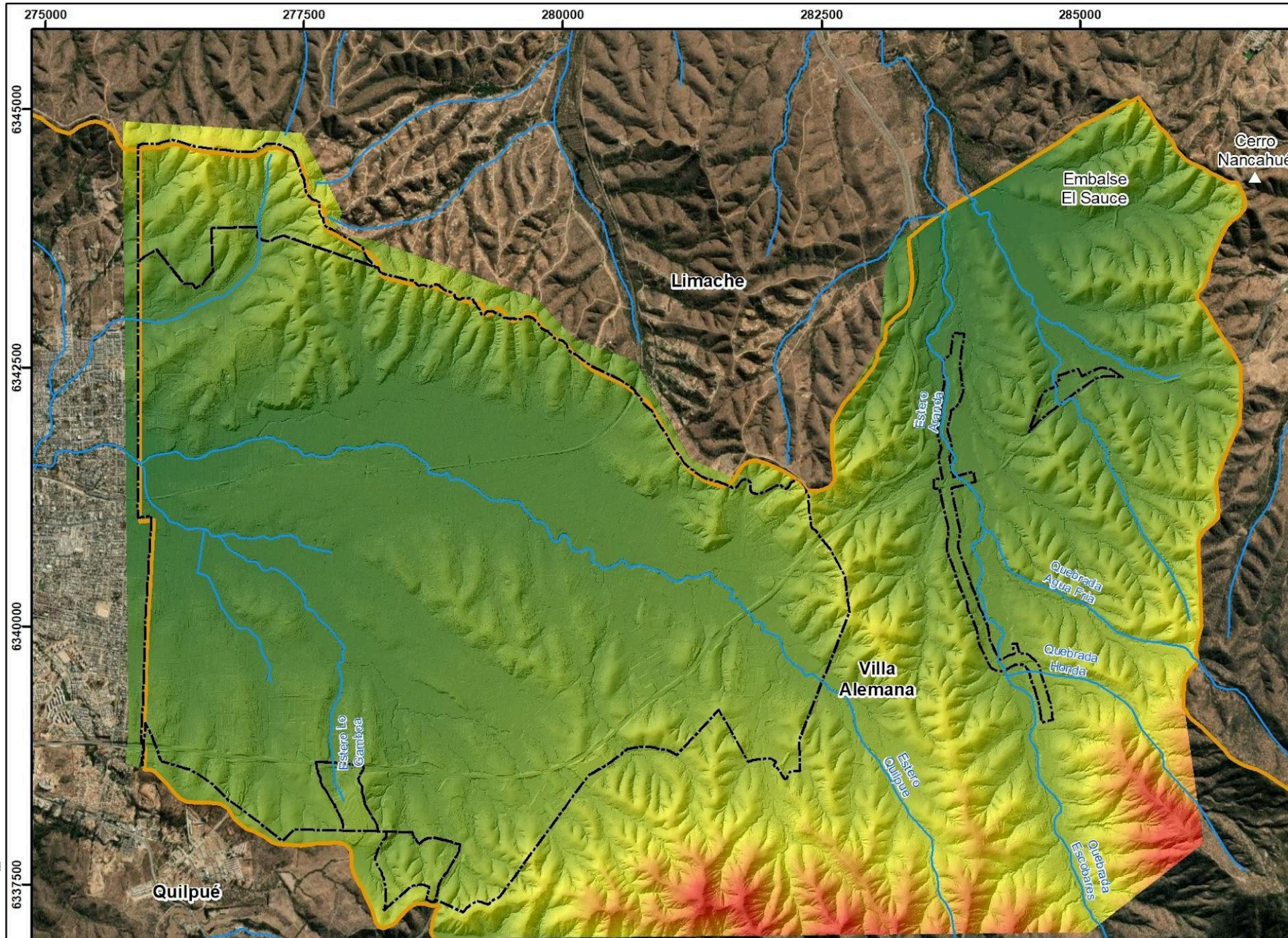
2.2.3 Parámetros morfométricos

En el área de estudio las elevaciones varían entre los 118 y los 1.034 m s.n.m. (Figura 2-4), las mayores alturas se ubican hacia la zona suroriente, en el sector montañoso de la comuna. Mientras que las partes más bajas se ubican en el sector norte y norponiente, correspondiente al área de zona urbana, donde se observan alturas relativamente similares.

En cuanto a las pendientes, el sector donde se concentra la mayor parte del área urbana se emplaza sobre pendientes menores a 5°, sector de la planicie con depósitos fluvio-aluviales (Figura 2-5), rodeado de cerros con pendientes entre 5° y 15°. Con respecto a aquellas pendientes mayores a 15°, se encuentran en las laderas de los cerros en el sector oriente, donde predominan las pendientes entre 15° y 25°, solo alcanzando en algunos sectores valores mayores a 25°. Geológicamente estas zonas se encuentran caracterizadas por rocas intrusivas del Jurásico.

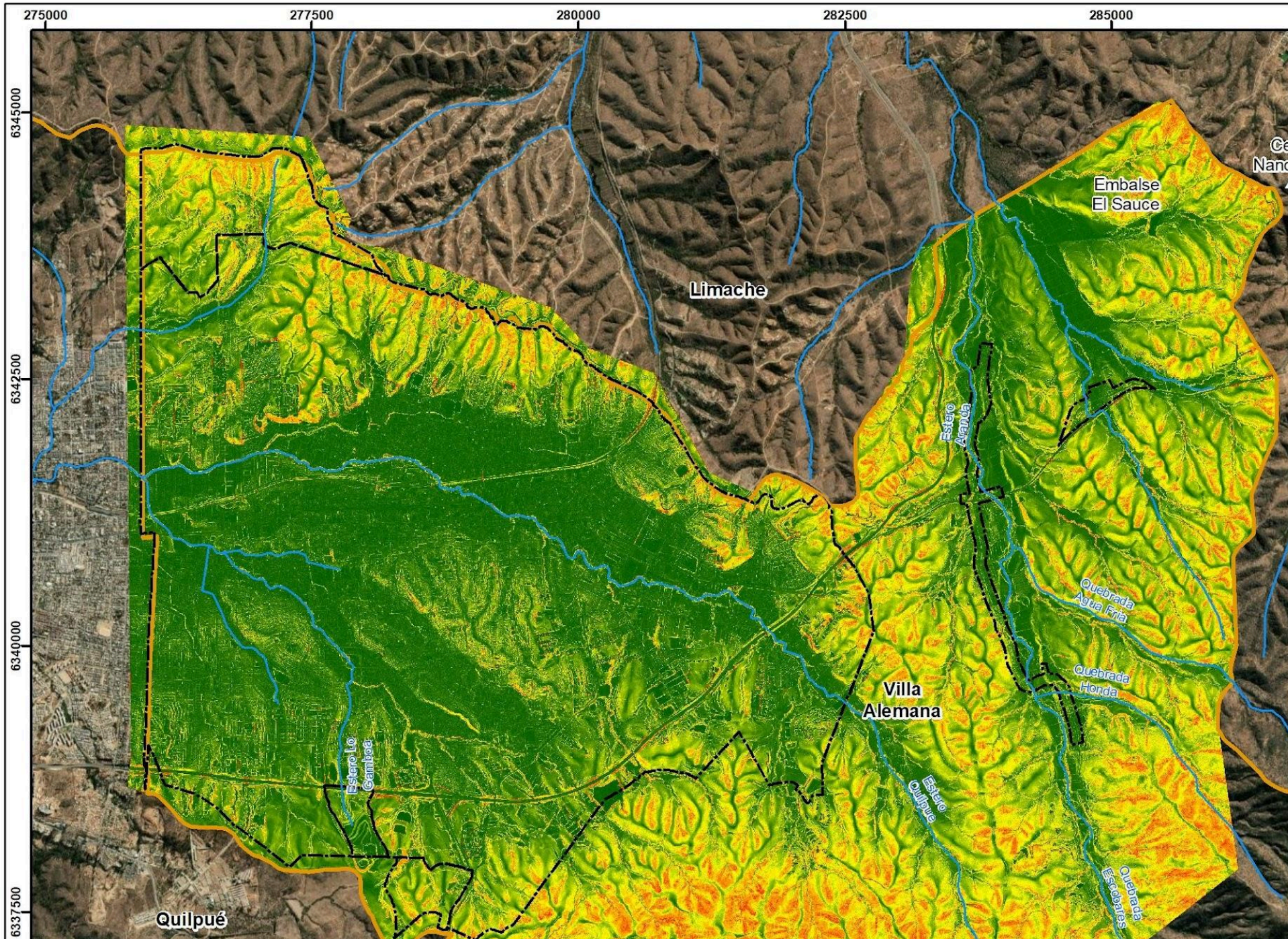
La topografía utilizada para ambas figuras corresponde a un modelo de elevación digital de detalle de 1 m de resolución.

Figura 2-4 Carta morfométrica de elevaciones de la comuna de Villa Alemana



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-5 Carta morfométrica de pendientes de la comuna de Villa Alemana



Fuente: Elaboración propia.

2.3 Marco geológico

La geología de la comuna de Villa Alemana está formada por rocas y depósitos asociados a tres ambientes. El primero de ellos se asocia a la zona más plana de origen marino y continental que es una mezcla de terrazas marinas con planicies de depósitos fluviales y aluviales, lugar donde se encuentra principalmente la zona urbana. El segundo está constituido mayoritariamente por depósitos fluvio-aluviales, fluviales y aluviales asociados a esteros y quebradas. El último corresponde a los cerros que rodean la zona, conformados por rocas volcánicas intrusivas de edad Jurásica. Estas rocas presentan diversos grados de meteorización y se encuentran cubiertas por distintos tipos de depósitos no consolidados producto de procesos de remoción en masa.

Cada una de estas unidades geológicas se describe a continuación, basándose en el trabajo de Gana, et al., 1996. El mapa geológico preliminar levantado a escala 1:5.000 se representa en la Figura 2-6 a una escala gráfica de 1:50.000. La topografía utilizada para este mapa fue un modelo de elevación digital de 1 m de resolución.

2.3.1 Depósitos no consolidados

Corresponden a depósitos no consolidados de origen coluvial, aluvial y marino. Las distintas unidades se describen a continuación.

2.3.1.1 *Depósitos antrópicos [Han] (Holoceno)*

Corresponden a depósitos originados por la acción humana.

2.3.1.2 *Depósitos fluviales [Hf] (Holoceno)*

Sedimentos no consolidados de cursos fluviales activos. Se compone de gravas clasto soportadas, formadas por bolones, redondeados a bien redondeados de baja esfericidad e imbricados. Poseen también lentes de arena con estratificación plana horizontal y cruzada, y escasos limos laminados (Gana, et al., 1996). Estos depósitos se encuentran en la zona centro, sur y este de la comuna asociados a los esteros Quilpué, Moscoso y Aranda respectivamente.

2.3.1.3 *Depósitos aluviales [Ha] (Holoceno)*

Sedimentos no consolidados compuestos de gravas, arenas y limos que se ubican en las quebradas y algunas zonas de llanuras. Son el resultado de flujos de barro y/o detritos y están generalmente interdigitados con depósitos fluviales y gravitacionales (Gana, et al., 1996).

2.3.1.4 *Depósitos aluviales y coluviales [PIHac] (Holoceno)*

Sedimentos no consolidados, ubicados en las faldas y a los pies de los cerros, y a la salida de quebradas en la zona sur de la comuna. Corresponden principalmente a depósitos gravitacionales tales como flujos en masa matriz soportados de muy mala selección (desde bloques hasta arcilla), son interdigitados por lentes de arenas y gravas generadas por pequeños cursos de agua que pueden ser esporádicos o permanentes (Gana, et al., 1996; Wall, et al., 1996).

2.3.1.5 *Depósitos de remoción en masa [PIHrm] (Holoceno)*

Corresponden principalmente a cicatrices de deslizamientos de baja magnitud asociados a quebradas o laderas.

2.3.1.6 *Depósitos fluviales aterrizados [PIHf] (Pleistoceno – Holoceno)*

Sedimentos no consolidados, que geomorfológicamente representan el primer nivel de terrazas fluviales asociadas a cauces actuales. Se componen de gravas, arenas y limos. Tienen desarrollo de cubierta vegetal (Gana, et al., 1996) y se ubican en nivel topográfico superior con respecto al curso fluvial actual, pudiéndose identificar en este estudio debido a la escala y topografía utilizada. Este depósito se ubica adyacente a los

principales esteros de la comuna. En la zona urbana donde se ubica la ciudad de Villa alemana es difícil de identificar debido a la urbanización.

2.3.1.7 Depósitos fluviales aterrazados antiguos [PIHf2] (Pleistoceno – Holoceno)

Sedimentos no consolidados, que geomorfológicamente representan al segundo nivel de terrazas fluviales asociadas a cauces actuales. Se componen de gravas, arenas y limos. Tienen desarrollo de cubierta vegetal (Gana, et al., 1996) y se ubican en un nivel topográfico superior con respecto los depósitos fluviales aterrazados adyacente a ellos, pudiéndose identificar en este estudio debido a la escala y topografía utilizada. En la zona urbana donde se ubica la ciudad de Villa Alemana es difícil de identificar debido a la urbanización.

2.3.1.8 Depósitos aluviales antiguos [PIHa] (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a depósitos aluviales que se extienden como planicies y abanicos aluviales rellenando valles. Esta unidad también se reconoce como una primera terraza de aluvial adyacente a las principales quebradas de la comuna. Están conformados por arenas, limos y gravas de mala selección que provienen de las quebradas y alcanzaron sectores planos. Se engranan con depósitos fluviales y coluviales.

2.3.1.9 Depósitos aluviales aterrazados antiguos [PIHa2] (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a depósitos aluviales que se extienden como planicies aluviales rellenando valles en la zona oriente de la comuna. Esta unidad también se reconoce como una segunda terraza de aluvial en un nivel topográfico superior a los Depósitos aluviales antiguos. Están conformados por arenas, limos y gravas de mala selección que provienen de las quebradas y alcanzaron sectores planos.

2.3.2 Unidades Cuaternarias Pleistocénicas

2.3.2.1 Terrazas de abrasión [QTt] (Probable Plioceno – Pleistoceno)

Esta unidad corresponde a una unidad morfológica de erosión labrada sobre intrusivos paleozoicos (Gana, et al., 1996) y sobre ella depósitos aluviales y fluviales asociados al estero Quilpué y quebradas adyacentes formando una planicie fluvio-aluvial.

2.3.3 Rocas estratificadas del Jurásico

2.3.3.1 Formación Ajjal [Ja] (Probable Pliensbachiano – Aleniano)

Unidades de roca estratificada que consiste en lavas andesíticas y tobas con intercalaciones de areniscas y lutitas de ambiente continental. Se ubican al sureste de la comuna.

2.3.4 Intrusivos Jurásicos

2.3.4.1 Leucotonalitas y Leucogranodioritas [Jlg]

Unidad de roca intrusiva correspondiente a tonalitas y granodioritas de color blanco grisáceo a amarillento de grano medio a grueso. Forman un plutón discontinuo de 16 km de longitud en sentido norte-sur (Gana, et al., 1996). Intruye a la Formación Ajjal y se ubica en la zona sur de la comuna.

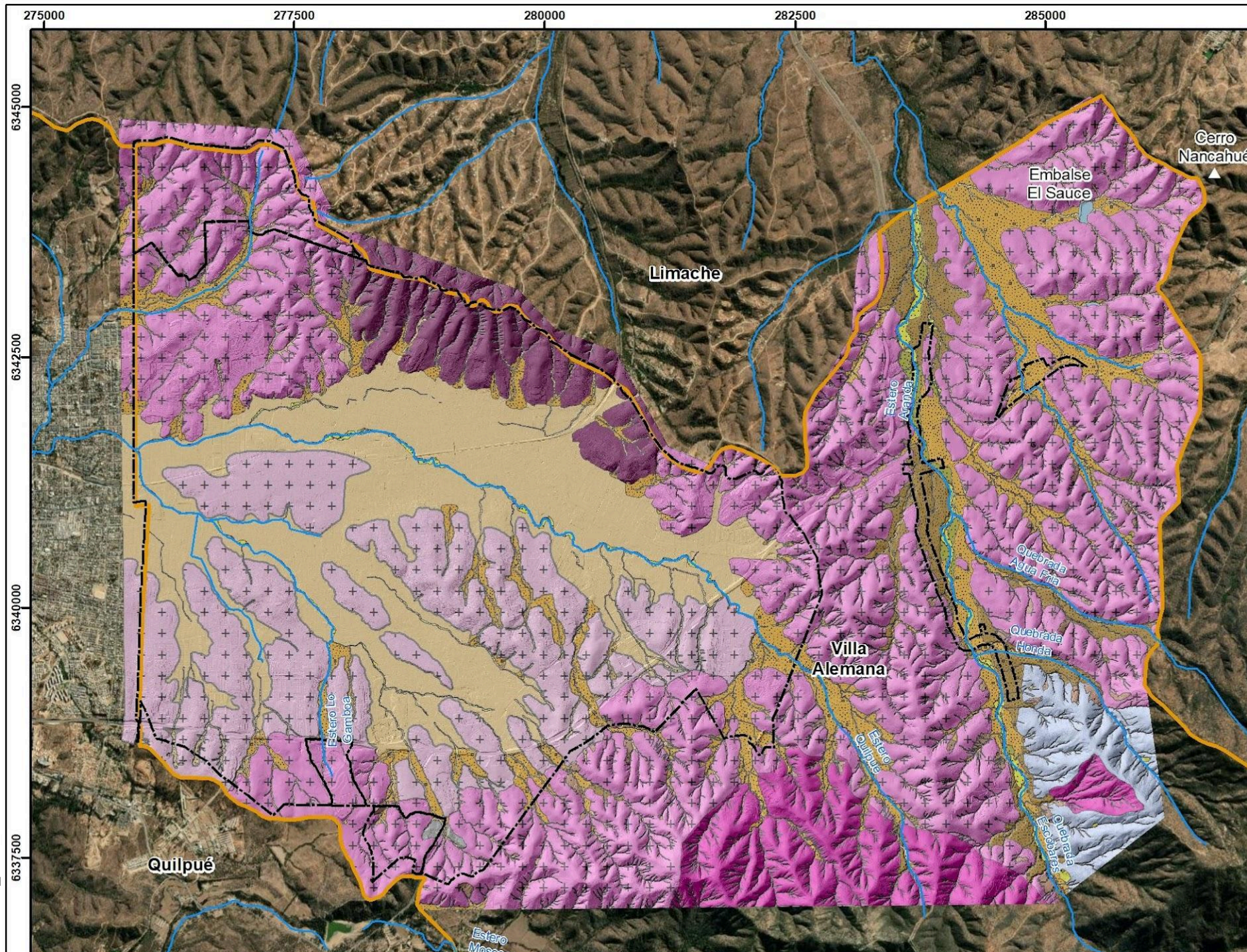
2.3.4.2 Monzogranitos de anfíbola – biotita [Jlg]

Unidad de roca intrusiva correspondiente a monzogranitos de anfíbola y biotita, con variaciones a granodioritas de color gris claro a amarillento de grano grueso (Gana, et al., 1996). Se ubica al noroeste de la comuna.

2.3.4.3 Tonalitas y granodioritas [Jlt]

Tonalitas y granodioritas de anfíbola y biotita. Afloran como plutones alargados en sentido este-oeste, en el límite oriental de la provincia, cercano al Río Maipo. Intruye a intrusivos paleozoicos (Pzmg) aunque fuera del área de estudio. Se han obtenido edades K-Ar en biotita entre 155 y 160 Ma y en anfíbola de 164±8 Ma y 144±7 Ma (Gana, et al., 1996). Se identifican afloramientos notoriamente más erosionados (Jlt(e)) formando una transición hacia las terrazas de abrasión en el sector urbano de la comuna.

Figura 2-6 Mapa geológico de la comuna de Villa Alemana a escala gráfica 1:50.000



Fuente: Elaboración propia.

2.4 Sismicidad

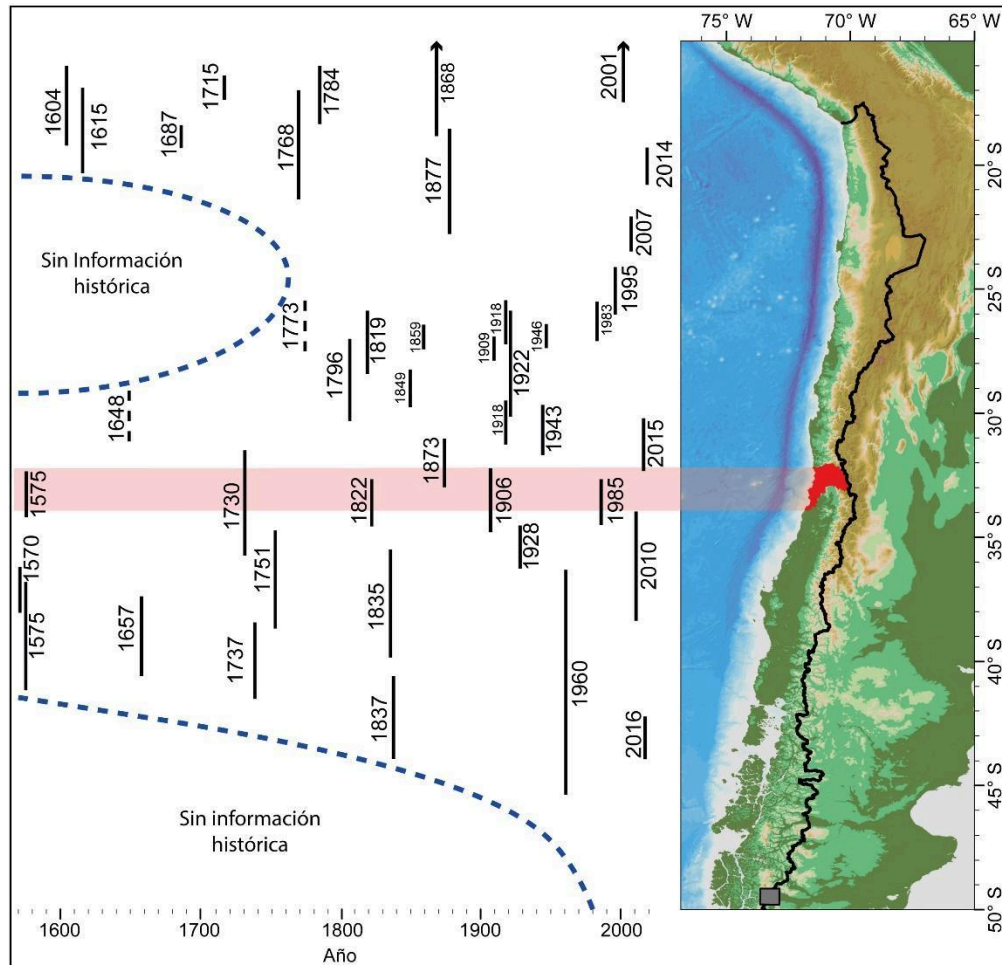
El contexto geodinámico de subducción, dado por la convergencia entre las placas Nazca y Sudamericana, posiciona al territorio chileno sobre un borde tectónicamente activo que ha caracterizado la historia sísmica del país. El fenómeno de convergencia de placas oceánica y continental produce un alto nivel de acoplamiento mecánico en la zona de contacto interplaca, lo que genera acumulación de energía elástica que posteriormente es liberada provocando grandes terremotos. Los sismos presentan una clara distribución espacial, donde existe una banda sísmica muy angosta (100-150 km de ancho) y profundidad variable (5-150 km de profundidad) entre la fosa Perú-Chile, al oeste, y la Cordillera de los Andes al este.

2.4.1 Tipos de sismos

Existen cuatro tipos de sismos de origen tectónico que afectan el territorio chileno, los cuales se distribuyen espacialmente segregándose en franjas paralelas de orientación aproximada NS. Estas fuentes sismogénicas, de oeste a este, son: *outer-rise*; interplaca tipo *thrust*; intraplaca de profundidad intermedia; y corticales (ver Anexo 9.2.1).

En el área de estudio, el contacto entre las placas se extiende desde la fosa hasta unos 35-51 km de profundidad (Tichelaar & Ruff, 1993; Hayes, et al., 2012), y es en esta región es donde tienen lugar la mayoría de los terremotos que han ocurrido en la zona central del país. Entre este tipo de terremotos destacan: 1575, 1730, 1822, 1906 y 1985, cuyos largos de ruptura se ilustran de manera esquemática en la Figura 2-7. Adicionalmente, el área de estudio ha sido afectada por sismos intraplaca de profundidad intermedia, destacando el Terremoto de La Ligua de 1965.

Figura 2-7 Representación gráfica de los terremotos de subducción históricos con magnitud estimada superior a 7.2 y sus respectivos largos de ruptura (abajo, escala en años). En color rojo se resalta la región de Valparaíso y en la franja, los principales terremotos ocurridos frente a sus costas



Fuente: Elaboración propia.

2.5 Clima e hidrología

2.5.1 Marco climático

Según la Dirección Meteorológica de Chile (2001), en la Región de Valparaíso predomina un clima templado.

Como parte de la caracterización general del área, se revisó la información de precipitación y temperatura de las estaciones Quillota (código BNA 05426004-0), Liu-Lliu Embalse (código BNA 05427006-2), y Colliguay (código BNA 05741002-7), en las comunas de Quillota, Limache y Quilpué, respectivamente, Región de Valparaíso. Quillota tiene registros desde octubre de 1977, Liu-Lliu Embalse desde enero de 1978 y Colliguay desde agosto de 1950. Todas cuentan con estadísticas de precipitaciones, y sólo Colliguay no cuenta con estadísticas de temperatura.

Se ha realizado un análisis de las estadísticas de las estaciones durante los últimos 30 años (1990 – 2020), destacando que la precipitación media mensual en todas las estaciones está entre 290 y 580 mm. En todos los casos la precipitación máxima se alcanza en el mes de junio, con aproximadamente el 30 % de las

precipitaciones totales anuales, y el mínimo en el mes de enero, con aproximadamente el 0 % de las precipitaciones totales anuales (Tabla 2-1).

Tabla 2-1 Precipitaciones medias mensuales registradas en las estaciones Quillota, Lliu Lliu Embalse y Colliguay

Estación	Precipitación Media Mensual (mm)												
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
Quillota	11,4	48,4	86,2	54,4	48,5	20,7	13,5	3,2	1,2	0,1	0,6	3,1	291,2
Lliu-Lliu Embalse	17,3	69,5	145,2	85,3	69,3	39,5	18,8	4,8	2,4	0,3	1,4	3,9	457,7
Colliguay	19,7	90,2	167,5	116,1	91,6	50,8	21,2	4,8	2,7	0,2	1,7	4,6	571,0

Fuente: Elaboración propia a partir del Banco Nacional de Aguas (DGA).

En cuanto a la temperatura, el registro en las estaciones Quillota y Lliu-Lliu Embalse tienen un valor medio mensual máximo aproximado de 20 °C en enero y un valor medio mensual mínimo de 10 °C en julio (Tabla 2-2).

Tabla 2-2 Temperaturas medias mensuales registradas en las estaciones Quillota y Lliu Lliu Embalse

Estación	Temperatura Media Mensual (°C)											
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Quillota	15,2	13,1	11,4	10,5	11,6	13,2	14,6	16,3	17,8	19,0	18,5	17,5
Lliu-Lliu Embalse	16,3	13,8	11,7	10,9	11,9	13,3	14,9	17,1	18,8	20,0	19,7	18,7

Fuente: Elaboración propia a partir del Banco Nacional de Aguas (DGA).

2.5.2 Marco hidrológico

Con el objetivo de caracterizar las precipitaciones en la zona se recopilaron los antecedentes hidrometeorológicos, obtenidos de la base de datos de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Se analizaron 11 estaciones pluviométricas con estadística actual y de una extensión suficiente. Las características de las estaciones meteorológicas se incluyen en la Tabla 2-3, mientras que su distribución espacial se muestra en la Figura 2-8. Cabe indicar que no hay estaciones pluviométricas vigentes en las cuencas asociadas al área de estudio que permitan caracterizar directamente los caudales de la zona.

Tabla 2-3 Estaciones meteorológicas

Estación	Código	Nombre	UTM Norte	UTM Este	Altitud (msnm)	Vigencia	Año Inicio
1	05500003-4 (DGA)	Las Salinas	6.345.560	262.063	20	Vigente	ago-13
2	05510001-2 (DGA)	Rodelillo	6.340.127	258.696	110	Vigente	ago-71
3	05427007-0 (DGA)	Los Aromos	6.350.896	280.800	100	Vigente	jun-74
4	05426004-0 (DGA)	Quillota	6.358.074	293.618	130	Vigente	oct-77
5	05500001-8 (DGA)	Las Piedras	6.329.079	284.375	225	Vigente	ene-92
6	05427006-2 (DGA)	Liu-Lliu Embalse	6.335.621	293.336	260	Vigente	ene-78
7	05427008-9 (DGA)	Quebrada Alvarado	6.341.112	302.557	290	Vigente	ene-90
8	05741002-7 (DGA)	Colliguay	6.327.982	299.845	490	Vigente	ago-50
9	05733007-4 (DGA)	Caleu	6.346.338	313.765	1.120	Vigente	may-57
10	330005 (DMC)	Quilpué Esva	6.339.770	270.288	198	Información hasta 2017	ene-59
11	330009 (DMC)	Marga Marga	6.336.912	275.986	160	Vigente	ene-59

Fuente: Elaboración propia a partir del Banco Nacional de Aguas (DGA) y DMC.

3 Inundaciones terrestres

Este peligro se denomina inundaciones terrestres, en el sentido de que estas ocurren “tierra adentro”, es decir, las aguas dulces anegan territorios al interior de los continentes. Dentro de las inundaciones terrestres estudiadas se encuentran:

- **Inundaciones por desborde de cauce:** Este tipo de fenómeno ocurre cuando los cauces de ríos, esteros o quebradas desbordan su cauce natural anegando las terrazas fluviales (o aluviales) laterales o adyacentes, debido a la ocurrencia de caudales extremos generalmente consecuencia de eventos de precipitaciones líquidas intensas y/o prolongadas.
- **Inundaciones por anegamientos:** Este tipo de inundaciones se producen en zonas topográficamente deprimidas, de baja permeabilidad, con niveles freáticos someros y deficiente drenaje del terreno, frecuentemente inundadas debido a lluvias intensas y/o prolongadas.

3.1 Catastro

En la Tabla 3-1 se presenta un catastro construido a partir de los antecedentes revisados durante el desarrollo de este trabajo para inundaciones que han afectado el área de estudio. Cabe mencionar que, en los archivos de prensa, se utiliza un lenguaje impreciso que no permite diferenciar los eventos de inundación por desborde de cauces con anegamientos e incluso con flujos de barro y/o detritos. Por lo tanto, los eventos catastrados deben ser interpretados considerando dicha imprecisión.

Se destacan entre los eventos de inundación los años 1965, 2002 y 2013 donde producto del desborde de esteros las inundaciones provocaron daños a la infraestructura y a vidas humanas de la comuna. Los sectores más afectados fueron Ignacio Carrera Pinto con Valencia, Segundo de Línea, Intersección entre Alcalde Alejandro Peralta con Porvenir y Víctor Domingo Silva, Av. Valparaíso, Población Vicente Martínez, calle Huanhualí y Gandarillas, calles San Enrique, Santa Margarita y Lourdes, Población El Peumo, calle Primera, Población El Refugio, Población Palmilla Baja, Población Don Daniel, entre otras.

Respecto a casos de inundaciones por anegamiento, aunque no existe registro específico de los años en los que han ocurrido, a excepción de los eventos de mayo del 2017 y junio del 2020, se tiene un registro de varias zonas de la comuna que se anegan constantemente. Un mayor detalle se puede observar en la Tabla 3-1.

Según las descripciones asociadas a los eventos, algunos de ellos pudieron ser ubicados geográficamente con mayor precisión como se muestra en la Figura 3-1.

Tabla 3-1 Catastro de inundaciones por desborde de cauce y anegamiento en la comuna de Villa Alemana y sus alrededores

Código	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Descripción	Referencia
DC01	1965/julio-a agosto	Inundación por desborde de cauce	Villa Alemana	En Petorca. La Ligua, Longotoma, Quillota, Los Nogales. Quilpué, Villa Alemana, Peñablanca, Limache. La Calera. La Cruz. Puchuncaví, Quintero. Casablanca los damnificados sumaron más de cinco mil personas que fueron ubicadas en estadios, escuelas, recintos policiales, de bomberos, municipales y del Ejército. Los ríos y esteros se desbordaron arrasando con las poblaciones ribereñas, las pequeñas industrias caseras. crianza de aves y animales y con los caminos transversales. En Limache se desbordó el tranque Pelumpén y en Quillota, los tranques Lliu Lliu y Cochagua.	Urrutia y Lanza, 1993
DC02	2013/06/28	Inundación por desborde de cauce	Ignacio Carrera Pinto con Valencia	Cerca de las 10.20 horas, vecinos llamaron a la Unidad de Emergencias de la municipalidad para denunciar que el agua del estero Valencia se estaba desbordando. De acuerdo con el jefe de Emergencias Municipal, Heinrich Wittig, fue limpiado hace dos semanas. "Lamentablemente, y tal como nos contaron algunos vecinos, hubo personas que durante este tiempo continuaron lanzando desechos voluminosos, como coches para bebé, que obstruyeron el tubo del drenaje". Con maquinaria pesada los funcionarios municipales trabajan en el despeje de cauce cuyas aguas alcanzaron a inundar algunos patios.	https://www.soychile.cl/Valparaiso/Sociedad/2013/06/28/183326/Desborde-de-un-estero-cause-preocupacion-en-Villa-Alemana.aspx
DC03		Inundación por desborde de cauce	Sector Segundo de Línea	Un amplio sector comprendido entre el extremo norte de las poblaciones Jorge Teillier y Cabo Sepúlveda, pasando por las poblaciones Marga Marga, Exequiel, Ojos de Agua, El Rocío y Camilo Mori, está expuesto a inundación producto del desborde del cauce del estero Unión Troncales.	PLADECO, 2017.
DC04		Inundación por desborde de cauce	Sector Alcalde Alejandro Peralta	Entre las intersecciones de Alcalde Alejandro Peralta con Porvenir y Víctor Domingo Silva, existe riesgo de inundación producto del desborde del cauce del estero Troncos Viejos.	PLADECO, 2017.
DC05		Inundación por desborde de cauce	Avenida Valparaíso	El tramo de la Avenida Valparaíso entre la población Benito Juárez y el puente que cruza el estero Troncos Viejos, está expuesto a inundación por desbordes del cauce de este.	PLADECO, 2017.
DC06		Inundación por desborde de cauce	Población Vicente Martínez	El sector entre Los Álamos, Los Ciruelos y Los Eucaliptus está expuesto a desborde de cauce asociado al estero Gamboa.	PLADECO, 2017.

Código	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Descripción	Referencia
DC07		Inundación por desborde de cauce	Sector Huanhualí, entre El Bosque y Gandarillas	El sector limitado por las calles El Bosque, Huanhualí y Gandarillas está expuesto a desborde de cauce asociado al estero Gamboa.	PLADECO, 2017.
DC08		Inundación por desborde de cauce	Sector San Enrique-Santa Margarita	Sector comprendido entre las calles San Enrique, Santa Margarita y Lourdes está expuesto a desborde de cauce asociado al estero Gamboa.	PLADECO, 2017.
DC09		Inundación por desborde de cauce	Población El Paumo	El sector de la calle Marga Marga, entre Bernardo O'Higgins y El Álamo, está expuesto al desborde de cauce asociado a los esteros Gamboa y Palmilla que confluye en esta área.	PLADECO, 2017.
DC10		Inundación por desborde de cauce	Primera esquina Atahualpa	El sector de la calle Primera, entre Castellón y Atahualpa está expuesto al desborde de cauce asociado al estero Palmilla.	PLADECO, 2017.
DC11		Inundación por desborde de cauce	Hunahualí-Villar	Un amplio sector comprendido entre las calles Huanhualí y Cumming, pasando por las calles Santa Ana, San Enrique, Villar, Sotomayor y Yungay, está expuesto a inundación producto del desborde del cauce del estero Vicente Martínez o Valencia.	PLADECO, 2017.
DC12		Inundación por desborde de cauce	Población El Refugio	El sector comprendido en el entorno de la intersección entre las calles Altamirano y El Refugio está expuesto a inundación por desborde cauce producto del estero Vicente Martínez o Valencia.	PLADECO, 2017.
DC13		Inundación por desborde de cauce	Población Palmilla Baja	El entorno de la intersección entre las calles Echaurren y Veteranos del 79, en la Población Palmilla Baja, está expuesto a inundación por desborde de cauce producto del estero Vicente Martínez o Valencia.	PLADECO, 2017.
DC14		Inundación por desborde de cauce	García con Aviador Figueroa	El sector comprendido entre Aviador Figueroa esquina García y Bruce está expuesto a inundación por desborde de cauce producto del estero Vicente Martínez o Valencia.	PLADECO, 2017.
DC15		Inundación por desborde de cauce	Avenida Valparaíso	En un amplio sector al sur del estero Quilpué, que sigue la orientación de la Avenida Valparaíso entre Patricio Lynch e Ignacio Carrera Pinto, existen antecedentes que dan cuenta de inundaciones, posiblemente asociadas con desbordes del estero.	PLADECO, 2017.

Código	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Descripción	Referencia
		Inundación por desborde de cauce	Canal Los Naranjos	Antecedentes de inundación en sector del Canal Los Naranjos	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
		Inundación por desborde de cauce	Estero Los Algarrobos	Antecedentes de inundación en el sector del Estero Los Algarrobos	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
		Inundación por desborde de cauce	Canal Colo Colo	Antecedentes de inundación en el sector del Canal Colo Colo	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
		Inundación por desborde de cauce	Canal Cabo de Hornos	Antecedentes de inundación en el sector del Canal Cabo de Hornos	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
DC16		Anegamiento	Población Don Daniel	Antecedentes de inundación de la calle Nueva Hipódromo con Los Danieles, posiblemente asociada con el desborde de cauce de un canal que pasa por el sector.	PLADECO, 2017.
A01	2002/06/04	Anegamiento	Villa Alemana	Producto del colapso del sistema de motobombas, los pasos bajo nivel que conectan el barrio norte de Villa Alemana con el Camino Troncal resultaron inundados, provocando serios problemas vehiculares. Los puntos que terminaron más afectados fueron la población Prat, Troncos Viejos, Camilo Mori (en el sector norte), Baquedano, calle Echaurren, Alcalde Peralta, Huanhualí, población Yungay, Paul Harris, sector céntrico, calle Williamson, Sargento Aldea, San Enrique, Santa Margarita y avenida Bernardo Leighton con Paul Harris, donde la maquinaria pesada del municipio debió reforzar con tierra el borde del canal que pasa por Villa Hipódromo y evitar que el agua anegara las casas.	https://www.estrallavalpo.cl/site/edic/20020604115613/pags/20020604131929.html https://www.mercuriovalpo.cl/site/edic/20020603205825/pags/20020603234957.html
A02	2017/05/11	Anegamiento	Villa Alemana	Vivienda quedó anegada con la lluvia en Villa Alemana.	https://www.24horas.cl/regiones/vlparaiso/vivienda

Código	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Descripción	Referencia
					-quedo-anegada-con-la-lluvia-en-villa-alemana-2381351
A03	2020/06/29	Anegamiento	Villa Alemana	Anegamiento de pasos bajo nivel y patios de viviendas. "91 personas resultaron afectadas y 5 de ellas, fueron damnificadas". Pasos bajo nivel afectados Valdivia, Rumie, Riquelme, El Rocío e Ignacio Carrera Pinto, este último tuvo que ser cerrado.	https://www.soychile.cl/Valparaiso/Sociedad/2020/06/30/661754/Inundaciones-de-calles-y-viviendas-marcaron-jornada-de-lluvia-en-Villa-Alemana.aspx
A04		Anegamiento	Estadio Ítalo Composto Scarpati	Exposición de inundación por anegamiento en el sector de la cancha de fútbol.	PLADECO, 2017.
A05		Anegamiento	Población Fuentes y Barrio Norte	Una amplia área comprendida en las poblaciones Fuentes y Barrio Norte, entre las calles Condell Norte e Inés de Suarez, siguiendo las calles Madrid, Viena, Roma y Lima, está expuesta a inundación por anegamiento.	PLADECO, 2017.
A06		Anegamiento	Sargento Aldea, Riquelme y Baquedano	En un amplio sector que abarca el eje del Metro de Valparaíso entre Arturo Prat y Riquelme, incluyendo las calles aledañas de Baquedano, Barros Arana, Parroquia, Valdivia, Valentín Letelier, entre otras, existe exposición a inundación por anegamiento.	PLADECO, 2017.
A07		Anegamiento	Sargento Aldea, Riquelme y Baquedano	En la calle Sargento Aldea, entre Covadonga y Presidente Montt, y el Metro de Valparaíso, existen antecedentes de inundaciones por anegamiento.	PLADECO, 2017.
A08		Anegamiento	Baquedano	En la calle Baquedano, entre San Carlos y Santa Elena, existen antecedentes de inundaciones por anegamiento.	PLADECO, 2017.
A09		Anegamiento	Población Peña Blanca	En la Población Peña Blanca, en el entorno de la intersección entre Lautaro y Tucapel existen antecedentes de inundaciones por anegamiento.	PLADECO, 2017.

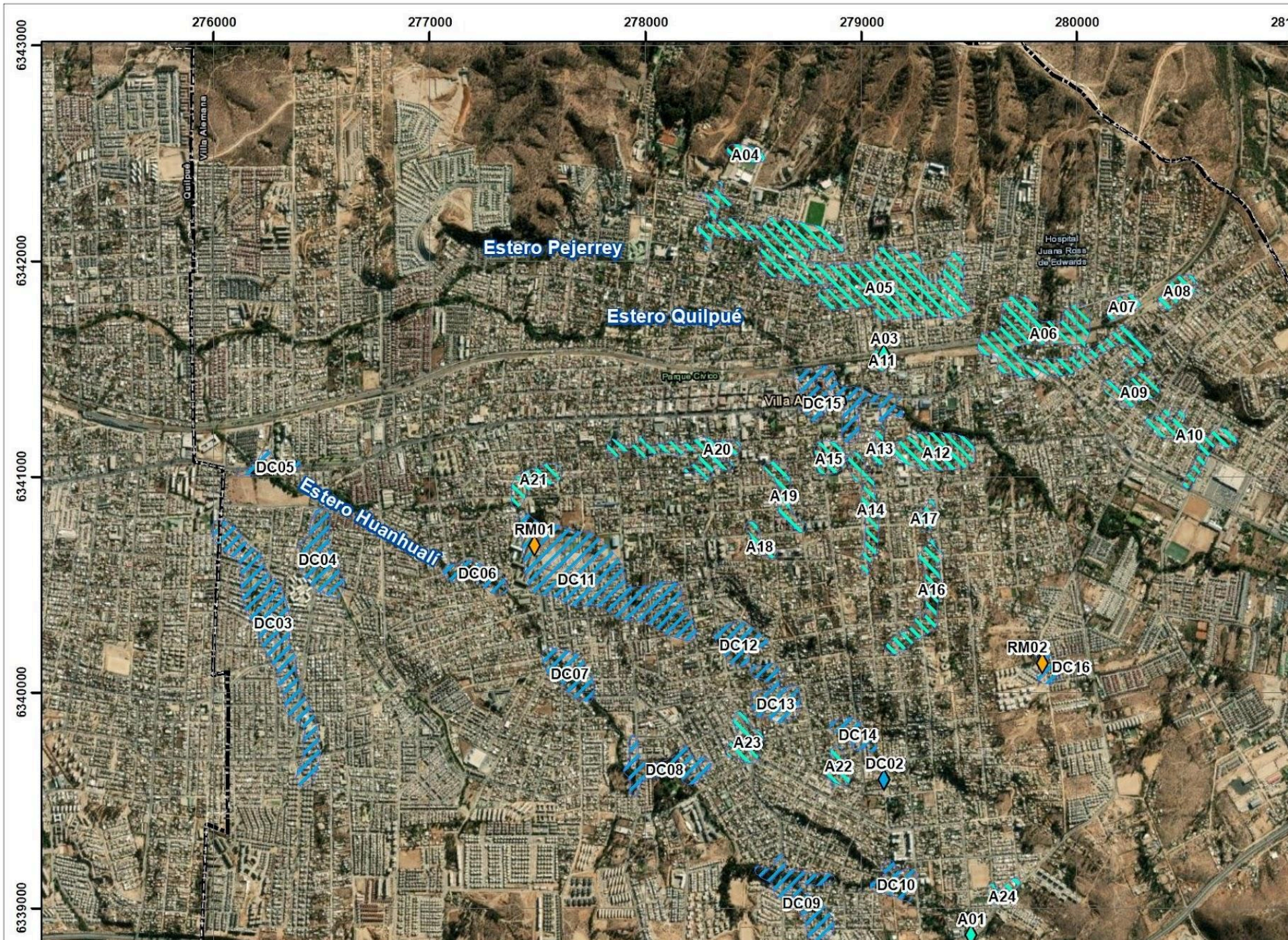
Código	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Descripción	Referencia
A10		Anegamiento	Población Peña Blanca	En la Población Peña Blanca, en el entorno de las calles Marsella y Bucarest existen antecedentes de inundaciones por anegamiento.	PLADECO, 2017.
A11		Anegamiento	Paso bajo nivel Ignacio Carrera Pinto	Antecedentes de inundación por anegamiento del paso bajo nivel Ignacio Carrera Pinto.	PLADECO, 2017.
A12		Anegamiento	Paul Harris	En un amplio sector en torno de la Avenida Victoria, entre Marcelino Champagnat y Gabriela Dazarola, incluyendo la intersección con Paul Harris, existen antecedentes de inundaciones por anegamiento.	PLADECO, 2017.
A13		Anegamiento	Avenida Victoria esquina Ignacio Carrera Pinto	Antecedentes de inundación por anegamiento de la calle Ignacio Carrera Pinto, entre Atalah y Avenida Victoria.	PLADECO, 2017.
A14		Anegamiento	Calle Primera	Antecedentes de inundación por anegamiento a lo largo de la calle Primera, entre Avenida Victoria y Sevilla.	PLADECO, 2017.
A15		Anegamiento	Avenida Victoria esquina Williamson	Antecedentes de inundación por anegamiento en torno de la intersección de Avenida Victoria y Williamson, en la Población Palermo.	PLADECO, 2017.
A16		Anegamiento	Paul Harris	Antecedentes de inundación por anegamiento entre las calles Paul Harris y Marcelino Champagnat.	PLADECO, 2017.
A17		Anegamiento	Federico Errázuriz	Antecedentes de inundación por anegamiento de la calle Federico Errázuriz, entre Paul Harris y Marcelino Champagnat.	PLADECO, 2017.
A18		Anegamiento	Junta de Vecinos Almirante Neff	Antecedentes de inundación por anegamiento en la Población Palmilla Norte, entre San Martín y José Miguel Carrera, con Almirante Neff.	PLADECO, 2017.
A19		Anegamiento	Porvenir y Ricardo Lynch	Antecedentes de inundación por anegamiento del área entre las calles José Miguel Carrera y Patricio Lynch, entre Avenida Victoria y Almirante Neff.	PLADECO, 2017.

Código	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Descripción	Referencia
A20		Anegamiento	Díaz y Avenida Victoria	Antecedentes de inundación por anegamiento de la calle Díaz, entre San Enrique y San Martín. El anegamiento de proyecta hacia el sur a través de Matucana alcanzando Avenida Victoria.	PLADECO, 2017.
A21		Anegamiento	Huanhualí	Antecedentes de inundación por anegamiento de las poblaciones Centro Sur y la Arbolada, entre Balmaceda y Huanhualí, alcanzando la calle Porvenir.	PLADECO, 2017.
A22		Anegamiento	Patricio Lynch con Bruce	Antecedentes de inundación por anegamiento en torno de la intersección de Patricio Lynch con Bruce y Proyectada.	PLADECO, 2017.
A23		Anegamiento	Matunca con García/Huasco	Antecedentes de inundación por anegamiento en torno de la intersección de Matucana con García/Huasco, entre Las Rosas y Las Palmas/Lourdes.	PLADECO, 2017.
A24		Anegamiento	Villa Hipódromo	Antecedentes de inundación por anegamiento en torno de la intersección de Avenida Vicepresidente Bernardo Leighton con Gabriel Dazarola.	PLADECO, 2017.
-		Anegamiento	Paso peatonal Sexta	Antecedentes de anegamiento en sector paso peatonal Sexta.	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
-		Anegamiento	Paso peatonal Pratt	Antecedentes de anegamiento en sector paso nivel peatonal Pratt.	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
-		Anegamiento	Consultorio Las Vegas	Antecedentes de anegamiento en sector donde está el Consultorio Las Vegas.	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
A27		Anegamiento	Sector Belloni	Antecedentes de anegamiento en sector Belloni.	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)

Código	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Descripción	Referencia
		Anegamiento	Canal Juan García	Antecedentes de anegamiento en sector del Canal Juan García.	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
A28		Anegamiento	Estación Merval	Antecedentes de anegamiento en sector de la Estación Merval Villa Alemana.	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
A29		Anegamiento	Población Dupre	Antecedentes de anegamiento en la Población Dupre.	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-1 Catastro de inundaciones en la comuna de Villa Alemana



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Diagnóstico

3.2.1 Inundaciones por desborde de cauce

Los antecedentes históricos contenidos en el catastro, las características geológicas y geomorfológicas del área de estudio y la hidrología indican que los cauces del área corresponden a zonas inundables o potencialmente inundables por eventos de desbordes de cauces, con distinta frecuencia y magnitud. En el área estudiada destacan los esteros Quilpué, Aranda, Moscoso, Valencia, Unión Troncales, Lo Godoy, Huanhualí, Palmilla y Pejerrey y algunas quebradas importantes como Agua Fría, Honda y El Durazno.

Los cauces de la comuna, al ser de alimentación pluvial y de carácter intermitente, está estrechamente condicionado por las precipitaciones (PLADECO, 2017), por lo que los principales eventos de inundación se concentran en las estaciones invernales.

La totalidad de los esteros que conforman la red de drenaje del área urbana de Villa Alemana han sido modificados, aunque existen algunos tramos de los cauces que se encuentran en su condición natural. Las obras de modificación de los cauces son cambios en los trazados de los cauces, obras de canalización y de recubrimiento con hormigón, obras de contención y entubamiento de los cauces. Cada una de estas obras incide en la probabilidad de que los cauces se puedan desbordar.

Si bien existen varios lugares donde se han realizado modificaciones al trazado de los cauces, estas son mayoritariamente de alcance muy local y no parecen tener un efecto mayor. La excepción es el estero Palmilla, donde una parte importante del trazado se modificó. La consecuencia de esto es que el cauce no escurre por la zona más baja de la subcuenca, de manera que, en caso de desbordarse, el agua no converge hacia el cauce, sino que tiende a buscar el cauce natural, generando zonas con potencial para inundarse.

Tanto las obras de canalización y recubrimiento con hormigón como las obras de contención reducen la probabilidad de que se generen inundaciones asociadas al desborde de cauces. En este estudio no se realizó un catastro acabado de obras ni la municipalidad cuenta con este.

Es lo que ocurre con el estero Quilpué, que nace en el sector de Rinconada, al oriente de la comuna. Este estero es el que ha sufrido los mayores desbordes a lo largo de la historia y es el que atraviesa toda el área urbana, sin embargo, debido a la intervención antrópica por la urbanización y canalización, este río no ha generado grandes inundaciones en la comuna en los últimos años.

Por último, se encuentran obras de entubamiento en prácticamente todos los cauces. El principal problema de este tipo de obras es que no es posible realizar las mantenciones que ellas requieren, quedando expuestas a la acumulación de los sedimentos que naturalmente escurren por los cauces o a la basura que la población arroja en ellos. Lo anterior puede provocar la obstrucción parcial o total de estas obras dando lugar a condiciones propicias para que los cauces se desborden al inicio de los tramos entubados. Por lo anterior, la Dirección de Obras Hidráulicas no permite en la actualidad realizar este tipo de obras.

Otro problema que se identificó para los tramos entubados es que no se cuenta con información precisa acerca de la ubicación de estos tramos. Además, en muchos casos estos tramos se encuentran debajo de casas, por lo que, en caso de requerir obras locales, no sería posible.

Según los antecedentes revisados, existen inundaciones recurrentes en el centro de la ciudad, donde cauces pequeños se inundan cada cierto tiempo, afectando principalmente la calle Maturana. También entre la calle Empart y Díaz existe un estero sin nombre que se encuentra entubado que genera inundaciones en ese sector.

Otros esteros que causan grandes problemas de inundación son el estero Pejerrey y Huanhualí.

El primero se encuentra parcialmente entubado y se expone nuevamente a la superficie en el sector del estadio, generando inundaciones entre las calles Roma y Lima. Como ejemplo, en la Figura 3-2 se muestra uno de los puntos donde el estero Pejerrey sale a la superficie y en la Figura 3-3 se muestra la zona de confluencia con el estero Quilpué.

El segundo genera inundaciones en la calle con su mismo nombre. Cabe destacar que, aunque la lluvia es el principal factor que genera estos eventos, la basura y escombros arrojados por la comunidad en los lechos de los cursos de agua contribuyen de manera importante a su generación e incrementación del nivel de inundación.

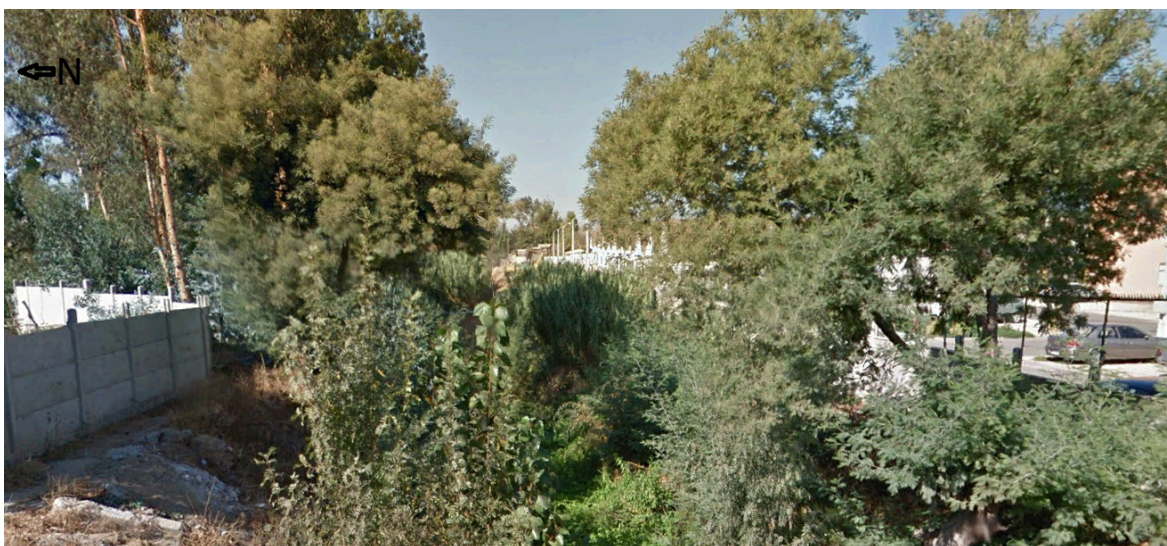
En los cauces que se encuentran menos intervenidos, que se encuentran mayoritariamente en las zonas más rurales de la comuna, es posible definir las zonas propensas a inundarse considerando únicamente el catastro de inundaciones y las características geológicas y geomorfológicas locales. Sin embargo, tal como se explicó anteriormente, una parte importante de los cauces que se encuentran en el área de Villa Alemana se han intervenido, por lo que los antecedentes mencionados anteriormente pueden ser insuficientes. Por esta razón, se construyeron modelos hidráulicos de inundación para sectores específicos, en los tramos que se reconocieron como más complejos y aquellos donde las condiciones locales los hacen representativos de las características generales de los cauces del área urbana.

Figura 3-2 Zona adyacente al Colegio San Antonio de Villa Alemana donde el Estero Pejerrey sale a superficie



Fuente: Google Earth.

Figura 3-3 Zona donde se junta el Estero Pejerrey y Quilpué



Fuente: Google Earth.

Finalmente, con respecto a los factores desencadenantes, la ocurrencia de lluvias intensas o lluvias de varios días de duración corresponden al principal desencadenante natural que puede activar parcialmente la red, sin escorrentía permanente, o aumentar el caudal normal de un cauce activo, tal como lo evidencia el catastro, sin embargo, los bloqueos, rupturas o problemas en la mantención de los ductos podría generar también el colapso y como consecuencia inundaciones de los sectores aledaños. Lo anterior, permite determinar que todos los cauces deben tener algún grado de susceptibilidad de inundaciones, independiente del tamaño o forma de la cuenca aportante.

3.2.2 Inundaciones por anegamiento

A partir del catastro generado, la comuna sí cuenta con zonas anegadas principalmente por el colapso de los sistemas de alcantarillados cuando las condiciones pluviales sobrepasan la capacidad de los colectores, calles en mal estado y uso de sumideros, añadiendo además el bajo nivel de algunas zonas que permiten una acumulación de agua.

Por lo tanto, al igual que en las inundaciones por desborde de cauce, el factor desencadenante principal es la ocurrencia de lluvias intensas.

3.3 Modelación hidráulica

La evaluación de la zona de inundación se estimó mediante la modelación numérica en el software HEC-RAS en el cual se determina el nivel de agua en un cauce a partir del caudal, la geometría del terreno, la rugosidad del lecho y las condiciones que restringen el comportamiento hidráulico del cauce. Lo anterior, para un caudal de período de retorno 100 años, en los 9 tramos priorizados en los 4 cauces definidos.

3.3.1 Construcción de modelos hidráulicos

A continuación, se presentan los caudales, topografía, rugosidad del lecho y condiciones de borde para la modelación hidráulica.

3.3.1.1 Caudales

Se considera un escenario de caudales máximos instantáneos, con período de retorno $T = 100$ años, para los 9 modelos priorizados, según la Tabla 10-7.

3.3.1.2 Topografía

La geometría del terreno proviene del levantamiento aerofotogramétrico realizado en la zona de estudio para la elaboración del presente Plan Regulador Comunal (PRC), con una resolución de 1x1m. En base a este levantamiento, se obtiene un modelo de elevación digital del terreno que permite determinar el perfil longitudinal de los cauces y sus secciones transversales.

Adicionalmente se complementó la información de obras hidráulicas, como puentes o alcantarillas, con la visita a terreno.

3.3.1.3 Rugosidad de Lecho

La rugosidad del lecho se cuantifica en términos del coeficiente de Manning, el cual se determina en base a lo observado durante la visita a terreno realizada en agosto de 2021 y la fotografía aérea. Los valores se ajustaron considerando tramos homogéneos tanto de la caja principal del cauce respectivo como de las planicies de inundación y las zonas de desborde dentro de la ciudad. Para ello se consideró el material del perímetro, la irregularidad del cauce, el efecto de obstrucciones, la mayor o menor presencia de vegetación, la variación de la sección transversal a lo largo del cauce y las curvaturas en planta de este. Los valores fueron estimados utilizando la fórmula de Cowan. Los resultados obtenidos para cada modelo se presentan en la Tabla 3-2. El detalle de la metodología utilizada se incluye en el Anexo C, y el detalle de la estimación del coeficiente por modelo en el Anexo E.

Tabla 3-2 Estimación del coeficiente de Manning, utilizando el método de Cowan

Cauce	Modelo	Planicie Izquierda	Caja Principal	Planicie Derecha
Estero Pejerreyes	1	0,045	0,035	0,045
	2	0,030	0,030	0,030
	3	0,025	0,025	0,025
	4	0,030	0,030	0,030
Estero Quilpué	1	0,059	0,039	0,059
Estero Palmilla	1	0,030	0,030	0,030
Estero Huanhualí	1	0,040	0,030	0,040
	2	0,035	0,035	0,035
	3	0,035	0,035	0,035

Fuente: Elaboración propia.

Para los sectores urbanos impermeables, en las zonas de desborde de los cauces, se ha considerado un valor del coeficiente de Manning de 0,018, tomado desde literatura técnica.

3.3.1.4 Condiciones de borde

Debido a que se desconoce, a priori, el régimen de flujo de los distintos cauces en el área de estudio, se supone un régimen mixto, determinando las condiciones que restringen el comportamiento hidráulico de los cauces durante el proceso de modelación. Para ello, es necesario incorporar condiciones de borde tanto aguas arriba como aguas abajo de los cauces modelados.

La condición de borde, tanto aguas arriba como aguas abajo, está representada por una altura normal que depende de la pendiente de fondo de los cauces, la cual se deriva de la geometría del terreno. El único caso diferente corresponde al modelo 3 del estero Huanhualí, donde la condición de borde aguas abajo está dada por la altura del agua en el perfil aguas arriba del modelo 2 del estero Huanhualí 2, dado que el régimen del cauce es de río y está condicionado aguas arriba.

La Tabla 3-3 sintetiza las condiciones de borde para cada uno de los cauces modelados en el área de estudio.

Tabla 3-3 Condiciones de borde modelos hidráulicos

Cauce	Modelo	Condición de borde aguas arriba	Condición de borde aguas abajo
Estero Pejerreyes	1	Pendiente = 0,0400	Pendiente = 0,006
	2	Pendiente = 0,0075	Pendiente = 0,0060
	3	Pendiente = 0,0054	Pendiente = 0,0070
	4	Pendiente = 0,0150	Pendiente = 0,0102
Estero Quilpué	1	Pendiente = 0,0028	Pendiente = 0,0048
Estero Palmilla	1	Pendiente = 0,0030	Pendiente = 0,0010
Estero Huanhualí	1	Pendiente = 0,0005	Pendiente = 0,0095
	2	Pendiente = 0,0035	Pendiente = 0,0180
	3	Pendiente = 0,0110	Altura agua = 124,5 m

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Síntesis de resultados de resultados

Una vez definidas las variables señaladas anteriormente, se implementa el modelo hidráulico en el software HEC-RAS, en el cual se calcula, numéricamente, el eje hidráulico de los cauces analizados. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los modelos desarrollados, enfocándose en las áreas de riesgo por zonas inundables producto de los caudales máximos asociados a los períodos de retorno simulados.

Se acompañan a este informe los resultados del modelo HEC RAS para período de retorno de 100 años y los perfiles transversales en el Anexo E.

De esta forma, en la Tabla 3-4 se sintetizan los principales resultados obtenidos en cada uno de los modelos.

Tabla 3-4 Síntesis de los resultados del estudio

Cauce	Modelo	Régimen	Ancho de inundación (período de retorno 100 años)
Pejerreyes	Modelo 1	Principalmente río	6-26 m
	Modelo 2	Principalmente torrente	5-9 m
	Modelo 3	Principalmente río	11-152 m
	Modelo 4	Principalmente río	4-162 m
Quilpué	Modelo 1	Principalmente río	9-35 m
Palmilla	Modelo 1	Principalmente río	4-40 m
Huanhualí	Modelo 1	Principalmente río	7-44 m
	Modelo 2	Principalmente río	8-106 m
	Modelo 3	Principalmente río	6-42 m

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Susceptibilidad y zonificación

3.4.1 Inundación por desborde de cauce

Los resultados anteriores se utilizaron para establecer criterios de zonificación de la susceptibilidad de inundación por desborde de cauces. Por las condiciones descritas anteriormente, se deben tomar en cuenta criterios que consideren los efectos tanto de los tramos abiertos como cerrados.

Para el caso de los canales abiertos, se definieron como zonas de susceptibilidad muy alta los cauces activos (zonas por donde normalmente escurre el agua) que se encuentran abiertos. También se definieron como zonas de susceptibilidad alta zonas bajas (terrazas) ubicadas junto a los cauces activos, que se encuentran mayoritariamente en los esteros Quilpué y Pejerreyes. En aquellos sectores donde existen modelos numéricos, se acotaron las zonas de susceptibilidad alta en función de los resultados, asignando a las zonas que se encuentran fuera de ellas una susceptibilidad moderada.

Las zonas de susceptibilidad alta y moderada se asocian a inundaciones de una magnitud considerablemente mayor que las que se generan producto de precipitaciones que ocurren frecuentemente. Como referencia, se asignó susceptibilidad alta a zonas donde los modelos hidráulicos muestran que existe inundación asociada a un período de retorno de 100 años. En consecuencia, estas áreas son una aproximación de las zonas que podrían ser afectadas en el caso de ocurrir una precipitación extrema, como las que se podrían esperar en un escenario de cambio climático.

Para el caso de los cauces cerrados, la susceptibilidad considera dos condiciones que deben tenerse en cuenta.

La primera de ellas es el trazado de las tuberías, que se debe incluir para asegurar, en aquellos sectores que todavía no se han construido, que, de ser necesario, las zonas entubadas puedan repararse. En este caso, se asignó una susceptibilidad alta al trazado de las zonas entubadas. Sin embargo, dado que en muchos casos

se desconoce este trazado, se definió una zona de susceptibilidad alta más grande, que considere todos los posibles trazados.

La segunda de ellas tiene que ver con un posible desborde en la zona de entrada a estos tramos entubados, que, como se explicó anteriormente, podrían dar origen a inundaciones en caso de que las tuberías se encuentren obstruidas. En estos casos, se definió a partir de la topografía la zona por donde posiblemente escurriría el agua, hasta llegar nuevamente a un cauce abierto. A estas zonas se les asignó una susceptibilidad moderada.

De esta forma, los criterios de zonificación de la susceptibilidad de inundación por desborde de cauces son los siguientes:

- **Susceptibilidad Muy Alta:** Cauces activos de canales abiertos.
- **Susceptibilidad Alta:** En el caso de los canales abiertos, corresponde a la parte de las terrazas adyacentes a los cauces activos donde no hay modelos hidráulicos o donde el modelo hidráulico muestra que existe inundación. En el caso de los canales cerrados corresponde a las zonas onde podría estar ubicada la tubería por donde escurre el cauce.
- **Susceptibilidad Moderada:** En el caso de los canales abiertos, corresponde a la parte de las terrazas adyacentes a los cauces activos donde el modelo hidráulico muestra no que existe inundación. En el caso de los canales cerrados, son las zonas por donde teóricamente escurriría superficialmente el agua en el caso que una tubería se encuentre obstruida.

El mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauces se encuentra adjunto fuera de texto a escala 1:15.000.

3.4.2 Inundación por anegamiento

Para determinar las áreas susceptibles a ser afectadas por anegamiento se consideraron dos insumos:

- Catastro obtenido a partir de los antecedentes que se describen en este documento, reporte de los eventos históricos detonadores de peligros de origen natural y sus consecuencias, que indica las zonas que han sido afectadas por anegamientos en el pasado.
- Zonas deprimidas generadas a partir del DTM provisto para este trabajo. Esto se obtuvo a partir de la diferencia entre un modelo elevación rellenado (obtenido mediante el geoprocetamiento GIS del DTM original) con el DTM original, esta resta muestra las zonas de sumideros topográficos donde el agua se “apostaría”, ya que en esos sectores existe una convergencia de los flujos sobre el modelo (notar que el modelo en muchas ocasiones no suprime puentes, y no es capaz de representar entubamientos de cauces, por lo que la topografía modelada es considerada como un dique sólido impenetrable para los flujos superficiales calculados).

De esta forma, se marcaron polígonos que representan zonas susceptibles a inundaciones por anegamiento, cuyos criterios de zonificación se describen a continuación

- **Susceptibilidad Alta de inundación por anegamiento:** áreas con eventos catastrados de anegamientos en el pasado, así como los sumideros detectados en el ráster de zonas deprimidas que coinciden con las áreas de anegamiento según el catastro.
- **Susceptibilidad Moderada de inundación por anegamiento:** zonas deprimidas según el ráster de sumideros.

Es importante mencionar que en esta zonificación se consideraron polígonos de áreas superiores a 500 m².

El mapa de susceptibilidad de inundación por anegamiento se encuentra adjunto fuera de texto a escala 1:15.000.

4 Remociones en masa

El término “remoción en masa” incluye una amplia variedad de procesos que generan el movimiento aguas abajo de los materiales que constituyen las laderas, incluyendo roca, suelo, relleno artificial o una combinación de las anteriores. El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA, 2008). Para los fines de este informe, se han separado en dos tipos principales: “Flujos de barro y/o detritos” y “Procesos de ladera”.

- **Flujos de barro y/o detritos:** Los flujos de detritos, referidos comúnmente como “aluviones”, son un tipo de remociones en masa que ocurren cuando una masa de sedimentos con mala clasificación, agitados y saturados con agua, se movilizan pendiente abajo como flujos viscosos de sedimentos concentrados (Antinao, et al., 2002).
- **Procesos de ladera:** Se ha agrupado en esta categoría dos tipos de procesos que pueden afectar al área de estudio: caída de rocas y deslizamientos. La caída de rocas corresponde a bloques de rocas o suelo que se desprenden a partir de laderas de altas pendientes, como cornisas o acantilados rocosos, para luego desplazarse en caída libre, al menos en parte de su trayectoria (Hauser, 2000). Los deslizamientos corresponden a masas de suelo o roca que se deslizan principalmente a lo largo de superficies de ruptura, al superarse la resistencia al corte, generando el movimiento del material en su conjunto (Hauser, 2000).

Para más detalles acerca de estos procesos ver el Capítulo 9.1.2 “Procesos de remoción en masa”.

4.1 Catastro

En la Tabla 4-1 se presenta un catastro construido a partir de los antecedentes revisados durante el desarrollo de este trabajo. Cabe mencionar que, en los archivos de prensa, sobre todo en los más antiguos, se utiliza un lenguaje impreciso, que confunde los eventos de flujos de barro y/o detritos con eventos de inundación por desborde de cauces e incluso con anegamientos y se ocupan terminologías imprecisas para hacer referencia a los diversos tipos de procesos de remociones en masa. Por lo tanto, los eventos catastrados deben ser interpretados considerando dicha imprecisión. Por otra parte, debido a esta imprecisión, se ha elaborado un único catastro para los diferentes tipos de remociones en masa.

Aunque no existen muchos registros de procesos de remoción en masa, se tienen antecedentes de dos socavones que han ocurrido en la comuna, que se detallan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Catastro de remociones en masa en la comuna de Villa Alemana

Código	Fecha	Tipo de Evento	Sector	Descripción	Referencia
RM01	2002/06/04	Socavón	Sector Huanhualí	El canal que pasa por el sector de Huanhualí, dejó la vivienda de Cecilia Contreras con serios socavones y provocó que un furgón escolar desbarrancara.	https://www.estrellavalpo.cl/site/edic/20020604115613/pags/20020604131929.html
RM02	2015/08/06	Socavón	Intersección calles Nueva Hipódromo con Los Danieles	Socavón en calle Nueva Hipódromo con Los Danieles, comuna de Villa Alemana.	Sernageomin, 2017
		Erosión	Estero Pejerrey-Población Aguas Calras	Antecedentes de erosión en el sector del Estero Pejerrey y Población Aguas Claras	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Cordón 3 Puntas, Quebrada Escobares	Antecedentes de procesos de erosión en el sector de Quebrada Escobares y Cordón 3 Puntas	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Población El Carmen	Antecedentes de procesos de erosión en Población El Carmen	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Población Gumersindo	Antecedentes de procesos de erosión en Población Gumersindo	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Población Los Avellanos	Antecedentes de procesos de erosión en Población Los Avellanos	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Canal Los Eucaliptos	Antecedentes de procesos de erosión en Canal Los Eucaliptos	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Población El Mirador	Antecedentes de procesos de erosión en Población el Mirador	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Sector Gustavo Zamora	Antecedentes de procesos de erosión en el Sector Gustavo Zamora	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)

			Población Fundo El Rincon	Antecedentes de procesos de erosión en Población Fundo El Rincon	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Estadio Italo Composto	Antecedentes de procesos de erosión en Estadio Italo Composto	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Villa Rumie	Antecedentes de procesos de erosión en Villa Rumie	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Villa Paul Harris	Antecedentes de procesos de erosión en Villa Paul Harris	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			El Patagual	Antecedentes de procesos de erosión en el sector El Patagual	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Ruta F-580	Antecedentes de rodados o interrupción de caminos en ruta F-580	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Calle Progreso	Antecedentes de rodados o interrupción de caminos calle Progreso a la altura del número 1000	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Puente Araya	Antecedentes de rodados o interrupción de caminos en el Sector del puente Araya	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)
			Población Fundo viñas del Bosque	Antecedentes de rodados o interrupción de caminos en Población Fundo Viñas del Bosque	Plan Comunal de Protección Civil de Villa Alemana (2018)

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Diagnóstico

4.2.1 Flujos de barro y/o detrito

Las remociones de tipo flujo son procesos gravitacionales controlados usualmente por condiciones meteorológicas anómalas en zonas susceptibles a la generación de procesos de ladera, como por ejemplo deslizamientos de suelo y/o roca que se pueden fluidizar y el material puede canalizarse hacia zonas urbanas a través del cauce de una quebrada.

Estos procesos son altamente peligrosos dadas las grandes velocidades que pueden alcanzar y las largas distancias que pueden recorrer. Debido a las bajas pendientes de las quebradas aledañas a la ciudad (Figura 2-5), que en su mayoría no superan los 15 grados, no se deberían generar flujos de grandes magnitudes, sin embargo, este fenómeno y sus consecuencias no debiesen ser descartados.

En general, los factores geológicos y geomorfológicos que condicionan la ocurrencia de flujos de barro y/o detritos, corresponden a la existencia de cauces, tamaño de la cuenca aportante, pendiente de las laderas y disponibilidad de material para ser transportado (Blair & McPherson., 2009), tanto de laderas con posibilidad de generación de deslizamientos superficiales o depósitos de remociones en masa no consolidados.

Adicionalmente, la intensidad de los flujos de barro y/o detritos también se relaciona con la pendiente de los cauces por donde circulan, ya que esta determina la energía con la que se transportan los materiales y, por lo tanto, la velocidad y facilidad con la que podría transportar el material disponible en los cauces y/o laderas.

En general, mientras mayor sea la superficie de una cuenca hidrográfica, mayor será el alcance del potencial evento aluvional que puede generar, esto considerando que existe material disponible para ser transportado, una pendiente que permita que este material se desplace por las laderas y suficiente agua para poder iniciar el movimiento. Por otra parte, una cuenca no tan extensa puede generar flujos de menor tamaño, pero que afecte a una cuenca menos estudiada.

En Chile, el factor desencadenante más común de flujos de detritos son las lluvias de corta duración y de intensidad excepcional, que afectan localmente a las laderas y quebradas, y que terminan por desestabilizar el material detrítico disponible en ellas, transportándolo aguas abajo.

Por otro lado, en nuestro país existen muy pocos estudios que relacionen las intensidades de precipitaciones y este tipo de fenómenos, debido, principalmente, a los escasos registros de intensidad de precipitaciones y de flujos de detritos históricos. Solo recientemente (durante las últimas décadas) se han instalado pluviógrafos que miden la intensidad instantánea u horaria de precipitaciones (mm por hora); de momento, solo se dispone de registros más sostenidos en el tiempo de precipitaciones diarias (mm en 24 horas). Esto dificulta los análisis que ponen en relación estas variables, ya que a veces basta una lluvia extremadamente intensa de corta duración, para generar un flujo de detritos de proporciones considerables, y alto poder destructivo.

4.2.2 Procesos de ladera

Para efectuar un diagnóstico de la ocurrencia de fenómenos de procesos de ladera en la comuna de Villa Alemana es importante identificar los factores condicionantes correspondientes a las características inherentes al territorio, y los factores desencadenantes que permiten que, finalmente, los procesos ocurran. La combinación de estos factores en el pasado ha quedado evidenciada por el catastro y la geología de la comuna.

Como se ha mencionado, dentro de los procesos de ladera se distinguen dos grandes tipos: caídas de bloques y deslizamientos.

Las caídas de bloques se asocian a la existencia de afloramientos de rocas con discontinuidades y condiciones de inestabilidad favorables para que los fragmentos se desplacen a través de un talud, ya sea en caída libre, rodando o rebotando. Entre los factores condicionantes se diferencian aquellos que determinan la probabilidad de ocurrencia de los que controlan el nivel de daño generado. Entre los primeros, se considera la orientación y la frecuencia de las discontinuidades y la pendiente del talud, mientras que, en el segundo grupo, se encuentra el tamaño de los bloques que caen y la distancia recorrida por estos.

Los deslizamientos pueden ocurrir de varias formas, dependiendo de las propiedades del material y las características geológicas y geomorfológicas del entorno, siendo principalmente divididos en rotacionales y traslacionales. Esto implica que las superficies de ruptura pueden ser curvas y cóncavas, o a lo largo de un plano o superficie ondulada, respectivamente. Los factores condicionantes corresponden a las características geológicas (litología, estructuras, grado de alteración y meteorización, etc.), geomorfológicas (pendiente, aspecto, curvatura, elevación, entre otros), el grado de humedad y posición del nivel freático. Según Hungr et al. (2005) y Qarinur (2015), generalmente el alcance de los deslizamientos está fuertemente controlado por la altura desde donde se genera el movimiento: a mayor desnivel, mayor será la posibilidad de alcanzar mayores distancias.

Estos dos fenómenos (caídas de bloques y deslizamientos) pueden ser abordados de manera conjunta en el concepto de “procesos de ladera”. Estos procesos dan cuenta de la dinámica de las laderas en varias escalas, desde tiempo geológico con procesos lentos a algunos que ocurren en segundos, y considerando que toda ladera puede estar expuesta al desgaste, erosión y transporte (ya sea en la forma de cualquiera de estos tipos de movimientos).

El principal factor desencadenante para los procesos de ladera son los grandes sismos, que pueden generar numerosos desprendimientos en los sectores con fuertes pendientes y condiciones geológicas y estructurales favorables. En segundo lugar, se encuentran los eventos meteorológicos extremos, que pueden disminuir la resistencia al corte de los materiales geológicos. Estos dos factores desestabilizan las laderas, acrecentando los factores que las hacen susceptibles a la generación de estos procesos.

De acuerdo con el catastro generado a partir de fuentes bibliográficas, no existen evidencias de remociones en masa dentro de la comuna, a excepción de los socavones mencionados en el catastro. Sin embargo, las condiciones geológicas y geomorfológicas permiten determinar que sí es posible que ocurran estos fenómenos, debido a la existencia de depósitos asociados a remociones en masa y a la presencia de laderas con zonas de pendientes suficientemente altas que pueden ser propensas a generar estos procesos. Una zona en particular con altas pendientes que podría verse afectada por estos eventos son algunos cerros al sur de la comuna (Gumercindo), que presentan con cortes de ladera donde hay loteos y tomas.

4.3 Susceptibilidad y zonificación

4.3.1 Flujos de barro y/o detrito

Para determinar las áreas susceptibles a ser afectadas por flujos de barro y/o detritos se consideraron tres insumos:

- Catastro: obtenido a partir de antecedentes recopilados donde no existen registros de que hayan ocurrido este tipo de peligro recientemente.
- Geología: caracterización de unidades geológicas presentadas en el capítulo 2.3, donde se extraen las unidades geológicas de aluvial y coluvial.

De los insumos recién mencionados, las unidades geológicas de origen aluvial y coluvial corresponden a los depósitos acumulados en las principales quebradas y antiguos abanicos y planicies aluviales que corresponden a evidencia directa de que se han acumulado sucesivos flujos de barro y/o detrito en el

pasado. Estos fueron ajustados para generar la zonificación mediante la ortofoto generada para este estudio, la topografía y criterio del experto a cargo.

Por otro lado, como no existen registros en la zona de este fenómeno y además no presenta características óptimas para generar flujos, solo se asignaron dos categorías de susceptibilidad, alta y moderada.

De esta forma, las zonas susceptibles a flujos de barro y/o detritos se describen a continuación

- **Susceptibilidad Alta de flujos de barro y/o detrito:** Cauces de quebradas con depósitos aluviales (Ha) y aluviales y coluviales (Hac) actuales obtenidos de la geología a escala 1:5.000 ajustadas a partir de la ortofoto y criterio del experto a cargo.
- **Susceptibilidad Moderada e flujos de barro y/o detrito:** Abanicos y planicies aluviales extraídos del mapa geológico con ajustes a partir imágenes satelitales y criterio del experto.

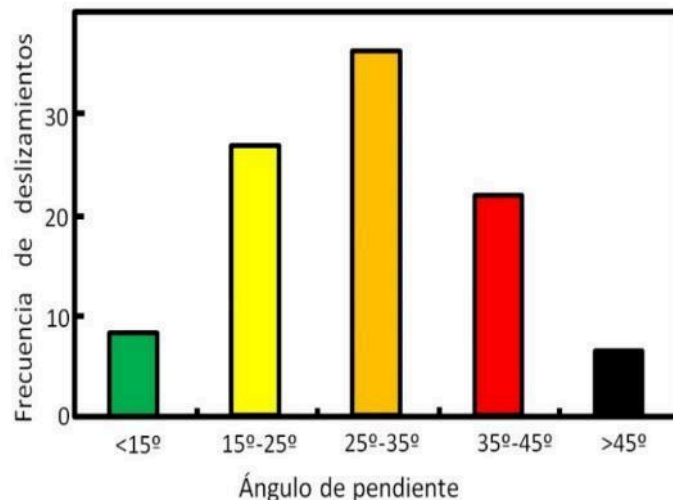
El mapa de susceptibilidad de flujo de barro y/o detrito se encuentra adjunto fuera del texto a escala 1:15.000.

4.3.2 Procesos de ladera

Para analizar la susceptibilidad de procesos de ladera en la comuna se consideraron dos insumos principales, los cuales corresponden a las pendientes y el catastro existente en la zona.

Para determinar la susceptibilidad asociada a pendientes se utilizaron los rangos de por Esaki et al. (2005), las cuales incluyen una distribución de frecuencias en función de la pendiente del terreno. Estas categorías fueron construidas a partir de información de diversas fuentes que han generado catastros generados catastros de deslizamientos en distintos lugares de mundo. (Figura 4-1).

Figura 4-1 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente el terreno



Fuente: Esaki (2005).

En este análisis se determinaron las áreas de generación a partir del geoprocesamiento digital del ráster de pendientes derivado de la topografía disponible para este estudio. Junto a este análisis las pendientes fueron clasificadas considerando los intervalos propuestos anteriormente. Así, los intervalos de categorización de las pendientes fueron 15° - 25°, 25° - 35° y mayor a 35°, los que se denominaron grados de susceptibilidad de generación moderada, alta y muy alta, respectivamente.

A partir de esta clasificación según rangos de pendiente, se tomaron las categorías alta y muy alta para determinar el alcance que tendrían y llegar al mapa de susceptibilidad final.

Para estimar el alcance de este proceso, se utilizó el software Gravitational Process Path model (GPP) de SAGA GIS, con los componentes indicados por Wichman (2017) para simular procesos de remociones en masa. El primer componente define la trayectoria del procesos (process path), para el cual se selecciona el modelo estocástico Random Walk que hace posible la dispersión lateral de las partículas a partir de un cierto ángulo umbral . El segundo componente define la distancia de alcance (runout) del proceso, para el cual se elige el modelo de fricción de 1 parámetro (Scheidegger, 1975). Los insumos utilizados para generar el modelo del alcance fueron:

- Raster del modelo de elevación digital generado en este estudio.
- Raster de susceptibilidad de generación de procesos de ladera: se consideraron como áreas de generación para la simulación de alcance las zonas con pendiente mayor a 25°.

Para calibrar los parámetros del modelo, se utilizaron los valores promedio de los rangos de calibración sugeridos para caídas de rocas (Wichman, 2017), que se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 4-2 Valores de los parámetros de modelación utilizados para estimar el alcance de procesos de ladera

	Modelo Random Walk			Modelo de fricción 1 parámetro				
Parámetro	Slope Threshold	Exp	Persistence factor	Threshold angle free fall	Method impact	Reduction	Mu	Mode of motion
Valor	60	1.75	1.3	60	Energy reduction	70	0.7	Sliding

El modelo Random Walk y el modelo de fricción de 1 parámetro, operan sincronizados definiendo la trayectoria y la distancia de viaje de las partículas, en un modelo probabilístico que entrega como resultado la trayectoria de cada una de las partículas en 10 iteraciones distintas. Con esto se obtuvo el modelo de alcance en un formato ráster, el cual contiene la frecuencia de las trayectorias de partículas en cada pixel.

Finalmente, los valores de la capa del modelo de alcance obtenido se les asignó como zona de susceptibilidad Alta

En función de lo anterior se asignaron las siguientes categorías de susceptibilidad asociadas a procesos de laderas, descritos a continuación:

- **Susceptibilidad Muy alta de generación de procesos de ladera:** zonas con pendientes superiores a 35°, dado que se consideran las potencialmente más propensas a generar este tipo de fenómenos.
- **Susceptibilidad Alta de generación de procesos de ladera:** laderas con pendientes entre 25° - 35° y zonas de alcance modeladas con GPP.
- **Susceptibilidad Moderada de generación de procesos de ladera:** laderas con pendientes entre 15° - 25°.

El mapa de susceptibilidad de generación de procesos de ladera se encuentra adjunto fuera de texto a escala 1:15.000.

5 Sismicidad

El contexto geodinámico de subducción, dado por la convergencia entre las placas Nazca y Sudamericana, posiciona al territorio chileno sobre un borde tectónicamente activo que ha caracterizado la historia sísmica del país. El fenómeno de convergencia de placas oceánica y continental produce un alto nivel de acoplamiento mecánico en la zona de contacto interplaca, lo que genera acumulación de energía elástica que posteriormente es liberada, provocando grandes terremotos. Los sismos presentan una clara distribución espacial, donde existe una banda sísmica muy angosta (100-150 km de ancho) y profundidad variable (5-150 km de profundidad) entre la fosa Perú-Chile, al oeste, y la Cordillera de los Andes al este.

5.1 Catastro

Dado que la comuna de Villa Alemana, al igual que prácticamente todo Chile, se encuentra próxima a un borde convergente entre placas, ha sido afectada por sismos de manera recurrente. En la Tabla 5-1 se presenta una lista con algunos de los principales sismos que han afectado a la comuna.

Tabla 5-1 Sismos históricos importantes que tuvieron el potencial o que generaron daños en el área comunal de Villa Alemana

Fecha	Magnitud	Epicentro			Descripción	Referencia
		Coord. E	Coord. N	Localidad		
1570	8.3 Ms	-	-	La Ligua	La zona epicentral corresponde a la Ligua y afectó la zona entre Los Vilos y Navidad.	Lara y Rauld, 2003; CSN
1575/03/17	7.5 Ms	351205	6303223	Santiago	Destrucción parcial de Santiago, desplome de murallas y casas.	Lara y Rauld, 2003; CSN
1582/01/22	-	-	-	Santiago	Terremoto produce gran alarma y rasgaduras en los edificios de Santiago.	Lara y Rauld, 2003
1643/09/06	-	-	-	La Ligua	Fuerte temblor sacudió a Santiago. Se considera el precursor del sismo de 1647.	Urrutia y Lanza, 1993; Lara y Rauld, 2003
1647/05/13	7.0 Ms	-	-	Santiago	Ruina de la ciudad de Santiago, el área de destrucción se extendió al Maule, Choapa y Limarí, se sintió hasta el Cuzco, Buenos Aires y Valdivia, e estima que sobre 600 personas fallecieron producto del movimiento sísmico, que arrasó con casi la totalidad de las construcciones coloniales existentes en las ciudades afectadas. Se estima que fue uno de los cinco terremotos más fuertes que han afectado a la zona central.	Urrutia y Lanza, 1993; Taulis, 1938; CSN; Aránguiz, 2018.
1687/07/12	7.3 Ms	337926	6375103	San Felipe	Un fuerte terremoto de intensidad aproximada de VII. Su epicentro se ubica entre San Felipe y La Ligua, con latitud entre los 32° y 34°S. Daños en convento en San Felipe y daños en Santiago.	Lara y Rauld, 2003; CSN
1690/07/09	-	-	-	La Ligua	Gran temblor con foco en la Ligua, daños en algunos edificios de Santiago.	Lara y Rauld, 2003
1722/05/24	-	-	-	Entre Santiago y Valparaíso	Fuerte Temblor que aterrorizó a la población en Santiago y Valparaíso. En Santiago se maltrataron algunas casas y en Valparaíso, el temblor dejó en el suelo el "castillo" o fuerte, que servía de defensa al puerto.	Urrutia y Lanza, 1993
1730/07/08	8.7 Ms	254419	6340094	Valparaíso	Fuerte terremoto en la zona central. Afecto la población entre La Serena y Valdivia. Grandes daños en Illapel, Petorca, San Felipe. Til Til y Renca. En Valparaíso los mayores estragos fueron en el sector El Almendral. En Quillota y Santiago algunas iglesias quedaron en el suelo.	Urrutia y Lanza, 1993; Taulis 1938; CSN
1751/05/25	8.5 Ms	675682	5922175	Concepción	Tuvo una duración de 6 minutos aproximadamente y causó daños entre San Felipe y Valdivia. Los remezones no dejaron en Concepción "templo ni casa	Urrutia y Lanza, 1993; SHOA; CSN

					grande ni pequeña que no se arrojase, pues ni aún las personas podían mantenerse en pie". En algunas partes de la V región se desmoronaron varias iglesias y en Valparaíso nuevamente se destruyó el fuerte "el castillo".	
1769	-	-	-	Valparaíso	Temblor que causó daños en la Iglesia de San Francisco en Valparaíso. Afecto entre los 32° y 34°S.	Lara & Rauld, 2003
1822/11/19	8.4 Ms	254419	6340094	Valparaíso	Se sintió entre Illapel y el archipiélago de Chiloé. Dejó aprox. 200 muertos y gran parte de las edificaciones de las ciudades más afectadas en el suelo. Se contabilizaron 170 réplicas. En muchas partes el suelo se dividió. Severos daños en Santiago y Valparaíso fue una de las ciudades más afectadas, la ruina fue casi total.	Urrutia y Lanza, 1993; SHOA; CSN
1829/09/26	7.0 Ms	254419	6340094	Valparaíso	Se sintió un temblor bastante fuerte en Valparaíso, causando algún pánico en la población. Dejó algunos edificios en estado ruinoso, tanto en el sector del puerto como en El Almendral. En Limache también hubo daños en las casas con techos de tejas, salvándose solo los ranchos de madera. Se sintió en Santiago y en Casablanca.	Urrutia y Lanza, 1993.; CSN
1835/02/20	8.5 Ms	675682	5922175	Concepción	El movimiento se sintió desde Copiapó hasta Chiloé y desde el archipiélago Juan Fernández hasta Mendoza. El remezón fue tan fuerte que no permitía mantenerse en pie. Concepción quedó casi totalmente destruida. No hay descripción para Valparaíso.	Urrutia y Lanza, 1993; SHOA; CSN
1850/12/06	7.3 Ms	387082	6258241	Santiago	Fuerte sismo sacudió a Santiago y sus alrededores. Hubo dos muertos. El movimiento fue débil en Valparaíso, Casablanca y Curacaví. Se sintió suavemente en La Serena y hacia el sur hasta Talca.	Urrutia y Lanza, 1993; CSN
1851/04/02	7.5 Ms	274726	6310622	Casablanca	El terremoto se sintió desde Cobija a Talcahuano. Causó daños de consideración entre Valparaíso y Santiago. En Valparaíso el barro de El Almendral fue el que más daños sufrió. Alrededor de 200 casas particulares se derrumbaron, la mayoría de construcción antigua, aunque igual algunas edificaciones nuevas. En Casablanca hubo algunos muertos y gran cantidad de heridos a consecuencias de que la mayoría de las casas se derrumbaron.	Urrutia y Lanza, 1993; Taulis, 1938; CSN
1871/03/25	-	-	-	Entre Santiago y Valparaíso	Fuerte sismo se sintió en Valparaíso, Santiago, Rancagua, Curicó, Talca y Curepto. En Valparaíso hubo dos heridos, murallas de monasterio se abrieron en varias partes, y las cornisas y adobe se cayeron al suelo y 15 casas quedaron con daños de poca consideración.	Urrutia y Lanza, 1993

1873/07/07	-	618949	6373496	Valparaíso	Fuerte sismo remeció la zona central del País, produciendo los mayores daños en Petorca, La Ligua y alrededores. En Quillota hubo una víctima, más de cien casas con daños de bastante consideración y la mayoría de los techos quedaron hundidos o en el suelo. Hubo daños en la estación de ferrocarril y se destruyeron tapias y cercos. En Limache la mayoría de las casas quedaron con las paredes dañadas, algunas se derrumbaron y otras se desplomaron, el informe del gobernador señalaba que por lo menos cincuenta casas habían quedado en el suelo, la mayoría de los techos deteriorados, la escuela superior con las murallas derrumbadas, lo mismo que la iglesia parroquial; la maestranza quedó inservible. Se abrieron profundas grietas en la tierra de las que brotó agua.	Urrutia y Lanza, 1993; Lara y Rauld, 2003
1874/10/26	-	-	-	Valparaíso	Gran temblor con epicentro en Valparaíso que abarcó una considerable extensión de territorio.	Lara y Rauld, 2003
1880/08/15	7.7 Ms	293220	6499620	Illapel	Fue percibido entre Chañaral y Chillán, entre la Región de Atacama, y el norte de la Región del Biobío; también se pudo percibir en la ciudad argentina de Mendoza y en Antofagasta. Las ciudades más afectadas fueron Illapel y La Ligua, donde hubo deslizamientos de tierra en especial en Illapel y Petorca. Los temblores siguientes afectaron aún más las construcciones de las ciudades de todo el sector afectado. En total murieron 25 personas, 708 heridos y 3.847 damnificados. En Illapel, el 73% de las estructuras sufrieron grandes daños, mientras que un 69% en La Ligua.	Urrutia y Lanza, 1993; CSN
1896/03/14				Valparaíso	Daños en numerosos edificios de Valparaíso y de Santiago. En Valparaíso se cayeron murallas en mal estado y se agrietaron otras. Se sintió en Mendoza y Tucumán.	Lara y Rauld, 2003
1906/08/16	8.2 Mw	219700	6344714	Entre Limache y Valparaíso	Dos movimientos sísmicos fueron sentidos entre Tacna, por el norte y Ancud por el sur. De oriente a poniente se sintió desde Buenos Aires y Montevideo hasta la Isla de Juan Fernández. La mayor intensidad de registro en la provincia de Valparaíso y daños de menos consideración hasta Concepción. En Limache y San Francisco de Limache todo fue destruido. Allí quedaron sepultados por los edificios una monja y 10 huérfanos el orfanato de la Providencia. Asimismo, se derrumbó el cuartel del regimiento de caballería Lanceros, el hospital, el hotel, la fábrica nacional de cerveza, la escuela superior y la estación de ferrocarril. En Quilpué los daños fueron del orden de seiscientos pesos, murieron 20 personas aplastadas por las murallas.	Urrutia y Lanza, 1993; SHOA; CSN

1909/04/28	-	-	-	Santiago	Violento y largo temblor en Santiago, se agrietaron algunas murallas y hubo algunos desmoronamientos de casas viejas. Se sintió con la misma intensidad en Valparaíso, Viña del Mar, Limache, Quillota, Llay Llay y hasta Talca hacia el sur.	Urrutia y Lanza, 1993
1910/08/12	-	-	-		Daños en Villa Alemana.	Donoso (1939) en Petit-Breuilh (2004)
1920/08/26	-	-	-	Valle del Aconcagua	Fuerte temblor sacudió a la zona comprendida entre Coquimbo y Malleco. Se sintió en Mendoza y Buenos Aires. En Valparaíso hubo algunos deterioros en los edificios.	Urrutia y Lanza, 1993
1927/04/14	-	-	-	Santiago	Un fuerte sismo con foco en Santiago de intensidad VIII en escala Mercalli, se sintió entre Antofagasta y Valdivia, con mayor intensidad en Santiago, Valparaíso y Los Andes. El servicio telefónico quedó interrumpido en Llay Llay, Melipilla, Rancagua, Talagante, La Calera, San Felipe y Limache. Quilpué se quedó sin alumbrado público y sin servicio ferroviario. El epicentro fue entre los volcanes Tupungato y Aconcagua.	Urrutia y Lanza, 1993
1928/12/01	8.3 Ms	226201	6122843	Al este de Talca	Terremoto sacudió a zona central, principalmente Talca y Constitución. Dejó 300 muertos y centenares de heridos. El Servicio Sismológico publicó que el sismo se sintió desde Antofagasta hasta Puerto Montt. El terremoto ocasionó algunas desnivelaciones en la cordillera. No hubo maremoto.	Urrutia y Lanza, 1993. SHOA; CSN
1930/08/29	-	-	-	Quillota	Sismo bastante fuerte produjo daños de consideración en Quillota. El teatro Municipal, la parroquia, hospital y varias propiedades quedaron en estado ruinoso. En Valparaíso y las zonas cercanas, solo se pasó un gran susto.	Urrutia y Lanza, 1993
1930/10/17	-	-	-	Quillota	Sismo percibido entre Antofagasta y Angol, adquirió características de semiterremoto entre Quillota y Llay Llay. En Quillota, la municipalidad quedó con los muros agrietados; el teatro Municipal se clausuró, ya había quedado ruinoso con el temblor de agosto; en el cementerio se deterioraron las bóvedas; en el hospital varias salas debieron ser demolidas; la iglesia parroquial, el templo de San Francisco, el templo de La Merced sufrieron daños en los muros y altares; la escuela superior de hombres, el cuartel de Carabineros, el local de la Legión Militar quedaron con las murallas deterioradas o agrietadas. En Limache, San Pedro, Quilpué, San Felipe, Los Andes, La Ligua, Cabildo y Petorca hubo algunos agrietamientos en las murallas de varios edificios.	Urrutia y Lanza, 1993

1943/04/06	8.2 Mw	212794	6594257	Al oeste de Ovalle	Fuerte sismo se sintió desde Coquimbo hasta Talca. Sismo intenso con epicentro costa afuera de Ovalle. El movimiento telúrico destruyó Combarbalá, Ovalle, Salamanca e Illapel. Hubo deslizamientos de tierra hacia la costa. El terremoto causó 25 muertos, 5 de ellos por el colapso de un tanque de relaves cerca de Ovalle, también hubo 49 heridos y más de 23.000 damnificados. Profundidad del sismo a 35 km.	Urrutia y Lanza, 1993. ONEMI; USGS; CSN; Madariaga 1984; H. Berninghausen 1962
1945/09/13	-	360266	6319994	Al este de Santiago	Sismo con características de semiterremoto, con grado 7 de intensidad, afectó principalmente a Santiago y se sintió desde Ovalle a Puerto Montt. Hubo 4 muertos y 10 heridos.	Urrutia y Lanza, 1993
1960/05/22	9.5 Mw	542989	5627616	Al oeste de Valdivia	Evento sísmico más grande registrado en la historia de la sismología moderna, al que se le ha estimado una magnitud de momento (Mw) de 9.5, largo de ruptura estimado en cerca de 1000 kilómetros, un deslizamiento entre las dos placas estimado en 30 metros (Madariaga, 1998) y reveló que los valores extremos de cambio en la topografía fueron de un alzamiento de 6 m en la Isla Guamblin y de 2 m de subsidencia en la ciudad de Valdivia. Cambio la geografía en varios sectores, parte del territorio se hundió en el mar, aparecieron nuevas islas y otras fueron arrasadas por el maremoto. En pocos minutos se perdieron decenas de vidas, arrasaron viviendas, se interrumpieron las comunicaciones, se destruyeron industrias y se inutilizaron los caminos y vías férreas.	Urrutia y Lanza, 1993. CSN
1965/03/28	7.4 Ms	302529	6411290	La Ligua	Sismo generó daños en Limache, Olmué, Quilpué, Casablanca, Villa Alemana, Quillota, Puchuncaví, Nogales, Hijuelas, La Calera, La Cruz, Ocoa, Quintero, Las Ventanas, Algarrobo y el Quisco, afectando a las viviendas y obligando a la población a vivir en carpas los primeros días. A 10 km de La Calera el tranque de relaves El Cobre del mineral El Soldado, ubicado a 300 metros de altura, se rompió, bajando como aluvión con residuos minerales, ácido, fango y aguas turbulentas, arrasando con el poblado, casi todos sus habitantes, animales y árboles. Hubo 87 muertos, centenares de heridos y doscientos desaparecidos bajo el aluvión del tranque de relave de la mina El Soldado. En Villa Alemana, así como numerosas otras comunas de la Región de Valparaíso, hubo daños de diversa consideración en las viviendas, lo que obligó a la población a vivir en carpas los primeros días, mientras esperaban soluciones definitivas.	Urrutia y Lanza, 1993. CSN
1971/07/08	7.5 Ms	292679	6400774	Sur de La Ligua	Afectó las provincias de Coquimbo, Aconcagua, Valparaíso y Santiago. Viviendas de adobe dañadas. Caminos y puentes destruidos. Hubo	Urrutia y Lanza, 1993

					<p>cuantiosos daños en las 4 comunas existentes esa época. Quilpué, Villa Alemana, Peñablanca, Limache, Olmué quedaron con miles de viviendas destruidas, tanto las antiguas de adobes, que aún subsistían, como muchas de las modernas, funcionales, de dos pisos. En Quilpué quedaron en el suelo los edificios de la tesorería, de correos y telégrafos y de la municipalidad. En Villa Alemana el portal Pompeya y el inmueble de la Cámara de Comercio Minorista se destruyeron.</p>	
1985/03/03	8.0 Mw	234443	6318484	Al oeste de Valparaíso	<p>El movimiento se sintió desde la III y IX región. Con este terremoto hubo destrucción de viviendas que causaron víctimas fatales, destrucción de pavimentos, caída de puentes. 177 muertos, 2575 heridos, 979792 damnificados, 75624 viviendas dañadas, 142489 viviendas destruidas, deslizamientos de tierra, ruptura de pavimentos, caída de puentes, interrupción de tráfico en la carretera Panamericana, del agua potable, la luz eléctrica y alcantarillado en ciudades y poblados, destrucción de hospitales, escuelas, edificios públicos, obras de arte, con mayor incidencia en San Antonio, Melipilla, Rengo y Alhué. El puerto de San Antonio fue el más golpeado, registrando espectaculares derrumbes de sus inmensas grúas de carga. Más de 1.000 millones de dólares en daños fue el saldo del cataclismo.</p>	Urrutia y Lanza, 1993; CSN
2001/09/10					<p>Fuerte temblor sacudió a la región, causó alarma en la población por el fuerte ruido que acompañó a un leve movimiento ondulatorio. Informes extraoficiales señalan que el sismo tuvo grado 4 a 5 en Quillota y La Calera. El sismo fue perceptible en toda la cuarta, quinta y Región Metropolitana. No se produjeron daños materiales, ni resultaron personas lesionadas.</p>	Diario Impacto
2010/02/27	8.8 Mw	658136	5982469	62 km al norte de Concepción	<p>Un sismo de magnitud Mw 6.9 con epicentro en -34.301, -72.130, a una profundidad de 33.1 km. Afecto a varias regiones del país, desde la región de Valparaíso hasta la Araucanía. Fallecieron 525 personas, cerca de 500 mil viviendas sufrieron graves daños y hubo alrededor de 2 millones de damnificados. El sismo se sintió en toda la V región, sin embargo, afectó principalmente a las provincias costeras (Valparaíso, Marga Marga y San Antonio). En el puerto de San Antonio el impacto del tsunami generó graves daños en la infraestructura portuaria y las viviendas cercanas a la costa.</p>	CSN; Subsecretaría del Interior de Chile; La Tercera
2015/09/16	8.4 Mw	240038	6496535	37 km al noroeste de Los Vilos	<p>Fue percibido en gran parte del país, y también en algunas zonas de Argentina, Uruguay y Brasil. La profundidad del sismo fue de 11,1 km. Fallecieron 15 personas, dejó 5 heridos, 27722 personas damnificadas, 2442</p>	CSN; PTWC; USGS; ONEMI.

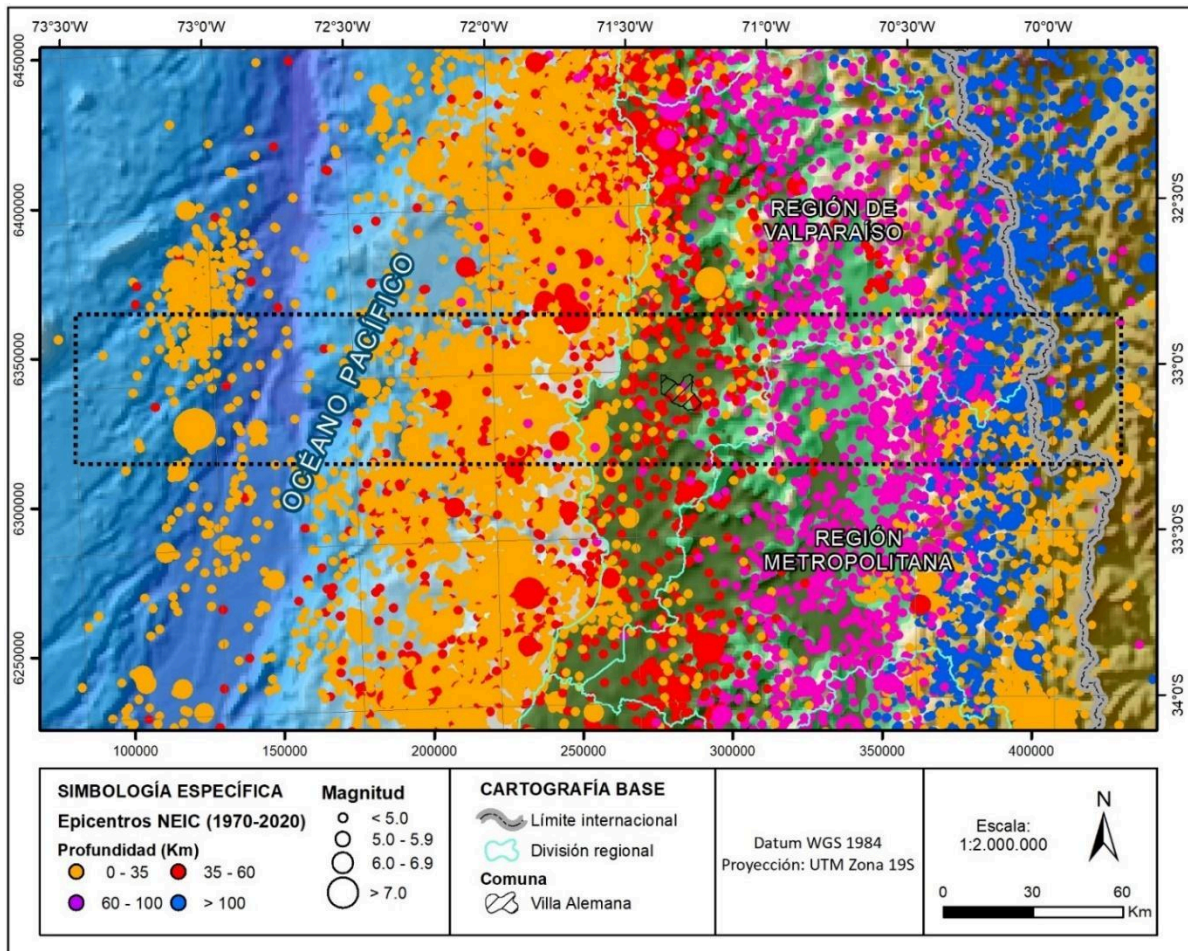
					viviendas destruidas y 2712 con daños severos. Gobierno decretó zona de catástrofe a las provincias de Choapa, Limarí y Coquimbo. Recién a los dos días del terremoto se repuso el 90% de los servicios básicos como electricidad y agua potable y el 100% de la conectividad.	
--	--	--	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Diagnóstico

En la Figura 5-1 se presentan los sismos incluidos en el catastro NEIC, que comprende la sismicidad asociada al período 1970-2020. En ella se pueden observar cuatro franjas subparalelas de orientación aproximada norte-sur, distinguibles a lo largo una franja oeste-este, de 50 x 350 km², que incluye el área de estudio (Figura 5-2).

Figura 5-1 Mapa regional del contexto del área de estudio con los epicentros de la sismicidad registrada de magnitud superior a 2,5, según el Catálogo NEIC entre 1970 y 2020



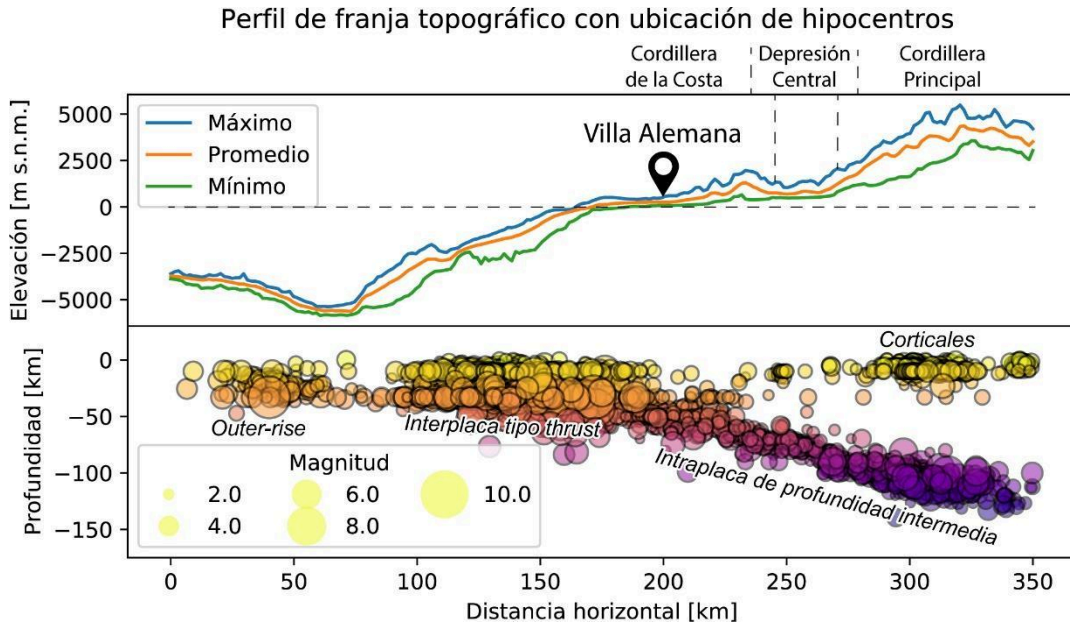
Fuente: Elaboración propia a partir del Catálogo NEIC.

En el océano, al extremo oeste de la figura, se emplazan los sismos con fuente *outer-rise*. En la costa, donde hay una mayor concentración de puntos, se ubican los sismos con fuente interplaca tipo *thrust*. Gran parte de estos sismos tienen su hipocentro a menos de 35 km de profundidad. Son estos terremotos los que se generan en el contacto de las placas de Nazca y Sudamericana, que se extiende desde la fosa hasta unos 35-51 km de profundidad (Tichelaar & Ruff, 1993; Hayes, et al., 2012), y es en esta región donde tienen lugar la mayoría de los terremotos que han ocurrido en la zona central del país. Entre este tipo de terremotos destacan, para esta zona, 1575, 1730, 1822, 1906 y 1985, cuyos largos de ruptura se ilustran de manera esquemática en la Figura 2-7.

Continente adentro, donde se desarrolla la Depresión Central y la Cordillera Principal, la fuente sísmica que denomina es interplaca de profundidad intermedia. Estos ocurren a profundidades hipocentrales que aumentan de oeste a este desde 60 a más de 100 km. Dentro de esta categoría destaca el Terremoto de La Ligua de 1965, que tuvo una magnitud de 7.4 Mw y cuyo hipocentro se localizó a 68 km de profundidad.

En la zona cordillerana, de forma mucho más dispersa y generalmente de baja magnitud, se generan sismos someros de fuente cortical, que se asocia con la deformación actual del macizo montañoso. Un ejemplo de este tipo de sismos es el Terremoto de las Melosas del 4 de septiembre de 1958, que consistió en una seguidilla de tres sismos con magnitudes cercanas a 7.0 que sacudieron el área del Cajón del Maipo en la Región Metropolitana.

Figura 5-2 Perfil de franja topográfica sobre localización de hipocentros sísmicos a lo largo de una franja de 50 km de ancho por 350 km de largo demarcada con rectángulo punteado en la Figura 5-1 (Notar diferencia en escala vertical de ambos gráficos)



Antes de 1960, el registro de los sismos no poseía la precisión de los sismómetros modernos, por lo tanto, no existe información exacta para determinar las características de los terremotos previos a esa fecha. Así, las rupturas de los terremotos anteriores son estimaciones, a partir de datos históricos y la intensidad de los daños provocados, según la metodología propuesta por Kausel & Ramírez (1992). En la Tabla 5-2, se muestran seis sismos históricos que se generaron en lugares cercanos y provocaron daños importantes en una extensión que incluye el área de estudio. De ellos, todos, excepto el del año 1965, corresponden a los denominados terremotos de subducción o interplaca tipo *thrust* por la ubicación de su fuente sísmica.

Tabla 5-2 Datos de terremotos históricos con magnitud superior a 7.0 cuya zona de ruptura coincide con la comuna de Villa Alemana

Año	Mes	Día	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud Aprox.
1575	03	17	-33,40	-70.06	-	7.5
1730	07	07	-33.05	-71.63	-	8.9
1822	11	19	-33.05	-71.60	-	8.4
1906	08	16	-33.00	-72.00-	25	8.4
1965	03	28	-32.42	-71.17	68	7.4
1985	03	03	-32.24	-71.85	33	7.7

Fuente: Elaboración propia en base a Kausel & Ramírez (1992).

Las fuentes sismogénicas descritas generan terremotos que afectan al territorio a una escala regional, en particular, los sismos interplaca que corresponden a los que ocurren con mayor frecuencia y magnitud, por lo que la norma sísmica ha sido desarrollada a partir de este tipo de sismos. Sin embargo, respecto a los sismos intraplaca no se tiene suficiente información debido a que son menos frecuentes. Dado el carácter regional de estos tipos de sismos, no es posible realizar una zonificación de detalle dentro de la comuna.

Algunos kilómetros al sur de la comuna se encuentra la Falla Marga-Marga, de orientación aproximada N50W, que se considera potencialmente activa y reúne una serie de estructuras paralelas. Algunos autores han descrito que en los terremotos de los años 1906 y 1985 se registraron daños más severos en zonas más próximas a ellas, sin que se conozca la causa de esta situación (Sabaj, 2008), aunque es posible que estas descripciones respondan más bien a observaciones en Viña del Mar, que tiene condiciones geológicas muy diferentes a Villa Alemana y, por lo tanto, estas observaciones podrían no ser representativas de la comuna.

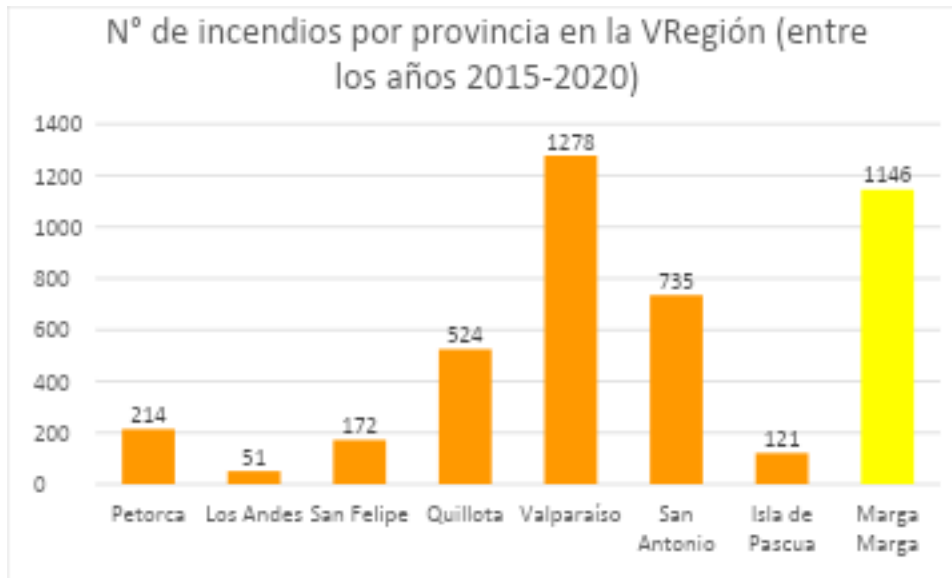
Por otra parte, existe normativa específica relativa al peligro sísmico que cuenta con herramientas más eficientes que los instrumentos de planificación territorial, específicamente las normas NCh 433 y NCh 2369.

Debido a las características de las diferentes fuentes sísmicas, la comuna está expuesta a estos dos tipos sismos principales: (1) interplaca tipo *thrust* y (2) intraplaca de profundidad intermedia. La gran mayoría de estos sismos son detectables por medio de la instrumentación fija instalada, tanto por la Red Sismológica Nacional, así como por otras redes sismológicas internacionales. Sin embargo, el alcance de este estudio a escala más detallada no permite que se pueda zonificar esta amenaza a la escala urbana. Por lo anterior, no se construirán mapas de susceptibilidad o zonificación para el peligro sísmico.

6 Incendios forestales

La Región de Valparaíso es conocida a nivel nacional por sus recurrentes incendios cada año, pero si analizamos la frecuencia de sus incendios por provincias, se puede apreciar que existen diferencias considerables entre una provincia y otra, el foco de los incendios no es homogéneo en la Región. La mayor tasa de incendios entre los años 2015 y 2020 ocurrió principalmente en las provincias de Valparaíso con 1.278 focos de incendios y la Provincia de Marga Marga con 1.146 focos de incendios (Figura 6-1), donde se encuentra la comuna de Villa Alemana.

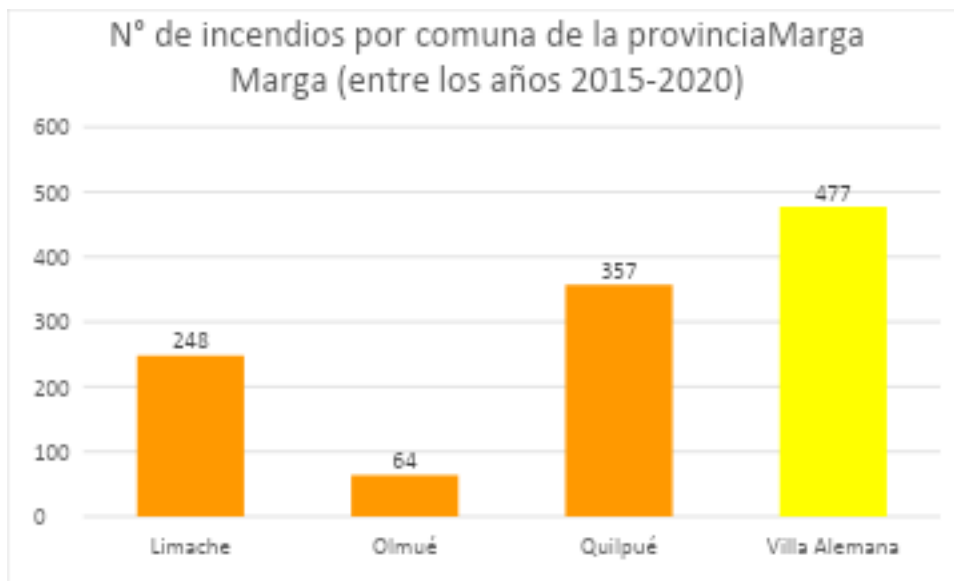
Figura 6-1 Número de incendios, provincias de la R. de Valparaíso (2015-2020)



Fuente: Elaboración propia en base a CONAF, 2021

Al analizar la tendencia de los incendios forestales para el período 2015-2020 se puede observar que Villa Alemana es la comuna con mayor recurrencia de incendios en la provincia de Marga-Marga (Figura 6-2). También, destaca la superficie quemada, sobresaliendo el período 2016-2017 con 1858,95 hectáreas. Los datos para el período 2022-2023 que arroja CONAF, para las comunas de la provincia entre ellas Villa Alemana muestra que la tendencia se mantiene en relación a la importante superficie quemada ya que esta alcanza a 736 hectáreas solo superada por su comuna vecina “Quilpué” con 1681 hectáreas (Tabla 6-1).

Figura 6-2 Número de incendios por comunas, provincia del Marga-Marga, 2015-2020.



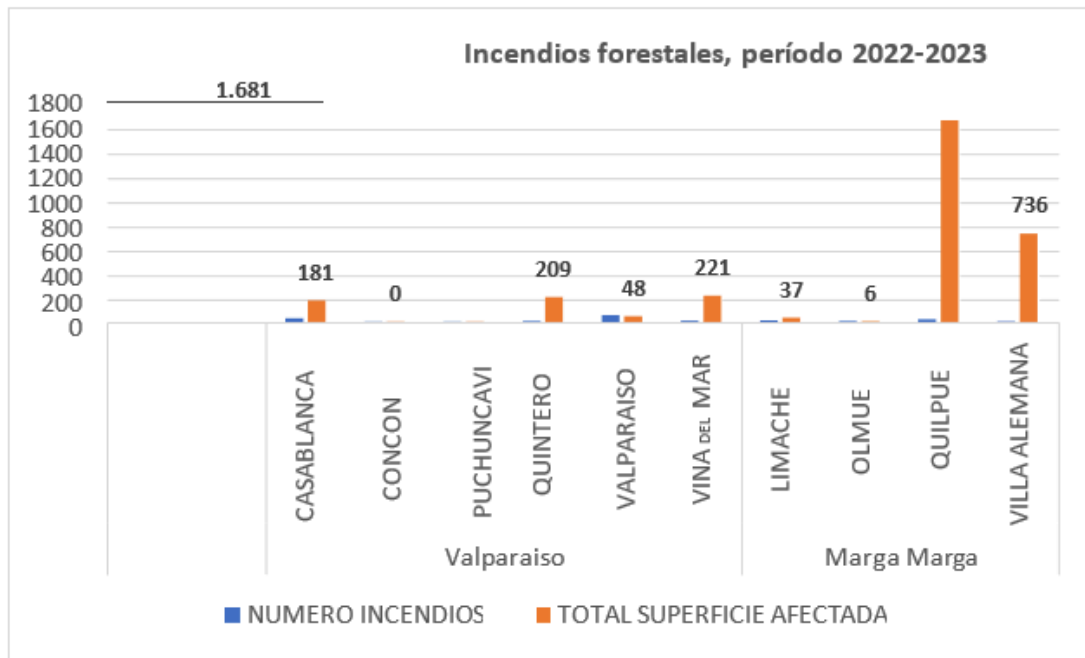
Fuente: Elaboración propia en base a CONAF, 2021

Tabla 6-1 Superficie afectada por incendios forestales, período 2015-2020

Comuna	Superficie Comunal (Ha)	Año	Superficie Quemada (Ha)	Porcentaje quemada en relación con la superficie comunal (%)
Villa Alemana	9.549	(2019-2020)	3.04	0.032
		(2018-2019)	128.39	1.34
		(2017-2018)	551.55	5.78
		(2016-2017)	1858.95	19.47
		(2015-2016)	256.15	2.68

Fuente: Elaboración propia en base a estadísticas de CONAF

Figura 6-3 Incendios forestales período 2022-2023

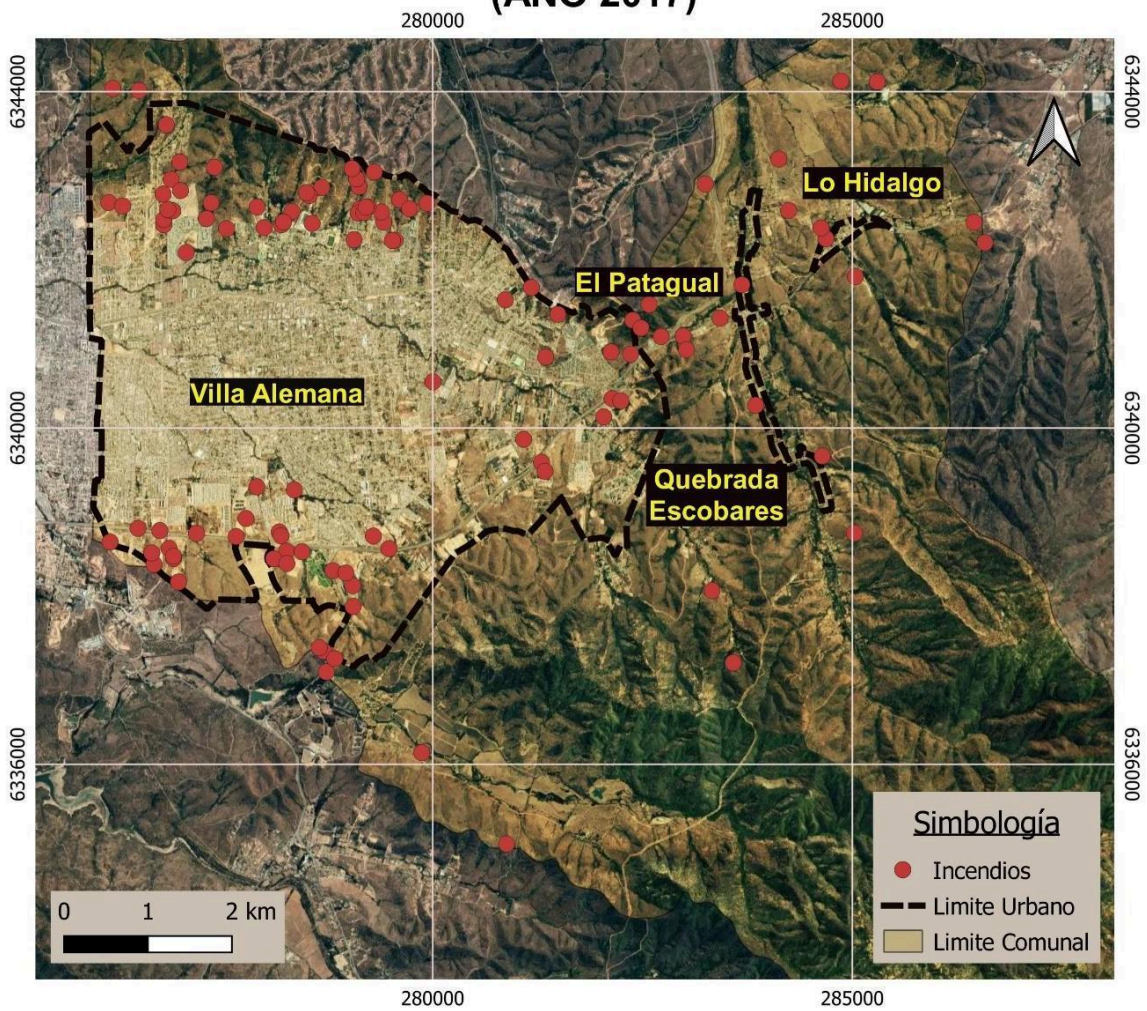


Fuente: Elaboración propia en base a CONAF, 2024

Los focos de incendios de la comuna de Villa Alemana se distribuyen con un patrón similar como se observan en la siguiente figura. Estos se desarrollan en el área de interfaz urbano-rural en el entorno del límite urbano norte y sur.

Figura 6-4 Focos de incendios, comuna de Villa Alemana

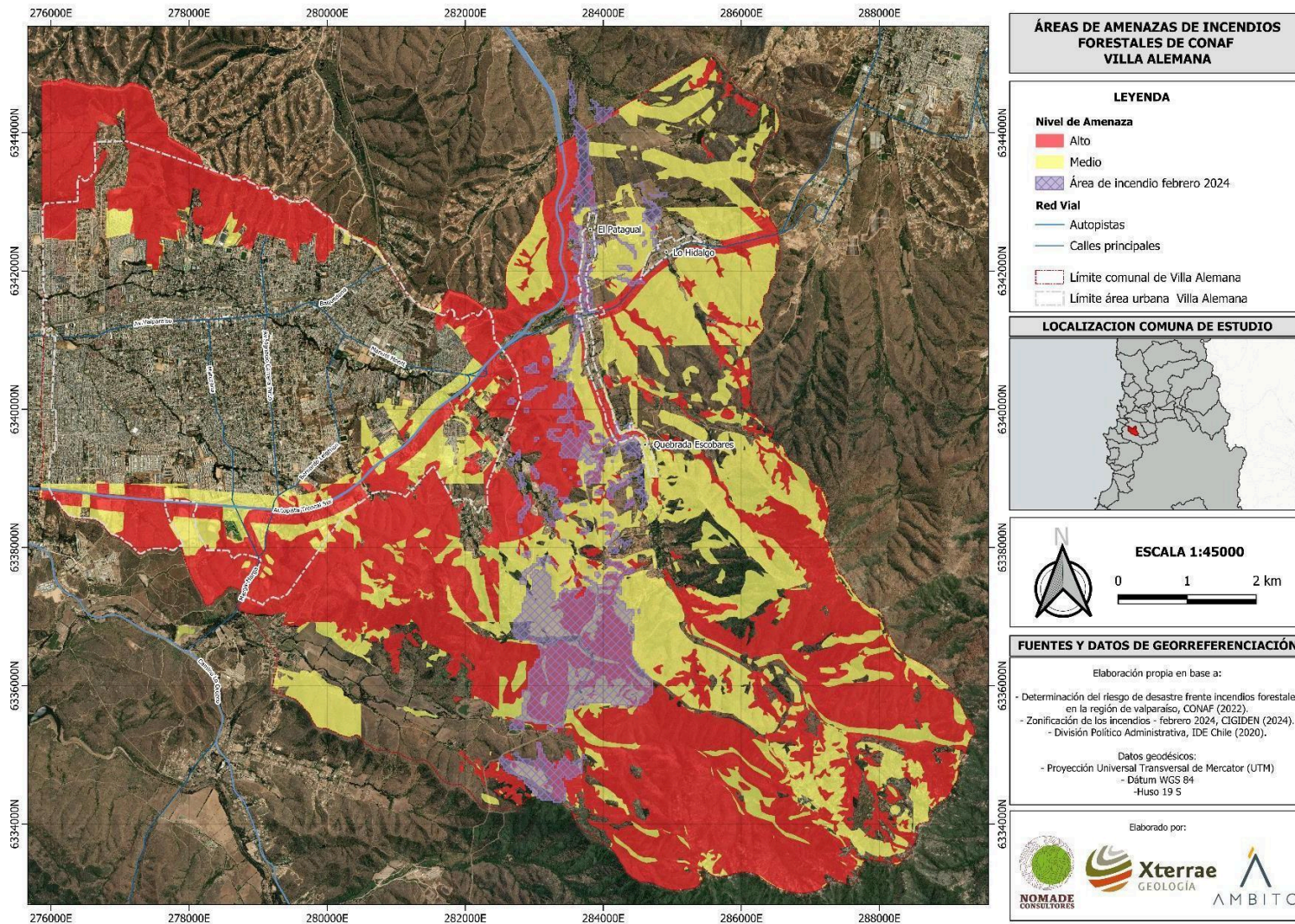
FOCOS DE INCENDIOS EN LA COMUNA DE VILLA ALEMANA (AÑO 2017)



Fuente: Elaboración propia en base información DAM

El mapa de amenaza por incendio forestal de CONAF muestra las áreas de amenazas alta y media para la comuna de Villa Alemana, donde es posible observar que coincide con los lugares donde se concentran los focos de incendios de la comuna.

Figura 6-5 Áreas de amenaza de incendio forestal y evento de incendio de febrero de 2024, comuna de Villa Alemana



Existe una característica en común de los incendios forestales que se desarrollan en los lomajes y cerros del norte y sur donde se encuentran quebradas. Si se observa la figura anterior también se puede apreciar que la vegetación que bordea el límite urbano corresponde principalmente a matorrales y pastizales. Otro material combustible que influye en los incendios forestales son los microbasurales y botaderos de enseres domésticos y fogatas en el sector.

De acuerdo con la información municipal disponible se encuentran un total de 20 microbasurales en el área urbana de Villa de Alemana (año 2021), de los cuales un 50% presentan condición alta o media para desarrollar un incendio forestal de alcance urbano por presencia de material vegetal combustible en su entorno.

La tendencia de crecimiento de la ciudad hacia sus márgenes a aumentado el número de viviendas y población que se encuentra en el área de interfaz y que circula próxima a la masa vegetal combustible.

En el caso de las Localidades de Quebrada Escobares, Patagual y Lo Hidalgo fueron fuertemente afectadas en el último incendio ocurrido en febrero del 2024. Del total de viviendas (118) fueron destruidas 37, 8 viviendas muy afectadas y 14 viviendas medianamente. Lo que mostró la alta exposición y vulnerabilidad de estas localidades, y sus dificultades de conectividad en caso de evacuación.

7 Recomendaciones y conclusiones

Una vez identificados los peligros, definidos los grados de susceptibilidad y el alcance territorial de ellos, es necesario incorporar estos resultados en los instrumentos de planificación. Esto debe realizarse a través de la aplicación del artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) y/o tomando otras medidas de planificación acordes a las atribuciones que otorga la LGUC y la OGUC a los Instrumentos de Planificación Territorial, como, por ejemplo, la diferenciación de usos de suelo y regulación de la forma e intensidad de su ocupación.

7.1 Zonificación de la susceptibilidad

Para definir los criterios que permitan incorporar los peligros naturales dentro de la zonificación urbana, es necesario tener claros los criterios utilizados en la definición de las diferentes categorías de susceptibilidad y la zonificación resultante. En este sentido, en la Tabla 6-1 se resumen los factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y los elementos metodológicos con los que se asignó la distribución espacial de la susceptibilidad, los que son descritos en detalle en los capítulos 3, 4 y 5

Tabla 7-1 Resumen de factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y criterios de zonificación

Peligro	Factores condicionantes	Factores desencadenantes	Elementos de zonificación
Inundaciones por desborde de cauce	<ul style="list-style-type: none"> - Características morfológicas de la red de drenaje - Obras e intervención en canales de drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> - Lluvias intensas 	<ul style="list-style-type: none"> - Catastro de eventos de inundación - Unidades geológicas - Red de drenaje - Modelos hidráulicos - Observaciones de terreno - Características de los canales, si es abierto o ubicación de la tubería en el caso si es cerrado
Inundación por anegamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Características morfométricas de la zona 	<ul style="list-style-type: none"> - Lluvias intensas 	<ul style="list-style-type: none"> - Catastro de eventos de inundación - Reconocimiento de zonas deprimidas a partir del DTM
Flujos de barro y/o detritos	<ul style="list-style-type: none"> - Morfología de quebradas y zonas de descarga - Características de cuenca aportante 	<ul style="list-style-type: none"> - Lluvias intensas 	<ul style="list-style-type: none"> - Observaciones de terreno - Catastro - Características morfológicas de la red de drenaje (pendiente, forma de los cauces)
Procesos de ladera	<ul style="list-style-type: none"> - Pendientes - Material que compone la ladera (geología) 	<ul style="list-style-type: none"> - Sismos - Lluvias intensas - Viento 	<ul style="list-style-type: none"> - Pendiente del terreno
Sismicidad	<ul style="list-style-type: none"> - Existencia de fallas activas - Características de los depósitos (efecto de sitio) 	<ul style="list-style-type: none"> - Sismos 	<ul style="list-style-type: none"> - No se zonificó a escala de comuna

Es muy relevante comprender que la categorización de susceptibilidad se relaciona con la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno dado en un área determinada, pero corresponde a una categorización cualitativa, de carácter relativo, y no cuantitativa. Pese a que el concepto de susceptibilidad no contempla la cuantificación de períodos de retorno, ni probabilidades de ocurrencia, sí estipula niveles que indican de manera relativa la frecuencia con que ocurre un cierto fenómeno. En este sentido, las zonas de ‘muy alta’ susceptibilidad son aquellas que muy probablemente serán afectadas en caso de ocurrir cualquier evento del peligro analizado, las zonas de ‘alta’ susceptibilidad serán aquellas afectadas por eventos extremos (en muchos casos son los más grandes de los que se tengan registros históricos) y las de ‘moderada’ susceptibilidad se asocian a eventos excepcionales, de los que muchas veces no existen registros históricos, pero si otro tipo de evidencias, como evidencias geológicas o morfológicas. Por otra parte, mientras la magnitud de un evento sea más intensa, se producirán daños mayores, y al mismo tiempo, los daños serán más importantes en la medida que mayor sea la susceptibilidad del territorio, de la forma que se ejemplifica en la Figura 6-1 para el caso de las inundaciones por desborde de cauce. En consecuencia, se recomienda que, mientras mayor sea la susceptibilidad de un área específica, mayores sean las restricciones y/o condicionantes para su utilización.

Figura 7-1 Esquema para ejemplificar del daño provocado por eventos de inundación por desborde de cauces con diferente magnitud en zonas que presentan distinto grado de susceptibilidad



Fuente: Elaboración propia.

7.2 Definición de las áreas de riesgo

Para los peligros que es posible zonificar a escala del Plan Regulador Comunal de Villa Alemana, desde la perspectiva de la relación entre la magnitud de un evento, su recurrencia y el daño generado, y con el fin de homologar las categorías de susceptibilidad al lenguaje de la OGUC, se propone aplicar el concepto de área de riesgo establecido en el artículo 2.1.17 a las zonas de ‘muy alta’ y ‘alta’ susceptibilidad de cada uno de los peligros, pero no a las zonas de susceptibilidad ‘moderada’ (Tabla 6-2). Pese a esto, no se debe considerar que las zonas de susceptibilidad moderada no puedan ser afectadas por los peligros analizados.

Estudio Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana

En cuanto a la sismicidad, aunque se le ha asignado una susceptibilidad 'alta' de manera homogénea, las normas chilenas NCh 433 ("Diseño sísmico de edificios") y la NCh 2369 ("Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales") definen las exigencias de diseño que deben cumplir diferentes tipos de edificaciones debido al peligro sísmico, con herramientas más eficientes que las que ofrece la OGUC. Por lo tanto, no se ha aplicado la definición de área de riesgo para este peligro.

Tabla 7-2 Criterios de definición de las áreas de riesgo en el área de estudio (escala 1:5.000) según el artículo 2.1.17 de la OGUC para cada peligro estudiado

PELIGRO GEOLÓGICO ESTUDIADO EN ESTE TRABAJO	SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN	“Áreas de riesgo” según el artículo 2.1.17 de la OGUC
Inundación por desborde de cauces	MUY ALTA	Cauces activos de canales abiertos.	X
	ALTA	En el caso de los canales abiertos, corresponde a la parte de las terrazas adyacentes a los cauces activos donde no hay modelos hidráulicos o donde el modelo hidráulico muestra que existe inundación. En el caso de los canales cerrados corresponde a las zonas onde podría estar ubicada la tubería por donde escurre el cauce.	X
	MODERADA	En el caso de los canales abiertos, corresponde a la parte de las terrazas adyacentes a los cauces activos donde el modelo hidráulico muestra no que existe inundación. En el caso de los canales cerrados, son las zonas por donde teóricamente escurriría superficialmente el agua en el caso que una tubería se encuentre obstruida.	
Inundación por anegamiento	ALTA	Zonas con eventos catastrados de anegamientos en el pasado, así como sumideros detectados en el ráster de zonas deprimidas que coinciden con las áreas de anegamientos según el catastro	X
	MODERADA	Zonas de deprimidas de sumideros	X
Flujo de barro y/o detritos	ALTA	Cauces de quebradas con depósitos aluviales (Ha) y aluviales y coluviales (Hac) actuales obtenidos de la geología a escala 1:5.000 ajustadas a partir de la ortofoto y criterio del experto a cargo.	X
	MODERADA	Abanicos y planicies aluviales extraídos del mapa geológico con ajustes a partir imágenes satelitales y criterio del experto.	
Procesos de ladera	MUY ALTA	Zonas con pendientes superiores a 35°, dado que se consideran las potencialmente más propensas a generar este tipo de fenómenos.	X
	ALTA	Laderas con pendientes entre 25° - 35° y zonas de alcance determinadas con modelación en GPP	X
	MODERADA	Laderas con pendientes entre 15° - 25°.	

Sismicidad	ALTA	De acuerdo con el nivel de conocimiento actual, el territorio de la comuna se encuentra expuesto de manera homogénea a este peligro.	
-------------------	------	--	--

7.3 Conclusiones y recomendaciones específicas

La comuna de Villa Alemana, por el hecho de estar ubicada la Cordillera de la Costa, se encuentra expuesta a la ocurrencia de muchos peligros en gran parte de su territorio. Por esta razón, la expansión del territorio urbano debe ocurrir de manera controlada, para evitar que estos peligros afecten a la población.

En algunos casos, los peligros que pueden afectar a las áreas urbanas se han mitigado mediante obras, con especial énfasis en las inundaciones por desborde de cauces. Se hace notar que para que estas obras funcionen adecuadamente, es necesario que cuenten con un plan de mantención periódico. Este estudio no hace una verificación al respecto.

En cuanto al análisis de los peligros propiamente tal, el escenario de cambio climático puede generar incertidumbre respecto de algunos factores que los condicionan, como la cantidad de precipitaciones y el estado de conservación de la vegetación. Este estudio no ha analizado el efecto del cambio climático sobre las diferentes amenazas, sin embargo, como la zonificación se realiza mediante la susceptibilidad, el resultado de este estudio se puede considerar como una aproximación a los efectos esperados por el cambio climático.

7.3.1 Inundaciones

En el área urbana de la comuna de Villa Alemana, casi la totalidad de los cauces han sido intervenidos, donde destacan los esteros Quilpué, de mayor importancia en la comuna pues la atraviesa completamente, Aranda, Moscoso, Valencia, Unión Troncales, Lo Godoy, Huanhualí, Palmilla y Pejerrey y algunas quebradas importantes como Agua Fría, Honda y El Durazno.

La probabilidad de inundación por desborde de cauce está determinada no solo por las precipitaciones, sino que también por las obras presentes y las modificaciones en los trazados naturales en cada uno de ellos, así como la adecuada conservación de estas obras. A pesar de que estas obras deberían reducir la generación de inundaciones, no se contó con un registro de sus trazados y ubicación precisa, lo que provoca incertidumbre de las zonas a ser inundadas.

Estos cauces, al ser intervenidos y entubados en algunos sectores, generalmente presentan problemas de inundación con un alcance muy local. Sin embargo, hay algunas excepciones en los esteros Palmilla, Pejerrey y Hunhualí que afectan zonas de mayor extensión.

Una de las mayores dificultades que se tuvo para la elaboración de este estudio es que no se cuenta con información detallada de las intervenciones que se han realizado en cauces de la comuna. Por ejemplo, en el caso de los tramos entubados sólo fue posible identificar los puntos de entrada y salida, pero se desconoce el trazado y su estado de conservación, lo que condiciona la calidad del resultado de este estudio. Algo similar ocurre en el caso de los puentes y pasarelas, que pueden afectar localmente el escurrimiento.

Por esta razón, se recomienda hacer un estudio específico destinado a generar una cartografía detallada de los cauces de la comuna, donde se identifiquen y describan, entre otros, todos los puentes, tramos entubados y obras de mitigación que existen en cada uno de los cauces de la comuna. Esta información es un insumo fundamental para poder analizar con la profundidad que amerita el sistema de drenaje de Villa Alemana.

Con respecto a los modelos, los caudales se estimaron según lo recomendado en el Manual de Carreteras, Volumen 3 (2018), para cuencas pequeñas, menores a los 25 km², mediante el uso del Método Racional que permite calcular el caudal máximo para un determinado período de retorno, que en este caso corresponde a T = 100 años. Cabe destacar que las curvas IDF, usadas para estimar la intensidad de T=100 años, corresponden a las del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar (DOH, 2001) para la situación futura, basándose además en este Plan para la definición de los coeficientes de escorrentía y las áreas de las cuencas aportantes.

Respecto a la modelación hidráulica, se modelaron en HEC-RAS las zonas priorizadas en los esteros Pejerreyes, Quilpué, Palmilla y Huanhualí, observándose lo siguiente para un periodo de retorno T = 100 años:

- Estero Pejerreyes: existen desbordes en zonas pobladas de la ciudad en el modelo 1 (desbordes menores), modelo 3 (en la zona del puente y su efecto aguas arriba) y modelo 4 (totalmente). En la zona del modelo 2 el cauce se encuentra contenido.
- Estero Quilpué: el cauce se encuentra contenido en la zona modelada, y sólo presenta un desborde menor al final del tramo modelado, sin afectar zonas construidas.
- Estero Palmilla: existen desbordes en zonas pobladas de la ciudad en la zona modelada.
- Estero Huanhualí: existen pequeños desbordes en zonas pobladas de la ciudad en el modelo 1 y modelo 3, abarcándose un área más extensa en el área del modelo 2, donde destaca la influencia de un cauce aportante y el efecto de los puentes.

Cabe mencionar que HEC-RAS genera un modelo unidimensional que entrega las alturas de inundación considerando la topografía levantada, por lo que no representa exactamente lo que ocurre bidimensionalmente. Sin perjuicio de lo anterior, los resultados representan de una manera confiable las alturas de inundación, siendo necesario interpretar con mayor detalle los resultados según las curvas de nivel y la existencia de calles y edificaciones. La interpretación de los resultados modelados es de suma importancia en particular en zonas de desborde y la continuación de éstas.

Se destaca que la modelación fue realizada considerando las condiciones actuales de cobertura del suelo, por lo que es necesario mantener dichas condiciones y evitar utilizar las riberas como depósitos de basura. Según lo comentado por habitantes del lugar, los vecinos tiran mucha basura a los cauces, como colchones, muebles, etc. lo que provoca que éstos se inundan muy fácilmente. Dado lo anterior, se destaca la necesidad de realizar mantenimiento continuo a los cauces, dada la basura y vegetación.

En relación con las inundaciones por anegamiento, estas ocurren principalmente por el colapso de los sistemas de alcantarillado debido a lluvias intensas. Por otro lado, el modelo generado para determinar áreas deprimidas dentro de la comuna permite identificar las zonas de bajo nivel topográfico, en relación a su entorno, que podría verse anegadas producto de lluvias intensas. De esta manera es que se recomienda realizar una constante mantención al sistema de alcantarillado, sobre todo en las zonas deprimidas determinadas en este estudio.

7.3.2 Remociones en masa

Los flujos o aluviones son procesos diferentes de las inundaciones, y ambos peligros no se comportan de igual manera. En este sentido, aunque las obras de mitigación reducen el riesgo asociado a este peligro, no han sido diseñadas para esto, y, en caso de ocurrir un flujo, podrían ser superadas. Sin embargo, debido a las bajas pendientes de las quebradas y cauces aledañas a la ciudad, no deberían generarse flujos de grandes magnitudes, por esta razón es que solo existen áreas con susceptibilidad alta y moderada de ser afectadas por dicho peligro. A pesar de ello este fenómeno y sus consecuencias no deberían ser descartados.

Para procesos de ladera, el factor considerado para definir la susceptibilidad asociada a este peligro fue la pendiente del terreno, que permitió determinar que las zonas susceptibles a estos peligros se concentran mayoritariamente en las laderas que rodean la zona urbana de la comuna. También estos procesos se pueden generar en algunos bordes de los cauces. Por lo tanto, se recomienda un constante monitoreo y mantención de los cauces de la comuna, porque un deslizamiento podría obstruir el cauce y generar inundaciones.

7.3.3 Sismicidad

En el área de estudio, existen dos principales mecanismos sísmicos: Sismos interplaca (a ellos se orienta la normativa sísmica) y sismos intraplaca de profundidad intermedia. Por lo tanto, toda la comuna está expuesta a ser afectada por este peligro.

8 Bibliografía

Antinao, J., Fernández, J., Naranjo, J. & Villarroel, P., 2002. *Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental, No. 2, 1 mapa escala 1:100.000.

Blair, T. & McPherson, J., 2009. *Processes and forms of alluvial fans*. Springer Science Business Media, s.l.: s.n.

Centeno, J., Fraile, M., Otero, M. & Pividal, A., 1994. *Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental*. Madrid: Ed. Rueda.

Coloma, F. y otros, 2017. Geochemistry of Permian to Triassic igneous rocks from northern Chile (28°-30°15'S): Implications on the dynamics of the proto-Andean margin. *Andean Geology*, Mayo, 44(2), pp. 147-178.

Costa, J., 1984. Physical geomorphology of debris flows. In Developments and Applications of Geomorphology. En: J. E. Costa & P. J. Fleisher, edits. *Developments and Applications of Geomorphology*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 268-317.

Cruden, D. & Varnes, D., 1996. *Landslide types and processes*, Washington D.C.: Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board.

DeMets, C., Gordon, R., Argus, D. & Stein, S., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21(20), pp. 2191-2194.

Esaki, T., Thapa, P., Mitani, Y. & Ikemi, H., 2005. *Landslide and debris flow characteristics and hazard mapping in mountain hillslope terrain using GIS, Central Nepal*. Vancouver, En: Eberhardt, E., Hungr, O., Fell, R., Couture, E. (eds), Proceedings, International Conference on Landslide Risk Management, p. 657-669..

Gana, P., Wall, R. & Guitiérrez, A., 1996. *Mapa geológico del área Valparaíso-Curacaví, Región de Valparaíso y Región Metropolitana*, s.l.: s.n.

Gonzalez de Vallejo, L., Ferre, M., Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Segunda ed. Madrid: Pearson Educación.

Hauser, A., 1985. Flujos aluvionales de 1870 y 1896 ocurridos en la ladera norte del volcán Yates, X Región: su implicancia en la evaluación de riesgos naturales. *Revista Geológica de Chile*, Volumen 25-26, pp. 125-133.

Hauser, A., 1997. *Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 49, 47 pág.

Hauser, A., 2000. *Remociones en masa en Chile*. 2da ed. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 59, versión actualizada, 89 pág.

Hayes, G. P., Wald, D. J. & Johnson, R. L., 2012. Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries. *Journal of Geophysical Research*, p. B1302.

Hungr, O., Corominas, J. & Eberhardt, E., 2005. State of the Art Paper #4, Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocit. En: *Landslide Risk Management*. London: Taylor and Francis Group.

JTC-1, 2008. Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), pp. 85-98.

Kausel, E. & Ramírez, D., 1992. Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos. *Revista Geofísica*, Issue 37, pp. 159-194.

Kausel, E. & Ramírez, D., 1992. Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos. *Revista geofísica*, Volumen 37, pp. 159-193.

Keeper, D., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of América Bulletin*, 95(4), pp. 406-421.

Martin, G. & Lew, M., 1999. *Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117: Guidelines for Analyzing and Mitigating Liquefaction Hazards in California*. Los Angeles: Southern California Earthquake Center, University of Southern California, 63 pág.

Mongue, J. E., Rosenberg, L. A., Vives E, A. & Yoma y, F., 1965. *Sismo del 28 de marzo de 1965, Chile. Informe sobre daños en estructuras*, s.l.: s.n.

Naranjo, J. & Varela, J., 1996. *Debris and mud flows that affected the eastern area of Santiago on May 3, 1993*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín No. 47, 42 pág.

ONU/EIRD, 2004. *Vivir con el Riesgo, Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, Versión en español 2004*, Nueva York: Organización de las Naciones Unidas.

Petit-Breuilh, M. E., 2004. *Desastres naturales y ocupación del territorio en Hispanoamérica (siglos XVI al XX)*. España: Universidad de Huelva.

Pierson, T. & Scott, K., 1985. Downstream dilution of Lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Research*, 21(10), pp. 1511-1524.

PMA, 2008. *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p..

PMA-GCA, 2007. *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p..

Qarinur, M., 2015. Landslide runout distance prediction based on mechanism and cause of soil or rock mass movement. *Journal of the Civil Engineering Forum*, Vol. 1(No. 1).

Sabaj, R., 2008. *Identificación y caracterización de estructuras potencialmente activas en la Cordillera de la Costa entre los 33° y 33°45' S.*, Santiago Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Sancho, C., 1997. Los mapas de riesgos. En: J. Peña, ed. *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Zaragoza: Geomorfa, pp. 181-200.

Scholz, C., 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 439 pág.

Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R. & Petley, D., 2005. Seismically-induced Rock Slope Failures Resulting from Topographic Amplification of Strong Ground Motions: The Case of Pacoima Canyon, California.. *Engineering Geology*, Volumen 80, pp. 336-348.

Sepúlveda, S. y otros, 2010. Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia.. *Landslides*, pp. doi: 10.1007/s1034VI-010-0203-2.

SERNAGEOMIN, 2003. • *Mapa Geológico de Chile: Versión digital. Publicación geológica digital N°4. Base geológica escala 1:1.000.000*, Santiago, Chile: Subdirección Nacional de Geología.

SERNAGEOMIN, 2017. *Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile*. s.l.:s.n.

Somoza, R., 1998. Updated Nazca (Farallon)- South America relative motions during the last 40 My: implication for mountain building in the central Andean region.. *Journal of South American Earth Sciences*, Issue 11, pp. 211-215.

SUBDERE, 2011. *Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial*, Santiago: Subsecretaría de Desarrollo Regional.

Taulis, E., 1938. *Terremoto y grandes temblores en Chile*. s.l.:s.n.

Tichelaar, B. W. & Ruff, L. J., 1993. Depth of Seismic Coupling Along Subduction Zones. *Journal of Geophysical Research*, 98(B2), pp. 2017-20137.

Urrutia, R. & Lanza, C., 1993. *Catástrofes de Chile 1542-1992*, s.l.: s.n.

USGS, 2008. *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*, Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p..

Varnes, D., 1978. *Slope movement types and processes*, Washington, D.C.: Special report 17VI: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board.

Varnes, D., 1984. Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO. *Natural Hazards*, Volumen 3, pp. 1-61.

9 Anexo A Definiciones de peligro y riesgo utilizadas en este informe

Los procesos geodinámicos producen modificaciones de diversas magnitudes en la superficie terrestre que constituyen peligros geológicos que afectan de forma directa o indirecta las actividades humanas. Se entiende como **Peligro Natural** a cualquier fenómeno de origen natural que puede tener efectos negativos en el territorio (personas, infraestructura, medio ambiente, etc.). Los peligros naturales pueden subdividirse en distintas categorías: geológicos, hidrológicos, climáticos, incendios, etc.

Asociados a los peligros naturales se reconocen cuatro conceptos principales: **susceptibilidad**, **vulnerabilidad**, **amenaza** o peligrosidad (hazard) y **riesgo** (risk).

La **susceptibilidad** corresponde a una estimación cualitativa o cuantitativa de la distribución espacial de un fenómeno dado que existe o que potencialmente podría ocurrir en un área. Aunque se espera que un cierto fenómeno peligroso ocurra con mayor frecuencia en las áreas de mayor susceptibilidad, debe tenerse en cuenta que el análisis de susceptibilidad no considera el período de retorno de los eventos, es decir, el factor tiempo (JTC-1, 2008). La susceptibilidad depende directamente de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, como la geomorfología o factores intrínsecos de los materiales geológicos, y de factores externos que pueden actuar como desencadenantes (por ejemplo, precipitaciones intensas, sismos, etc.). Para la construcción de mapas de susceptibilidad se utilizan los mapas de inventario, en los que se identifican las áreas que han sido afectadas por determinados procesos, y mapas de factores condicionantes que favorecen o entorpecen el desarrollo de estos procesos. Además, los mapas de susceptibilidad apuntan a cubrir el peor escenario posible en el área de estudio.

El concepto de **amenaza** o **peligrosidad** (*hazard*^{2*}) corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un proceso, con una magnitud determinada dentro de cierto período de tiempo y en un área específica (Varnes, 1984). La estimación de la amenaza o peligrosidad implica necesariamente una consideración de la variable temporal, es decir, el período de recurrencia de un evento (período de retorno). Por otro lado, la amenaza para períodos de retorno infinitos tiende a ser similar que la susceptibilidad. Por lo anterior, cuando no se cuenta con datos suficientes para estimar períodos de retorno, resultan útiles los mapas de susceptibilidad, que consideran solo las variables intrínsecas del material para la zonificación de peligros geológicos

Los **elementos expuestos** pueden ser personas, bienes, propiedades, infraestructuras, servicios, actividades económicas, etc., que pueden sufrir las consecuencias directas o indirectas de un proceso geológico en una determinada zona (Gonzalez de Vallejo, et al., 2002).

La **vulnerabilidad** corresponde al grado de pérdidas o daños potenciales de un elemento o conjunto de elementos dados, como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de magnitud determinada. Se expresa en una escala de 0 (sin daños) a 1 (pérdida o destrucción total del elemento) o entre 0% y 100% de daños (Varnes, (1984); González de Vallejo et al., (2002); JTC1, (2008)).

Por otro lado, el concepto de **riesgo** (risk) incorpora consideraciones socioeconómicas, y se define como las potenciales pérdidas debidas a un fenómeno natural determinado, por ejemplo, vidas humanas, pérdidas económicas directas o indirectas, daños en infraestructura, etc. (Gonzalez de Vallejo, et al., 2002).

Según Varnes (1984), se denomina riesgo específico al grado de pérdidas esperado durante un período de tiempo dado, como consecuencia de la ocurrencia de un determinado proceso, expresado en términos de probabilidad. Puede ser expresado como el producto $A \times V$, donde A corresponde a la amenaza y V a la

^{2*} La traducción literal corresponde a peligro, pero de acuerdo a la ONEMI y al proyecto Multinacional de Geociencias Andino (MAP-GAC) para evitar confusiones se utiliza Amenaza o Peligrosidad

vulnerabilidad. En este caso no es posible obtener una evaluación cuantitativa de las pérdidas (Gonzalez de Vallejo, et al., 2002).

De acuerdo a las definiciones de la UNESCO (Varnes, 1984) el riesgo total corresponde al número esperado de vidas, personas heridas, daños a la propiedad, o a las actividades económicas debido a un fenómeno natural específico y se expresa como el producto del riesgo específico y los elementos expuestos, esto es:

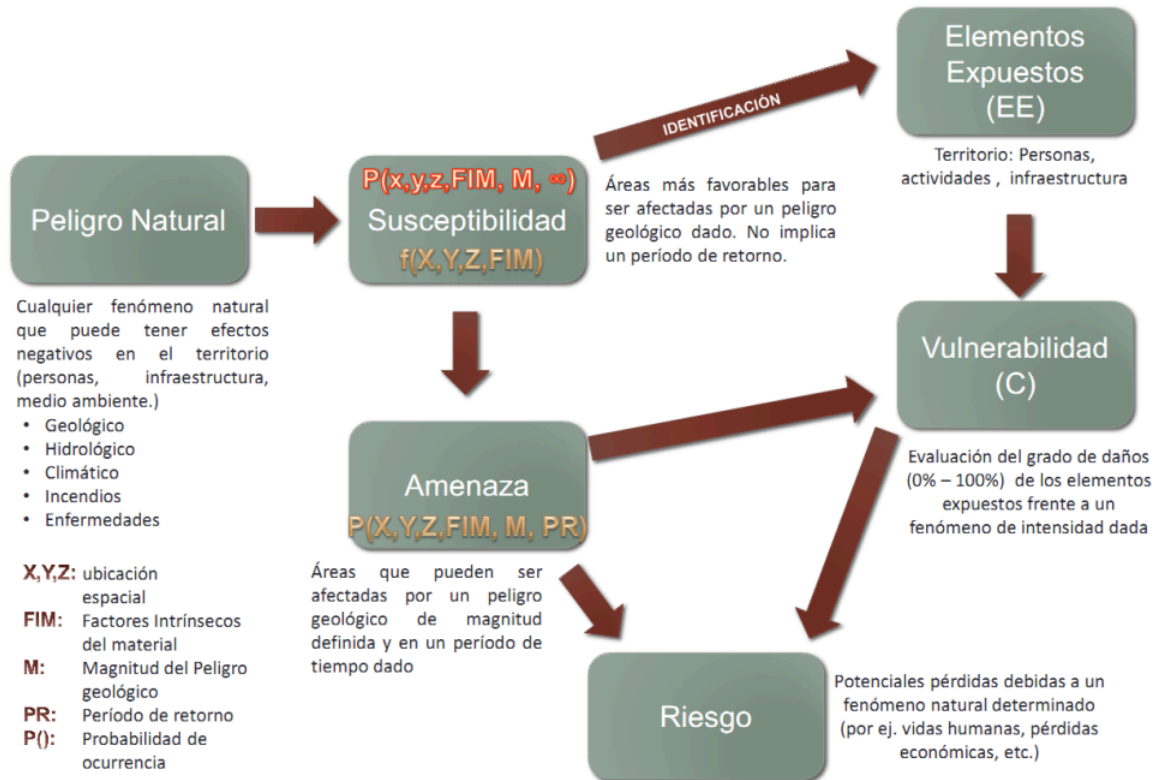
$$R_t = R_e * E = A * V * E$$

Donde R_t corresponde al riesgo total, R_e al riesgo específico y E a los elementos expuestos considerados. La Figura 7-1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo.

La definición de riesgo, o áreas de riesgo, utilizadas internacionalmente difieren a la nomenclatura propuesta por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción en su artículo 2.1.17. En la OGUC, el concepto utilizado de riesgo corresponde a la definición de "Peligro Natural" definida internacionalmente.

En resumen, los peligros geológicos pueden analizarse desde el punto de vista de las condiciones intrínsecas del material (estudios de susceptibilidad o determinísticos) y desde el punto de vista de los factores desencadenantes de un fenómeno (estudios de amenaza o probabilísticos). Considerando que para un estudio probabilístico es necesario contar con set de datos históricos de los procesos desencadenantes, los que normalmente no se encuentran registrados de manera adecuada, y que para períodos de retornos infinitos los mapas de amenaza tienden a ser similares a los mapas susceptibilidad, se considera que los mapas de susceptibilidad corresponden al escenario más conservador y adecuado para ser aplicado en la Planificación Territorial.

Figura 9-1 Etapas de evaluación de un evento geológico peligroso.



Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984)

Finalmente, la reducción y mitigación de los riesgos vinculados a los diversos peligros geológicos presenta igual o mayor importancia que el manejo de las emergencias y la respuesta posterior al evento catastrófico. El desarrollo sustentable de la urbanización está directamente asociado a la reducción y mitigación de estos riesgos. La generación de conciencia a partir del conocimiento de los peligros y riesgos geológicos es fundamental para reducir y mitigar las consecuencias de estos eventos sobre la población (ONU/EIRD, 2004).

Es importante destacar que las definiciones previamente presentadas corresponden a una terminología aceptada y utilizada a nivel internacional, tanto en el ámbito científico (ver por ejemplo JTC-1, (2008)) como en instituciones públicas de diversos países. Estas definiciones son usadas por la Estrategia Internacional para la reducción de Desastres de la ONU (ONU/EIRD, 2004), por UNESCO (ver por ejemplo Varnes, (1984)) y por los servicios geológicos de diversos países (ver por ejemplo USGS, (2008) y PMA-GCA (2007)). A nivel nacional, estas definiciones han sido adoptadas por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo en la “Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial” (SUBDERE, 2011) y por el Servicio Nacional de Geología y Minería (ver por ejemplo PMA-GCA (2007)).

Se recomienda incorporar esta terminología en el ejercicio de los instrumentos de planificación territorial, lo que permitirá que exista concordancia en la terminología y las metodologías adoptadas, tanto a nivel nacional, entre los diferentes servicios públicos relacionados, como a nivel internacional.

9.1 Bibliografía

González de Vallejo, L., Ferrer, M, Ortuño, L., Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Education, Madrid. 744 pp.

JTC-1, 2008. Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning, for land use planning. Engineering Geology 103, 85–98.

Ogura, A., Soares Macedo, E., 2000. Procesos y Riesgos Geológicos. En: II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental (UNESCO y UNICAMP). Campinas, Brasil, 345 p. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/001VI/001VI31/1VI3153s.pdf>

ONU/EIRD, 2004, Vivir con el Riesgo, Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, Versión en español 2004 en CD.

Urrutia, R. y Lanza, C. 1993. Catástrofes en Chile 1541-1992. Editorial La Noria. 440p. Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Varnes, D.J.,1984. Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO, Natural Hazades, No.3,61 p

10 Anexo B Descripción de peligros geológicos analizados

En este capítulo se detallan los peligros geológicos que potencialmente podrían afectar o han afectado al área de estudio, constituyendo un riesgo de catástrofe permanente o potencial, amenazando el emplazamiento de población.

Para cada peligro, se describe en qué consiste, cuáles son sus factores condicionantes, y los principales efectos para la población y sus actividades. El análisis se realiza dividiendo los peligros geológicos en dos grupos, procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los procesos externos o exógenos (remociones en masa, inundaciones).

10.1 Procesos exógenos o externos de la tierra

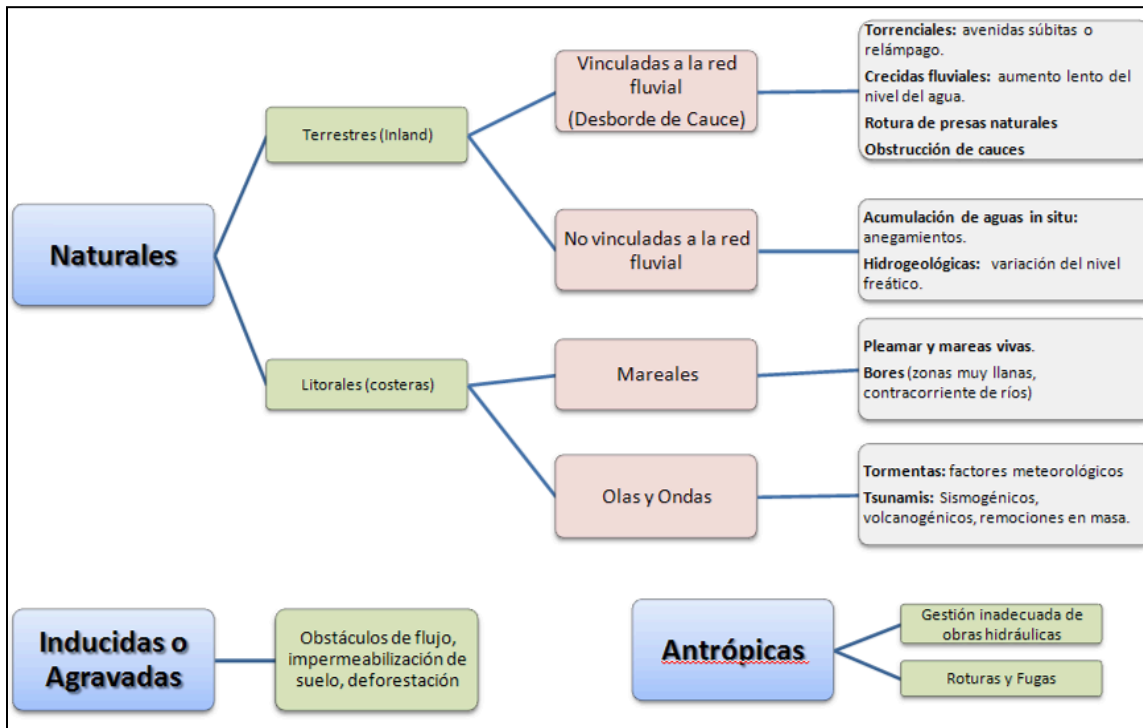
10.1.1 Inundaciones terrestres y litorales

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (Figura 8-1): (1) terrestres, en el sentido de “tierra adentro”, en las que aguas dulces anegan territorios al interior de los continentes, y (2) litorales o costeras, en las que aguas marinas o lacustres-palustres invaden los sectores limítrofes con el dominio terrestre. Los procesos de inundación pueden originarse por varios factores, tales como lluvias intensas durante temporales, pero también pueden originarse por colapso o desbordamiento de represas y canales, marejadas en zonas costeras, o como afloramiento de aguas subterráneas en zonas pantanosas.

Cabe notar que existe una estrecha relación entre los fenómenos pluviométricos estacionales y los fenómenos de avalanchas, rodados, aluviones o erosiones. Los últimos se ven acentuados por el aumento de la capacidad de arrastre de material, por inundación y por desborde de cauces, todos ellos asociados a la activación de quebradas por lluvias ocasionales y que ponen en riesgo a la población en los alrededores.

A continuación, se presenta una breve descripción de los distintos tipos de inundaciones.

Figura 10-1 Clasificación de los tipos de inundaciones



Fuente: Modificado de Diez-Herrero, et al. (2008)

10.1.1.1 *Inundación por desborde de cauce*

Como su nombre lo indica, estos tipos de fenómenos ocurren cuando ríos o esteros desbordan su cauce natural anegando las terrazas fluviales laterales o adyacentes, debido a la ocurrencia de caudales extremos. Estos fenómenos se producen generalmente debido a eventos de precipitaciones líquidas intensas y/o prolongadas en el tiempo. Los valores que pueden alcanzar los caudales, así como el tamaño del cauce, dependen también de otros factores como del área de la cuenca correspondiente, su forma, la diferencia de cota, la presencia de rocas o sedimentos permeables, etc.

Para este tipo de inundaciones, se pueden identificar dos tipos principales de cauces:

1. **Perennes:** ríos o esteros con cuencas que abarcan grandes áreas y que tienen sus cabeceras en zonas cordilleranas. Aunque no presenten necesariamente una escorrentía superficial continua, se consideran como perennes dado que la mayoría del flujo escurre en el acuífero ubicado bajo la superficie. Estos presentan cauces de gran extensión, bien definidos, con diferentes niveles de terrazas fluviales, y fácilmente identificables a partir del análisis estereoscópico de fotos aéreas. Las terrazas más altas generalmente están ocupadas por actividades agrícolas o asentamientos humanos.
2. **Intermitentes:** Esteros y quebradas de escurrimiento temporal como consecuencia directa de precipitaciones intensas. En general, algunas de estas quebradas pueden presentar amenaza por fenómenos de remociones en masa del tipo flujos de detritos, existiendo una estrecha relación entre estos fenómenos e inundaciones por escorrentía torrencial de gran velocidad. Como se explicará posteriormente, los flujos de detritos, al perder su carga sólida, van transformándose paulatinamente en inundaciones torrenciales. Normalmente no existen estaciones fluviométricas en estos cauces, por lo que la estimación de caudales máximos se debe hacer con modelos matemáticos y estadísticas de precipitaciones máximas de gran intensidad.

Los efectos en la población y sus actividades estarán dados por:

1. **Tiempo de aviso:** En general, las inundaciones por desborde de cauce tienen un tiempo de aviso suficiente, ya que los procesos de inundación son paulatinos y permiten evacuar a la población.
2. **La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno**
3. **Densidad de población:** En caso de que la población se encuentre directamente en la zona de inundación y no sea evacuada oportunamente, pueden ocurrir muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales, etc. Si la inundación no afecta directamente a la población, puede producir cortes de camino, daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destruir captaciones de agua para el consumo humano) con un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

10.1.1.2 *Inundación por acumulación de aguas lluvias en zonas llanas o anegamiento*

Este tipo de inundaciones se producen en zonas deprimidas, de baja permeabilidad, con niveles freáticos someros y deficiente drenaje del terreno, frecuentemente inundadas debido a lluvias intensas y/o prolongadas. Este tipo de inundaciones se asocia a la zona de desembocadura de algunas quebradas, las que son "embalsadas" por caminos y obstrucciones antrópicas. Estas barreras no permiten que el río escurra fácilmente hacia el mar, sino solo de forma subterránea, provocando el ascenso de los niveles freáticos y la formación de zonas pantanosas y humedales. Sólo en eventos de pluviosidades extremas, el caudal transportado por las quebradas tiene la suficiente fuerza para romper esta barrera, atravesándola y provocando inundaciones por desborde de cauces.

En las zonas urbanas consolidadas, las acumulaciones de aguas lluvia ocurren especialmente en cruces viales, donde la evacuación de las aguas lluvias es insuficiente, ya sea por el colapso de los sistemas de colección, acumulación de basuras que obstruyen los desagües, la no existencia de redes de evacuación y vialidad pavimentada, por la diferencia de nivel de las carpetas de rodado en las intersecciones de las calles existentes, o por diseñar las obras de mitigación para un período de retorno no adecuado.

10.1.2 Procesos de remoción en masa

El término “remoción en masa” incluye una amplia variedad de procesos que generan el movimiento aguas abajo de los materiales que constituyen las laderas, incluyendo roca, suelo, relleno artificial o una combinación de las anteriores (Figura 8-2). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo.

10.1.2.1 Desprendimiento o caída de rocas

Los desprendimientos o caída de rocas son remociones en masa en las cuales bloques de rocas o suelo se desprenden a partir de laderas de altas pendientes, como cornisas o acantilados rocosos, para luego desplazarse en caída libre, al menos en parte de su trayectoria (Hauser, 2000). Normalmente, las superficies de rotura corresponden a planos de estratificación, cuya inclinación es superior a su ángulo de fricción interna, con proyección libre a la cara del talud. Entre las zonas susceptibles a sufrir desprendimientos o caídas de rocas destacan los flancos de quebradas profundas, labradas en secuencias estratificadas con niveles más duros hacia el techo, expuestas a erosión fluvial, o acantilados costeros expuestos a erosión marina.

La gravedad es el principal motor del peligro de caída de rocas. Como éste es un proceso gravitacional depende de leyes de fricción y es, por consiguiente, caótico. Dentro de los factores desencadenantes destacan los grandes sismos que pueden generar numerosos desprendimientos a partir de laderas con fuerte inclinación y con condiciones geológicas y estructurales favorables.

La caída de bloques o desprendimientos puede producir una serie de efectos en personas, desde contusiones menores hasta la muerte, dependiendo del tamaño del bloque y la fuerza con que éste cae. En el caso de estructuras, por lo general los daños son casi nulos, pero puede producirse la rotura de vidrios o daños a muros en función del tamaño del bloque y la distancia recorrida por éste. Además, al caer un bloque en el camino puede producirse un accidente debido a maniobras de conducción para evitarlo.

En general, este peligro presenta una vulnerabilidad social, económica y estructural menor que otros peligros geológicos. Además, afecta a escala local, pero tiene una mayor incidencia debido a que su recurrencia es alta. En este peligro, el tiempo de aviso es mínimo, pero se puede mitigar indicando que la zona es susceptible a ser afectada por caída de bloques.

Figura 10-2 Clasificación de tipos de remociones en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera

Material		ROCA	DETRITO	SUELO
Tipo de movimiento				
CAIDA		<p>Escaupe Caída de roca Rock Fall Debris</p>	<p>Escaupe Caída de detritos Guijarros Cono de detrito</p>	<p>Escaupe Caída de suelo Coluvio Cono de detrito</p>
	VOLCAMIENTO	<p>Volcamiento de roca</p>	<p>Volcamiento de detrito Cono de detrito</p>	<p>Fracturas Volcamiento de tierra Cono de detrito</p>
DESPLAZAMIENTO	Rotacional	<p>Deslizamiento rotacional simple (slump) Superficie de cizalle</p>	<p>Cima Cabeza Escaupe Escaupe menor Superficie de cizalle Deslizamiento rotacional múltiple</p>	<p>Deslizamientos rotacionales sucesivos</p>
	Traslacional (planar)	<p>Deslizamiento de roca</p>	<p>Deslizamiento de detrito</p>	<p>Deslizamiento de suelo</p>
PROPAGACION	<p>Estructura subhorizontal normal Quebradas Cobertura de roca Estructura inclinada Limolita arcillosa Adelgazamiento de estratos Plano de despegue Sustrato competente</p>		<p>Levantamiento del valle (arrasado por erosión)</p>	<p>Propagación de suelo</p>
FLUJO	<p>Solifluxión (Flujo de detritos periglacial)</p>	<p>Flujo de detritos</p>	<p>Flujo de suelo (flujo de barro)</p>	
COMPLEJO	<p>p.ej.: Deslizamiento de suelo con detritos de caída de rocas</p>		<p>p.ej.: Deslizamiento rotacional/traslacional compuesto, gradando a flujo de suelo hacia el pie</p>	

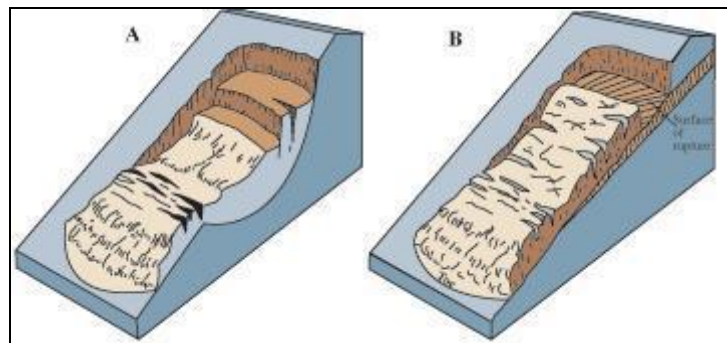
Fuente: Clasificación utilizada por el British Geological Service, modificada de (Varnes, 1978) y (Cruden & Varnes, 1996).
 Disponible en: http://www.bgs.ac.uk/landslides/how_does_BGS_classify_landslides.html

10.1.2.2 Deslizamientos

Los deslizamientos son remociones en masa en las cuales las masas de suelo o roca se deslizan principalmente a lo largo de superficies de ruptura, al superarse la resistencia al corte, generando el movimiento del material en su conjunto (Hauser, 2000). Los volúmenes incluidos en estas remociones varían desde algunas decenas hasta varios millones de metros cúbicos y pueden adquirir magnitud catastrófica.

Estos fenómenos pueden ocurrir de varias formas dependiendo de las propiedades del material y las características geológicas y geomorfológicas del entorno, siendo principalmente divididos en rotacionales y traslacionales (Figura 8-3). Esto implica que las superficies de ruptura son ya sea curvas y cóncavas o a lo largo de un plano o superficie ondulada, respectivamente.

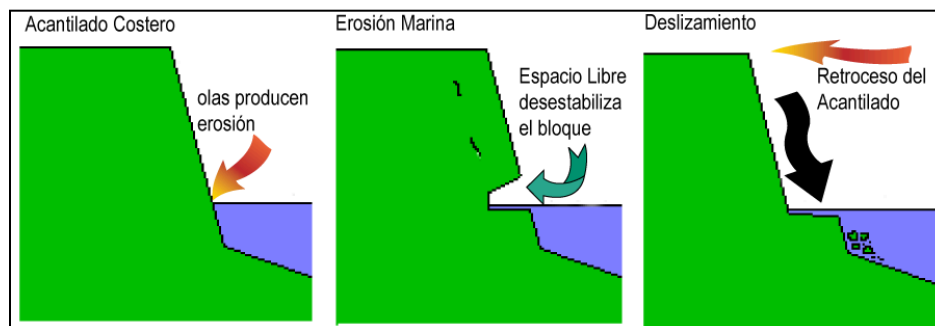
Figura 10-3 Ejemplo de deslizamientos. A: Deslizamiento rotacional, B: Deslizamiento traslacional



Fuente: Modificado de Landslide Types and Process, USGS. Fact Sheet 2004-3072. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/images/Fig3grouping-2LG.jpg>

Estos fenómenos incluyen los deslizamientos que ocurren durante el retroceso de terrazas fluviales producto de la erosión fluvial o el retroceso de acantilados costeros por erosión marina basal, en especial al desarrollo de terrazas de abrasión. Este proceso es causado por la fuerza de las olas, las que cavan cavernas y desestabilizan el bloque superior, provocando que éste caiga por su propio peso (Figura 8-4). Ello produce además que el acantilado costero se encuentre en constante retroceso, lo que permite definir como zona de alta susceptibilidad todas las áreas cercanas al acantilado costero. Los mismos procesos de erosión ocurren en valles con erosión fluvial activa.

Figura 10-4 Ejemplo de erosión por retrocesos de terrazas, aplicado al desarrollo de planicies de abrasión



Fuente: Elaboración propia

Los factores condicionantes de un deslizamiento corresponden principalmente a: los factores intrínsecos del suelo y la roca, las características geológicas (litología, estructuras, grado de alteración y meteorización, etc.), los factores geomorfológicos (pendiente, aspecto, curvatura, elevación, entre otros), la cantidad y tipo de vegetación y el grado de humedad y posición del agua subterránea.

Por otro lado, estos fenómenos pueden ser generados por factores externos, denominados factores desencadenantes o gatillantes, tales como eventos hidrometeorológicos, sísmicos y actividad antrópica (excavaciones para caminos, canales, terraplenes, etc.).

Los daños en el medio antrópico producto de un deslizamiento que afecta a un área determinada, estarán dados por el volumen de material desplazado durante el proceso y la velocidad con la que se produce el deslizamiento.

El grado en que un deslizamiento afecta a la población depende de:

1. Distancia al origen del fenómeno: Por lo general, los deslizamientos son procesos que afectan un área limitada (radios menores a 1 km., incluso menores a 500 m). Hay que considerar que este punto depende directamente del tamaño de volumen desplazado.
2. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno: En general, dado que estos procesos son de alta velocidad los daños potenciales son altos.
3. Densidad de población: A mayor densidad de población y área expuesta susceptible de ser afectada, mayores serán los daños esperados. Si la población se encuentra directamente en el área de alcance de un deslizamiento, la vulnerabilidad, estructural y económica es muy alta ya que la pérdida de vidas, viviendas y productividad son efectos típicos de este peligro geológico. Por otro lado, si un deslizamiento afecta a caminos, acueductos o líneas eléctricas puede producir aislamiento, enfermedades gastrointestinales y pérdidas económicas en general para la población.
4. Tiempo de aviso: Sin estudios de detalle no hay forma de predecir este tipo de procesos. Si se realizan estudios específicos, es posible conocer el o los factores gatillantes de las remociones en masa en un área determinada. Si estos factores gatillantes pueden ser monitoreados, es posible generar sistemas de alerta. Por ejemplo, si el factor gatillante son las precipitaciones sobre un cierto nivel umbral de intensidad, es posible generar sistemas de alerta que se activen cuando se sobrepasa dicho umbral.

10.1.2.3 Flujos de barro y/o detrito

Los flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones', son remociones en masa que ocurren cuando una masa de sedimentos con mala clasificación, agitados y saturados con agua, se movilizan pendiente abajo como flujos viscosos de sedimentos concentrados (Antinao, et al., 2002). Los flujos de detritos usualmente son descritos como fluidos no-newtonianos o plásticos de Bingham, donde la fracción sólida varía generalmente entre 50 a 90% en volumen (Costa, 1984). En los casos en que la granulometría del material transportado sea predominantemente fina estos flujos se conocen como flujos de barro.

Las partículas sueltas que cubren pendientes desnudas y otros depósitos detríticos no consolidados, disponibles dentro de la cuenca de recepción, son transportadas hacia el cauce principal donde continúa su movimiento. Se remueven así depósitos de gravas y arenas sueltas del lecho, hasta alcanzar el área de depositación, que corresponde al sitio de salida de dichas quebradas a zonas más llanas donde se forman abanicos aluviales. Con la disminución de la pendiente, a medida que aumenta la distancia desde su fuente, los flujos van perdiendo su carga sólida de mayor granulometría, por lo que van pasando paulatinamente a flujos de barro y finalmente a inundaciones o flujos hiperconcentrados donde la fracción sólida varía generalmente entre 1 a 25% en volumen (Pierson & Scott, 1985).

Para la ocurrencia de flujos de detritos es necesario que exista una cuenca donde se colecten los aportes de lluvia y una zona de acumulación de material donde los detritos se acopien para ser posteriormente transportados en el caso de que se cumpla alguna condición desencadenante.

En Chile, el factor desencadenante más común de flujos de detritos son las lluvias esporádicas, de corta duración y de intensidad excepcional. Por otro lado, en nuestro país existen muy pocos estudios que relacionen las intensidades de precipitaciones y este tipo de fenómenos, debido, principalmente, a los escasos registros de intensidad de precipitaciones y de flujos de detritos históricos. Sólo durante las últimas décadas se han instalados pluviógrafos que miden la intensidad instantánea u horaria de precipitaciones (mm por hora). Sólo se disponen de registros más sostenidos en el tiempo de precipitaciones diarias (mm en 24 horas). Esto dificulta los análisis de relación a estas variables ya que a veces basta una lluvia “corta” pero extremadamente intensa para generar un flujo de detritos.

Los flujos o “aluviones” del 18 de junio de 1991 en Antofagasta y del 3 de Mayo de 1993 en la Quebrada de Macul en Santiago Oriente son ejemplos de eventos que han suscitado el interés nacional tanto por el alto grado de daños materiales como el costo de vidas humanas. Estos eventos han sido, por otra parte, un aporte para el conocimiento de los umbrales de intensidad de precipitaciones mínimas para la generación de flujos de detritos en Chile. En el caso de Antofagasta, en una de las zonas más secas del país, se estimaron precipitaciones mínimas de 30 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1997). En el caso de Santiago Oriente, se contó con datos pluviográficos más precisos, donde se registraron casi 10 mm en una sola hora (Naranjo & Varela, 1996). Anteriormente, para la Región Metropolitana se estimó un mínimo de 60 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1985).

Si bien los casos anteriores se encuentran fuera del área de estudio, cabe destacar que corresponden a los pocos eventos donde se ha relacionado cuantitativamente la ocurrencia de estos fenómenos y la intensidad de precipitaciones. Sin embargo, estos constituyen datos valiosos en cuanto a los umbrales de intensidad de precipitaciones en las que se podrían generar flujos de características catastróficas.

El grado de daño producido por un flujo dependerá de varios factores:

- Tiempo de aviso: Los sistemas de emergencia y alerta a la población disminuyen considerablemente la vulnerabilidad social. Si se tienen mediciones continuas de la intensidad de precipitación, será posible alertar a la población de que existe la posibilidad de que se genere un flujo, entregando quizás minutos valiosos que podrían salvar vidas.
- Distancia al origen del fenómeno: Mientras más alejado sea el origen, y si se cuenta con sistemas de emergencia y alerta a la población, se puede disminuir la vulnerabilidad social.
- La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno (tamaño del flujo): Un flujo de mayor tamaño y rápido tiene mayor capacidad de afectar a una población que uno más pequeño y lento.
- Densidad de población en la zona susceptible a ser afectada: En caso de que la población se encuentre directamente en el cauce del flujo, los daños pueden ser catastróficos, ya que pueden producirse muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales mayores, etc., tal como ocurrió en los casos de Antofagasta (1991) y Quebrada de Macul (1993). Si el cauce no afecta directamente a la población, pueden producirse cortes de caminos y daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destrucción de captaciones de agua para el consumo humano), lo que se traduce en un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

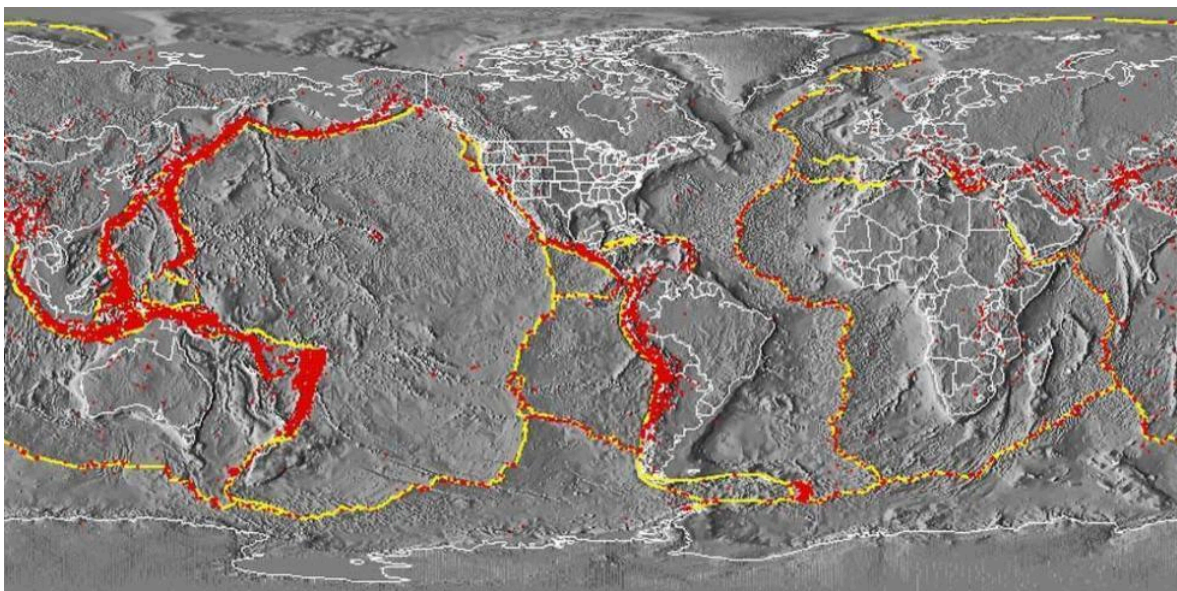
Este peligro geológico será tratado en conjunto con el peligro de inundación por desborde de cauce, ya que estos dos fenómenos comparten una serie de características comunes que permiten estudiarlos como un mismo proceso.

10.2 Procesos endógenos o internos de la tierra

10.2.1 Sismicidad

La costa Oeste de Sudamérica está delineada por el borde occidental de la placa Sudamericana y se caracteriza por una intensa sismicidad debido a su convergencia con la placa de Nazca. En planta se aprecia una banda sísmica activa muy angosta (100-150 km) y de profundidad variable (~5-200 km) entre el cordón montañoso de los Andes y la fosa Perú-Chile. La Figura 8-5 ilustra la sismicidad mundial que resalta los márgenes de las placas tectónicas y muestra, además, cómo Chile se encuentra en un ambiente de gran producción sísmica.

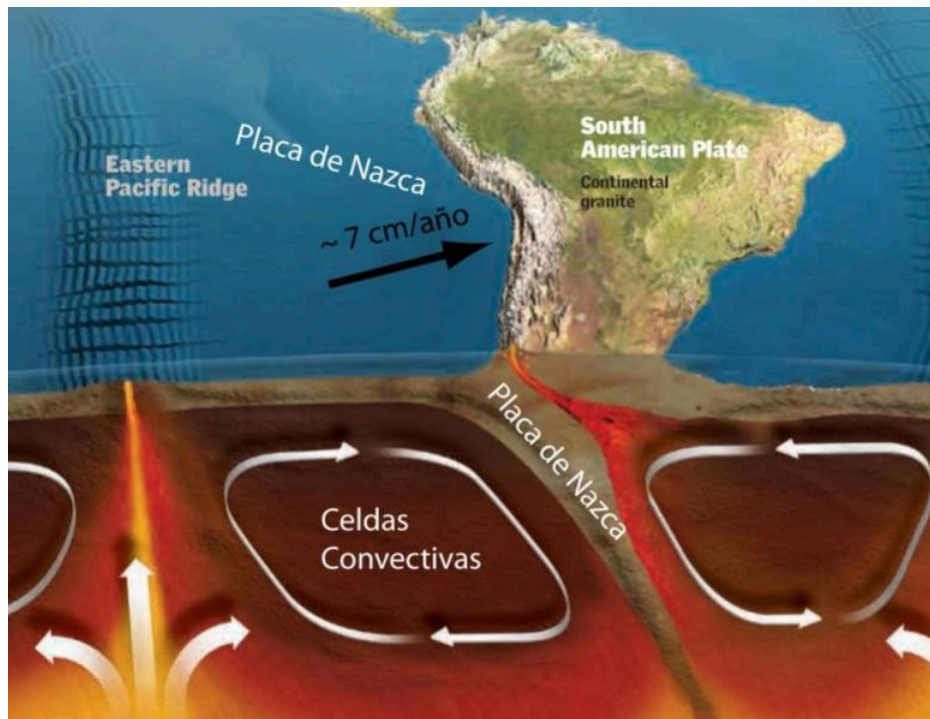
Figura 10-5 Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representa en puntos rojos los epicentros con magnitud >5. Nótese como la sismicidad “ilumina” los límites de las placas tectónicas, dibujadas en amarillo.



Fuente: Western Washington University (2011)

El margen de subducción donde se ubica Chile está caracterizado por una convergencia del orden de 8 cm/año (DeMets, et al., 1994). Una serie de fuerzas actúan sobre la Placa de Nazca, como por ejemplo el flujo convectivo de material del manto, que “mueve” a la placa en dirección al este generando la convergencia, o el mismo peso de la placa oceánica que “tira hacia abajo” esta placa, favoreciendo la subducción (Figura 8-6). Debido a sus distintas composiciones, la placa oceánica que es comparativamente más densa (de composición basáltica) tiende a introducirse bajo la corteza continental menos densa (de composición granítica). Las fuerzas que actúan sobre la interface entre ambas placas, así como las de interacción entre las placas y el manto generan el llamado acoplamiento sísmico interplaca, el que puede entenderse como la resistencia al deslizamiento en la zona de contacto entre ambas. A mayor acoplamiento interplaca la capacidad de generar terremotos de gran magnitud aumenta (Scholz, 1990).

Figura 10-6 Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile

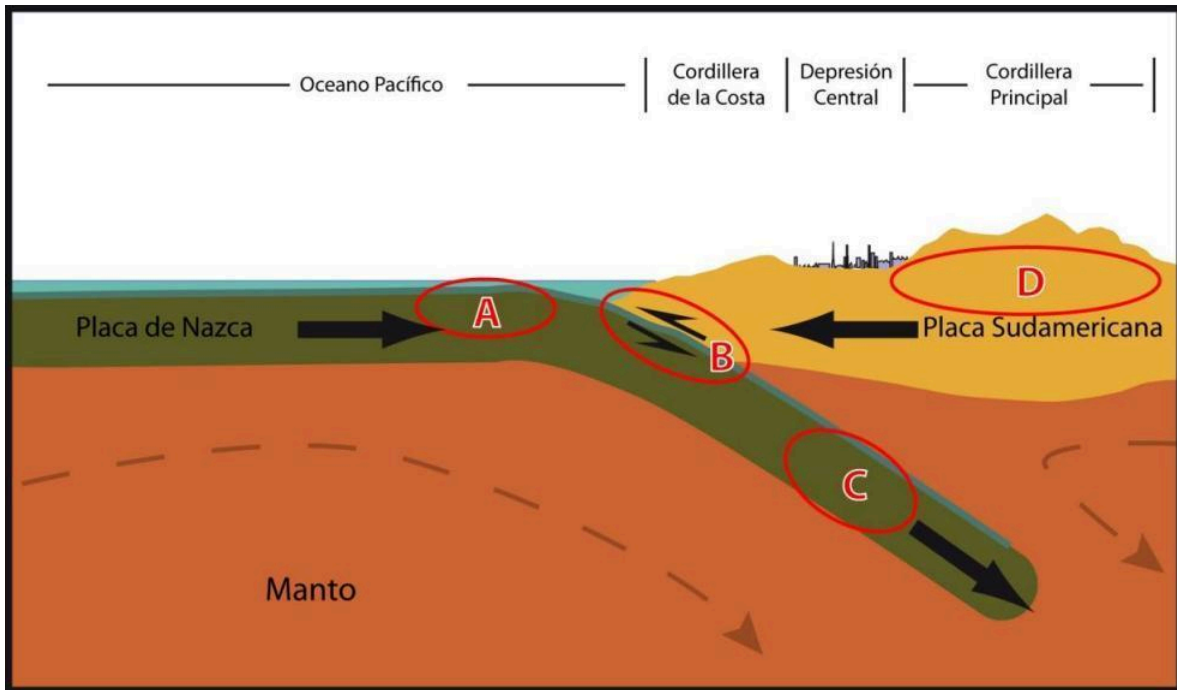


Fuente: Modificado de Enciclopedias Britannica (2008)

El sistema de subducción, además de acumular energía que se libera por sismos de interplaca, genera campos de esfuerzos en la placa continental, en la oceánica y en la zona de acople entre ambas. El método para descargar la energía acumulada es a través de diferentes tipos de sismos, ejemplificados en la Figura 8-7, que corresponde a:

- Zona A: Sismos “Costa afuera”, que se producen por los esfuerzos extensivos por abombamiento en la placa subductante antes de la zona de contacto. A pesar de llegar a tener magnitudes cercanas a $MW = 6$, prácticamente no causan efectos significativos en áreas pobladas debido a su ocurrencia en zonas mar adentro.
- Zona B: Sismos asociados al contacto interplaca, como los ocurridos en Antofagasta 1995, Chile Central 1985, Mejillones 2005 y Constitución-Concepción en el 2010. Estos son producto de la liberación de energía acumulada por la convergencia de placas.
- Zona C: Sismos intraplaca de profundidad intermedia, como los sismos de Punitaqui 1997, Copiapó 2002, Calama 1950, Tarapacá 2005 y Chillán 1939. Se producen por el fracturamiento tensional de la placa de Nazca (la placa se quiebra por su propio peso).
- Zona D: Sismos superficiales intraplaca, cómo los sismos de Las Melosas en 1958, Aroma en 2001, Curicó en 2004 y Aysén, 2007. Son producto del esfuerzo intraplaca inducido por la subducción, que a la vez contribuye a la generación de relieve. En general, los sismos superficiales intraplaca se encuentran asociados a fallas superficiales que pueden tener movimientos normales, inversos y de rumbo, que responden a campos de esfuerzos compresivos o extensivos.

Figura 10-7 Tipos de sismos ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto)



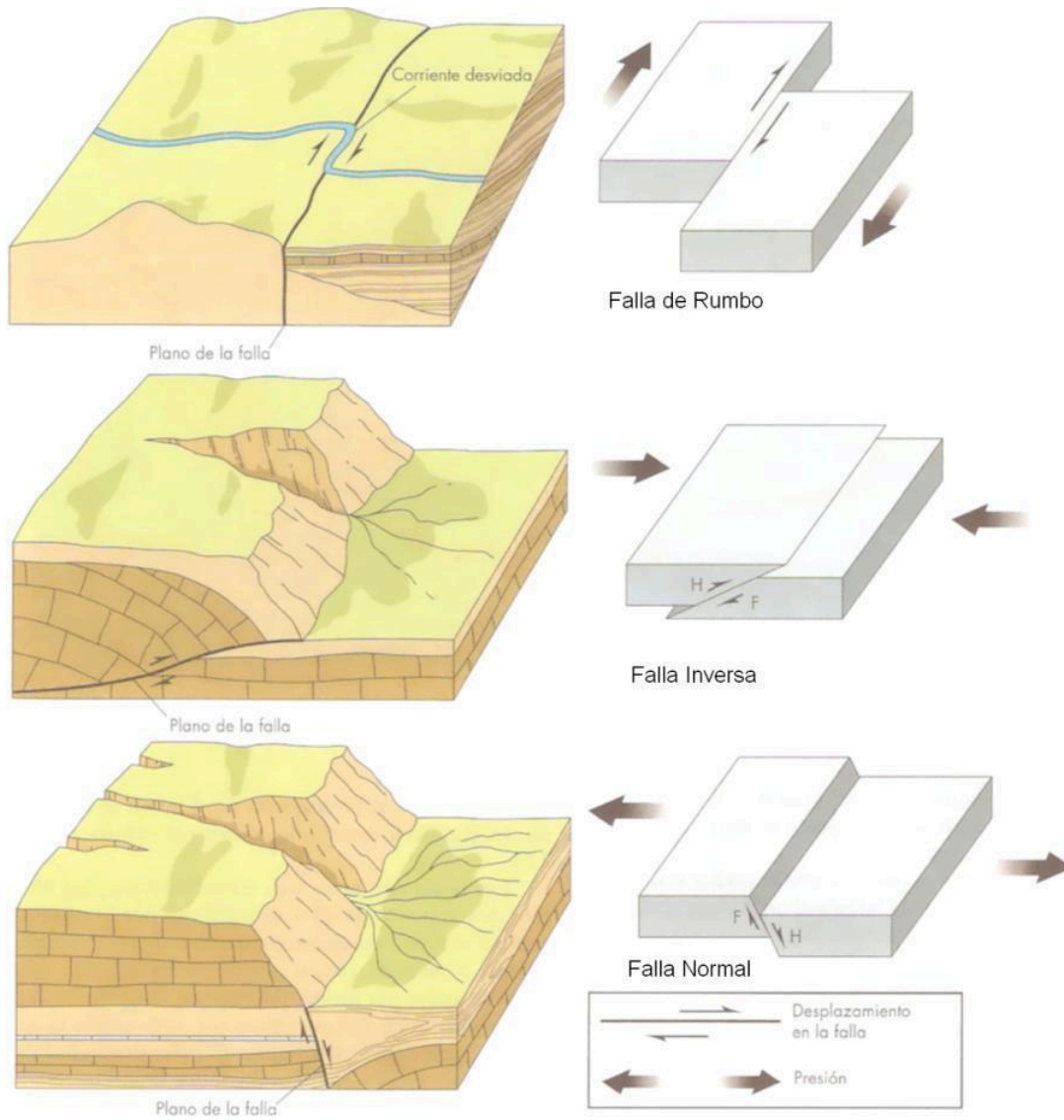
Fuente: Elaboración propia

Independientemente de la ubicación particular de uno u otro sismo, todos ellos corresponden a un desplazamiento violento paralelo al plano de falla que libera la energía acumulada en la interfaz. La energía que se acumula producto de la convergencia de placas, tanto en el contacto interplaca como en la corteza, en algún momento supera la resistencia de las rocas. En dicho instante se produce una ruptura que se propaga a través de un plano de falla, el que, de acuerdo a su geometría, generará diferentes tipos de movimientos (Figura 8-8). A su vez, esta ruptura conlleva una liberación de energía que se propaga por medio de ondas sísmicas.

Las ondas que transmiten la energía sísmica se agrupan en dos tipos principales: ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las primeras se dividen en ondas P (compresivas) y ondas S (ondas de corte o de cizalle), mientras que las segundas se dividen en ondas Rayleigh y Love (Figura 8-9). En las ondas P el movimiento de partículas se produce en forma paralela al de la propagación de la onda y en las ondas S es en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las ondas Rayleigh tienen un movimiento oscilatorio elíptico y las ondas Love tienen un movimiento oscilatorio horizontal. Con respecto a su impacto en superficie, debido a que las ondas S transportan la mayor cantidad de energía y a que las ondas superficiales tienden a tener movimientos de mayor frecuencia, ambos tipos corresponden a los de carácter más destructivo del movimiento sísmico. Aun así, a medida que las ondas se alejan de la fuente van perdiendo o disipando energía, siendo cada vez menos destructivas, fenómeno que se conoce como atenuación.

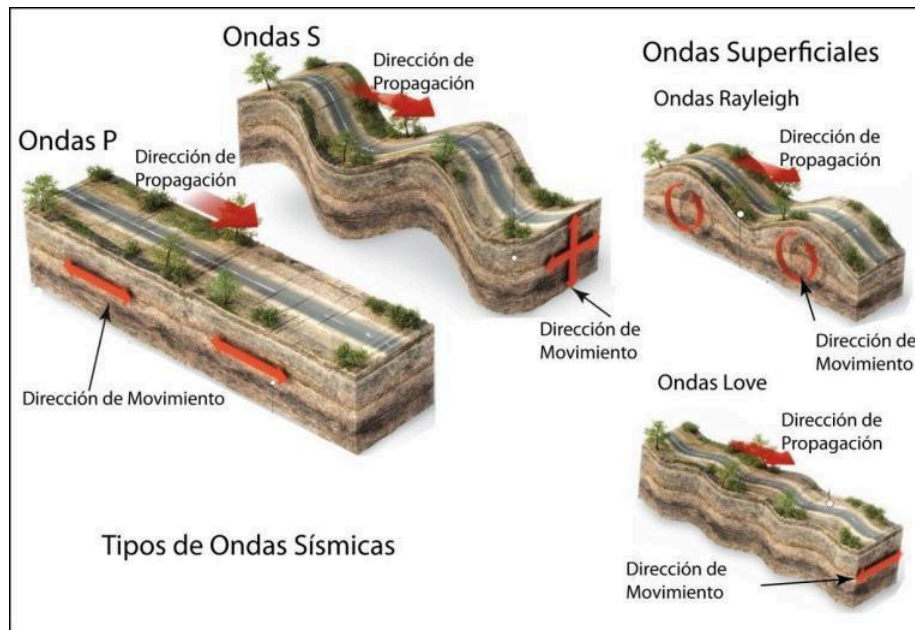
Para medir los sismos se utilizan, principalmente, dos escalas: *magnitud* e *intensidad*. La *magnitud* es una medida única y objetiva, que normalmente se relaciona con la escala de RICHTER (M_s). Actualmente para grandes sismos se utiliza la escala de magnitud de momento (M_w) que se calcula a partir del tamaño de la zona de ruptura y el desplazamiento medido para un sismo ocurrido, y da cuenta de la energía total liberada por el evento. La *intensidad* es una medida subjetiva del impacto de un sismo sobre la población, en términos de percepción humana del evento y sus efectos en la infraestructura. Este parámetro se mide en la escala de MERCALLI-CANCANI, denominada también como Modificada de Mercalli (M.M.).

Figura 10-8 Tipos de falla y esfuerzos asociados



Fuente: Keller y Blodgett (2004)

Figura 10-9 Tipos de ondas sísmicas



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008)

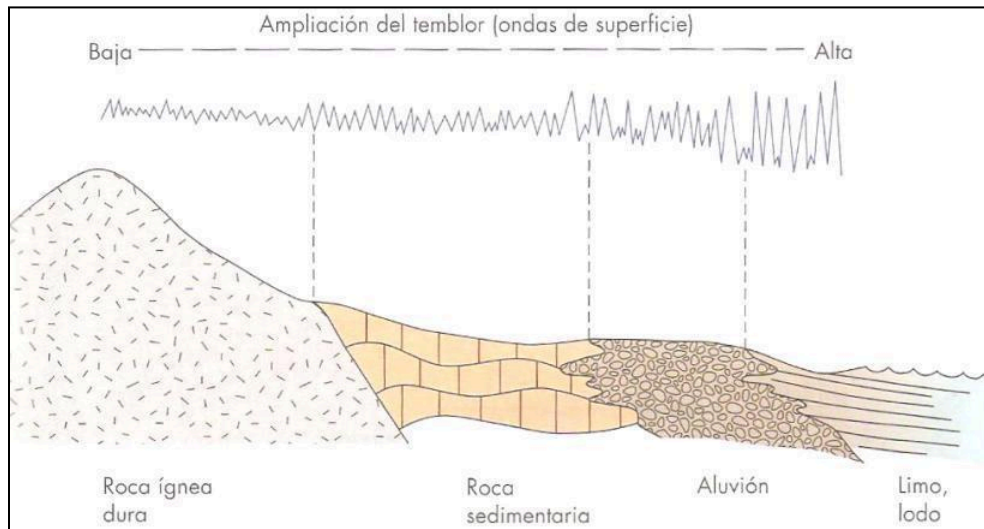
Finalmente, debe destacarse el llamado "efecto sitio", que indica un condicionamiento de carácter local bajo el cual para un mismo terremoto y dependiendo del tipo de terreno donde uno se encuentra ubicado, las ondas sísmicas pueden amplificarse durante el desarrollo del terremoto (Figura 8-10).

El principal efecto asociado a la ocurrencia de sismos son fuertes movimientos del terreno, que originan un peligro directo sobre las estructuras y sobre las personas, debido a las fuertes aceleraciones generadas por las ondas sísmicas. Sumado a lo anterior, la ocurrencia de estos fenómenos es generalmente sin previo aviso, por lo que la única manera de mitigar el riesgo es con campañas de educación y estrictas normas de construcción. Muchos de estos fenómenos son acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías. Esto implica en una alta vulnerabilidad estructural, económica y social. Particularmente con respecto a esta última se deben mencionar las potenciales pérdidas de vidas humanas y heridos por el derrumbe de estructuras, además de la vulnerabilidad a enfermedades gastrointestinales y epidemias por el colapso de los sistemas sanitarios y de conectividad, entre los innumerables efectos adversos para la sociedad que provocan este tipo de fenómenos.

Más allá de los efectos directos mencionados anteriormente, los sismos pueden también inducir la ocurrencia de otros fenómenos, como es el caso de procesos de remoción en masa (caídas de bloques y deslizamientos), maremotos y licuefacción.

Los deslizamientos y derrumbes se dan en diversos tipos de suelos y bajo variadas condiciones sismotectónicas, incluso se han detectado en sismos de grado $M_w = 4.0$. La cantidad y severidad de estos están en directa relación con la cercanía al epicentro y la magnitud del evento causante (Keeper (1984); Sepúlveda, et al. (2005); (2010). Sea cual sea su origen, los deslizamientos y derrumbes están asociados principalmente a tres factores: las pendientes del terreno, la resistencia mecánica de los materiales involucrados y antecedentes de eventos anteriores (Centeno, et al. (1994); Sancho (1997)). Para más detalle acerca de estos procesos ver el Anexo 8.1.2 "Procesos de remoción en masa".

Figura 10-10 Amplificación de la vibración generada por un terremoto



Fuente: Keller y Blodgett (2004)

Los maremotos o tsunamis corresponden a una ola o un grupo de olas de gran energía y tamaño que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua y en aproximadamente un 90% de los casos, estos fenómenos son provocados por terremotos. La energía de un maremoto depende de su altura (amplitud de la onda) y de su velocidad, y estará asociada a la magnitud del evento que lo generó.

Otro proceso que se asocia comúnmente a la actividad sísmica es la licuefacción del terreno, que corresponde al fenómeno donde un material sólido saturado en agua se comporta como líquido a causa de la intensa vibración. Las ondas sísmicas hacen aumentar la presión de agua presente en el sedimento, de forma que los granos de arena o limo pierden el contacto entre ellos causando una pérdida de resistencia del sólido y permitiendo que el depósito pueda fluir. Bajo estas condiciones, el suelo puede perder su capacidad de soporte de estructuras, producir deslizamientos (incluso en superficies con muy bajas pendientes) y formar volcanes de arena. Muchos de estos fenómenos son acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías.

Para la ocurrencia de licuefacción se requiere de tres factores (Martin & Lew, 1999):

- Depósitos o suelos, granulares poco consolidados (suelos y no cementados) de tamaño fino a medio (limo a arena, aunque en algunos casos se ha presentado en arcillas y en gravas). Típicamente pueden ser rellenos artificiales, especialmente aquellos creados por relleno hidráulico (ej. puertos y tranques de relaves), depósitos eólicos (dunas), depósitos de playas o de cursos de agua lo suficientemente jóvenes para estar sueltos. Los suelos con partículas de diferentes tamaños son menos propensos a sufrir licuefacción, debido a que las partículas menores tienden a rellenar los espacios entre las mayores, reduciendo así la tendencia a densificación del suelo y evitando los efectos del aumento de presión de agua. También influye la forma de las partículas que conforman el suelo, siendo un depósito de partículas redondeadas más susceptible de sufrir licuefacción.
- Saturación de los depósitos por aguas subterráneas, el agua debe rellenar los espacios entre los granos de limo o arena. Puede producirse en zonas donde el nivel de agua subterránea es somero como en desembocadura de cursos de agua, humedales, pantanos, vegas y zonas costeras.
- Fuertes movimientos sísmicos, durante los cuales las ondas sísmicas aumentan la presión del agua contenida en los depósitos. Cabe destacar, que todo Chile, en especial desde la península de Taitao al norte, tiene el potencial de ser afectado por grandes terremotos.

10.3 Bibliografía

Antinao, J., Fernández, J., Naranjo, J. & Villarroel, P., 2002. Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental, No. 2, 1 mapa escala 1:100.000.

Centeno, J., Fraile, M., Otero, M. & Pividal, A., 1994. Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental.. Madrid: Ed. Rueda.

Costa, J., 1984. Physical geomorphology of debris flows. In Developments and Applications of Geomorphology. En: J. E. Costa & P. J. Fleisher, edits. Developments and Applications of Geomorphology. Berlin: Springer-Verlag, pp. 268-317.

Cruden, D. & Varnes, D., 1996. Landslide types and processes, Washington D.C.: Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board.

DeMets, C., Gordon, R., Argus, D. & Stein, S., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. Geophysical Research Letters, 21(20), pp. 2191-2194.

Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. & Lloremte-Isidro, M., 2008. Mapas de Peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia No. 1, 190 pág.

González-Ferrán, O., 1995. Volcanes de Chile. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 410 pág.

Hauser, A., 1985. Flujos aluvionales de 1870 y 1896 ocurridos en la ladera norte del volcán Yates, X Región: su importancia en la evaluación de riesgos naturales. Revista Geológica de Chile, Volumen 25-26, pp. 125-133.

Hauser, A., 1997. Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 49, 47 pág.

Hauser, A., 2000. Remociones en masa en Chile. 2da ed. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 59, versión actualizada, 89 pág.

Iida, K., 1963. A relation of earthquake energy to tsunami energy and the estimation of the vertical displacement in a tsunami source. Journal of Earth Science, 2(1), pp. 49-67.

Inamura, A., 1942. History of Japanese Tsunamis. Kayo-No-Kagaku, Volumen 2, pp. 74-80.

Inamura, A., 1949. List of Tsunamis in Japan. Journal of Seismological Society of Japan, Volumen 2, pp. 23-28.

Keeper, D., 1984. Landslides caused by earthquakes. Geological Society of América Bulletin, 95(4), pp. 406-421.

Keller, E. & Blodgett, R., 2004. Riesgos Naturales. Madrid: Pearson Education S.A., 448 pág.

Martin, G. & Lew, M., 1999. Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117: Guidelines for Analyzing and Mitigating Liquefaction Hazards in California. Los Angeles: Southern California Earthquake Center, University of Southern California, 63 pág.

Myers, B. & Brantley, S., 1995. Hazardous phenomena at volcanoes, Vancouver, Washington.: USGS Open File Report, pág. 95-231.

Naranjo, J. A., 1987. Interpretación de la actividad cenozoica superior a lo largo de la Zona de Falla de Atacama, norte de Chile. Revista Geológica de Chile, Issue 31, pp. 43-55.

Naranjo, J. & Varela, J., 1996. Debris and mud flows that affected the eastern area of Santiago on May 3, 1993, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín No. 47, 42 pág.

Natural Resources Canada, 2011. Natural Resources Canada. [En línea]. Available at: <http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/english/maps/environment/naturalhazards/tsunami/1> [Último acceso: 25 11 2011].

Pierson, T. & Scott, K., 1985. Downstream dilution of Lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Research*, 21(10), pp. 1511-1524.

PMA-GCA, 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p..

Sancho, C., 1997. Los mapas de riesgos. En: J. Peña, ed. Cartografía geomorfológica básica y aplicada. Zaragoza: Geomorfa, pp. 181-200.

Scholz, C., 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 439 pág.

Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R. & Petley, D., 2005. Seismically-induced Rock Slope Failures Resulting from Topographic Amplification of Strong Ground Motions: The Case of Pacoima Canyon, California. *Engineering Geology*, Volumen 80, pp. 336-348.

Sepúlveda, S. & Serey, A., 2009. Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the April 21, 2007 Aisén earthquake, southern Chile (45.5°S). *Andean Geology*, 26(1), pp. 131-136.

Sepúlveda, S. y otros, 2010. Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia. *Landslides*, pp. doi: 10.1007/s1034VI-010-0203-2.

Sruoga, P., 2002. El volcanismo reciente y riesgo asociado en la Provincia de Mendoza, Mendoza: IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales, pág. 255-259.

Varnes, D., 1978. Slope movement types and processes, Washington, D.C.: Special report 17VI: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board.

Watt, S., Pyle, D., Naranjo, J. & Mather, T., 2009. Landslide and tsunami hazard at Yate volcano, Chile as an example of edifice destruction on strike-slip fault zones. *Bulletin of Volcanology*, 71(5), pp. 559-574.

Western Washington University, 2011. RELIEF GLOBE SLIDES. [En línea]. Available at: <http://www.smate.wvu.edu/teched/geology/GeoHaz/global/globe-17.jpg>. [Último acceso: 28 11 2011].

Wiegel, R., 1970. Tsunamis. En: Wiegel et al., ed. *Earthquake Engineering*. Engelwood Cliffs: Prentice Hall, pp. 253-306.

11 Anexo C Revisión de antecedentes

Se revisaron los antecedentes entregados por la municipalidad de Villa Alemana, junto con información relevante relativa a la zona estudiada que se recopiló desde diversas fuentes. A continuación, se presenta un listado de los antecedentes revisados.

En cuanto a instrumentos de planificación, se revisaron los siguientes antecedentes:

Estudio Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana

- Plan Regulador Metropolitano de Valparaíso (PREMVAL). Gobierno Regional V Región de Valparaíso, 2014.
- Plan Regulador Comunal (PRC) de Villa Alemana, 2002.
- Enmiendas al Plan Regulador Comunal de Villa Alemana.
- INFORME “Actualización Plan de Desarrollo Comunal Villa Alemana 2017-2020”.

Con relación a la geología y geomorfología los siguientes documentos se consideraron como base para la elaboración de línea de base de geología, en donde se ajustaron a la escala adecuada para el estudio:

- Mapa Geológico de Chile: Versión digital. Publicación geológica digital N°4. Base geológica escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003).
- Mapa Geológico del área de Valparaíso – Curacaví. Regiones de Valparaíso y Metropolitana. Escala 1:100.000 (Gana, et al., 1996).

En resumen, la zona cuenta con información geológica y geomorfológica, pero no se tiene un nivel de detalle suficiente para la elaboración del estudio.

Los estudios hidrológicos que debieran constituir la base para el diagnóstico de los peligros son los siguientes:

- Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar, V Región (PM-03). Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), elaborado por GSI Ingenieros Consultores Ltda., 2001.
- Plan de Obras Públicas para el Gran Valparaíso. Diagnóstico y Plan. Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2006.

A la fecha de cierre de este informe, sólo se contaba con el segundo de estos estudios.

Con respecto a peligros de origen natural que han afectado o que potencialmente podrían afectar a la comuna o a zonas cercanas a ella, se identificaron los siguientes estudios:

- “Catástrofes en Chile 1541 – 1992” (Urrutia & Lanza, 1993)
- Sismo del 28 de marzo de 1965, Chile. Informe sobre daños en estructuras (Mongue, et al., 1965)
- Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile (SERNAGEOMIN, 2017)
- Terremotos y grandes temblores habidos en Chile (Taulis, 1938)
- “Programa de Resiliencia Climática Para el Área Metropolitana de Valparaíso” Estudios del Índice de Vulnerabilidad y Riesgo de Territorio del Área Metropolitana de Valparaíso al Cambio Climático e Identificación de las Respectivas Medidas de Adaptación. Corporación Andina de Fomento (CAF), Ministerio de Medio Ambiente (MMA), desarrollado por Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Universidad de Playa Ancha (UPLA), de Valparaíso (UV), Técnica Federico Santa María (UTFSM), consultora Suiza Ernst Basler – Partner (EBP), 2019.

Además, se recopilaron documentos en formato vectorial (Shapefiles y Geodatabase) que se utilizarán como base para la elaboración del estudio. Estos están relacionados con:

- División político-administrativa.
- Instrumentos de planificación territorial vigentes.
- Topografía morfometría (elevaciones, pendientes).
- Geología
- Sistema hídrico de la comuna (cauces naturales, canales artificiales, cuencas, embalses, etc.).
- Información climática.
- Hidrogeología.

- Peligros naturales existentes en la comuna (fallas activas, sismos,
- Vulnerabilidad.
- Riesgo.

A continuación, se presenta un resumen el contenido de cada uno de los antecedentes revisados.

11.1 Instrumentos de planificación

- **Plan Regulador Metropolitano de Valparaíso (Resolución 31/4/128 Gobierno Regional de Valparaíso. Valparaíso, Chile. 25 de octubre de 2013.**

En el En el territorio del Plan se establecen las siguientes áreas afectadas por riesgos de origen natural:

- Área de Riesgo Inundable o Potencialmente Inundable AR 1 (Artículo 46): El área de riesgo considera una franja de restricción de 50 m de ancho, medidos a cada costado desde el cauce habitual.
- Área de Riesgo Natural por Pendientes AR NP (Artículo 47): El área de riesgo corresponde a los territorios que presentan pendientes superiores al 40%.

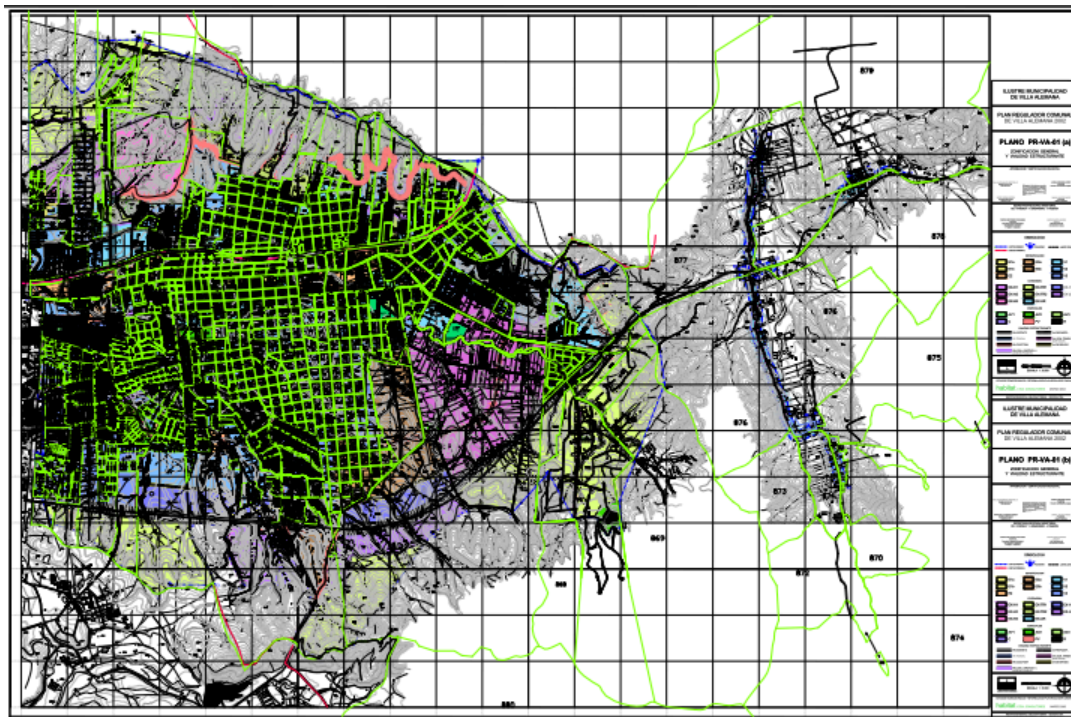
- **Plan Regulador Comuna (PRC) de Villa Alemana, 2002.**

En el artículo de la Ordenanza Local del PRC de Villa Alemana, 2002, se definen las áreas de restricción, según el siguiente detalle:

ARTICULO 16. AREAS DE RESTRICCIÓN (R en Plano PR-VA-01 (Figura 9-1). Las áreas de terreno que a continuación se identifican, deberán permanecer libres de edificación de cualquier tipo permitiéndose solamente áreas verdes, obras de protección de las aguas lluvias y las propias a la infraestructura vial:

- a) Las fajas de 5 metros de ancho mínimo a cada lado del eje de los acueductos y matrices principales de agua potable, colectores principales de alcantarillado de aguas servidas y todos los cauces pluviales graficados en el Plano PR-VA 01. Los nuevos trazados de estas obras y el ancho definitivo de la faja de restricción de ellos serán establecidos por los organismos técnicos competentes, de acuerdo a la legislación vigente.
- b) Las fajas de diversos anchos definidos en el Artículo 36 del Plan Intercomunal de Valparaíso y modificación posterior, respecto de las Quebradas.
- c) Las fajas de 20 metros de ancho mínimo a cada lado del eje de las líneas eléctricas de alta tensión. La ubicación, delimitación y ancho definitivo de dichas fajas, serán los establecidos en la legislación vigente sobre Servicios Eléctricos.
- d) Las áreas correspondientes al cauce de los esteros “Quilpué” y “Lo Godoy”, cuya delimitación específica será la que determine la Dirección General de Aguas.
- e) Las fajas de aprox. 35 m. a cada lado de la faja de 40 m. correspondiente al trazado de la vía expresa 2B-1. La ubicación precisa, delimitación y ancho definitivo de dichas fajas, serán los establecidos por los Proyectos Oficiales correspondientes aprobados por el M.O.P.

Figura 11-1 Plano PR-VA-01



Fuente: Plan Regulador Comunal de Villa Alemana, 2002. Ilustre Municipalidad de Villa Alemana

- **Enmiendas al Plan Regulador Comunal vigente**

No se encontraron antecedentes relativos a modificaciones en las áreas de riesgo

- **Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) 2017 – 2020 Comuna de Villa Alemana. Ilustre Municipalidad de Villa Alemana.**

El PLADECO señala que los sectores rurales más destacados corresponden a las principales quebradas y cursos de agua que atraviesan la comuna. Así son relevantes, la quebrada Escobares y El Patagual, al oriente de la zona urbana.

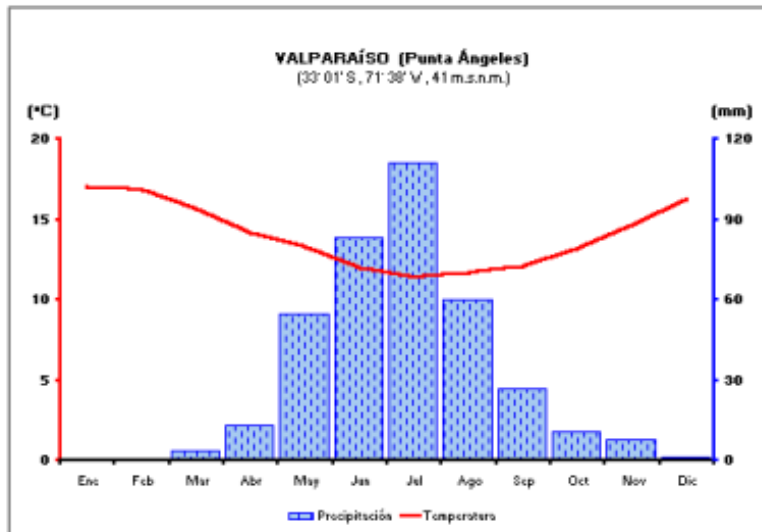
Respecto de las condiciones climáticas, señala que Villa Alemana se caracteriza por presentar un clima, en palabras de los vecinos “muy benigno”. En general presenta las características propias de un clima mediterráneo, con estación seca prolongada y con lluvias concentradas en invierno.

Por su ubicación, cercana a la costa, las temperaturas son reguladas por el efecto del mar (regulador térmico), por lo que las temperaturas no son tan extremas como en el valle central (amplitud térmica), en comparación a ciudades como Los Andes y Til Til y Lampa, en la Región Metropolitana, ubicadas aproximadamente en la misma latitud, pero hacia el interior, en laderas de sotavento.

Para caracterizar la temperatura y precipitaciones (Figura 9-2), se utilizan los datos normalizados publicados por la Universidad Católica en el la página web Cartografía Interactiva, de la Estación Punta Ángeles de Valparaíso (27 km de distancia), toda vez que dicha estación representa de mejor forma la situación climática de la comuna, puesto que Villa Alemana se ubica en una zona de transición entre un clima Csb_n y Csb, ambos mediterráneos, pero el primero se diferencia por la mayor presencia de neblinas costeras y precipitaciones.

Las precipitaciones se concentran en los meses invernales, con una media acumulada anual del orden de los 372,5 mm, y con una temperatura media anual del orden de los 16 °C.

Figura 11-2 Temperatura y precipitaciones normalizadas



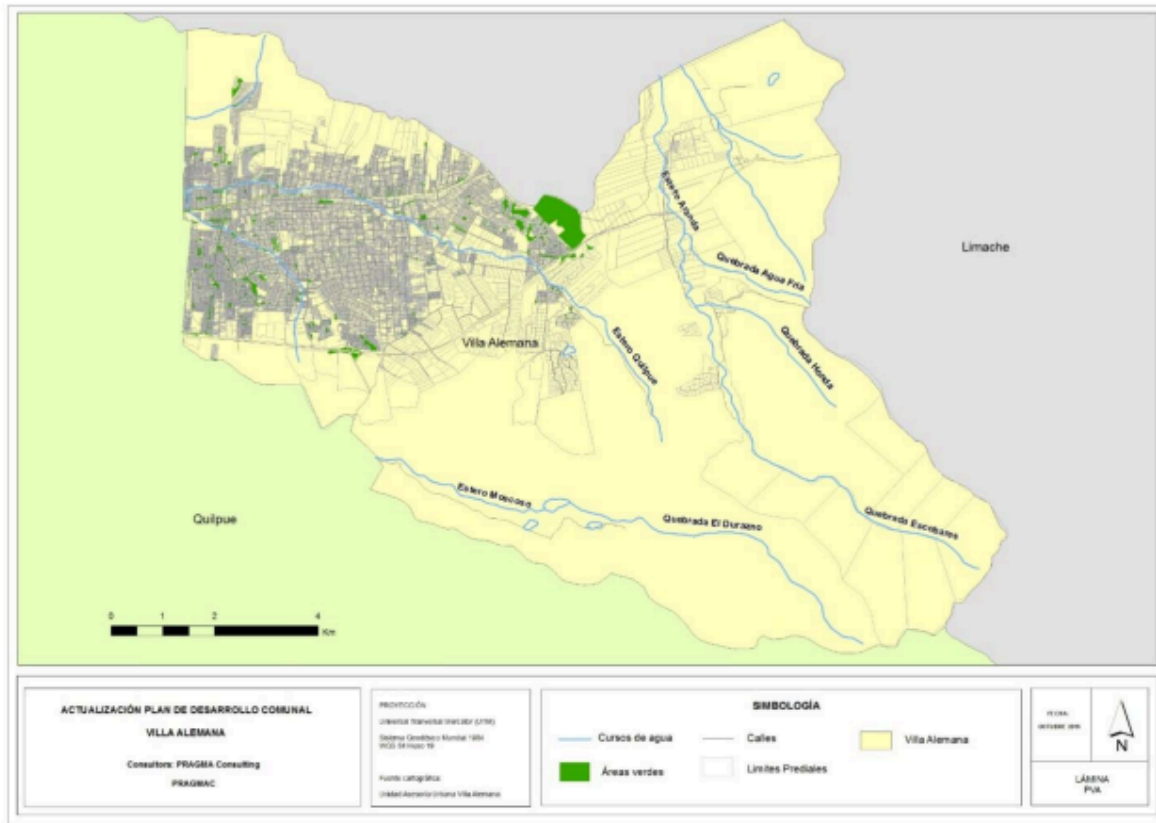
Fuente: PLADECO 2017 – 2020 Villa Alemana

Respecto de los antecedentes hidrográficos (Figura 9-3), se señala que la red hídrica de la comuna está constituida por cursos de agua que nacen en las vertientes occidentales de la Cordillera de la Costa, con regímenes de alimentación pluvial. Estos cursos de agua alimentan los principales esteros, que finalmente dan forma al Estero Marga – Marga.

El Estero de Quilpué, el principal curso de agua que atraviesa la comuna de oriente a poniente, tiene sus nacientes en el sector de Rinconada y como toda la red hídrica de la zona, al ser de alimentación pluvial, su caudal está estrechamente condicionado por las precipitaciones, por lo que tiene un carácter intermitente.

Los esteros, al cruzar las áreas urbanas, presentan problemas de mantención y acumulación de basuras y desechos, por lo que la municipalidad de manera periódica realiza operativos de limpieza, de manera tal de prevenir inundaciones.

Figura 11-3 Red Hídrica Principal Villa Alemana



Fuente: PLADECO 2017 – 2020. Comuna Villa Alemana

Otro de los recursos de agua que se desarrollan en la comuna es el estero Aranda, Quebrada Agua Fria, Quebrada El Durazno y el Estero Lo Moscoso.

El estero Pejerreyes recoge agua de los cerros que rodean Villa Alemana por el sector norte, también de régimen pluvial y aporta al estero Quilpué en el sector El mirador.

Sobre los principales riesgos, señala que la urbanización genera las condiciones adecuadas para la existencia de riesgo, por ejemplo, cuando se urbaniza en sectores de borde de cauces de río, en laderas inestables o en áreas de peligros de volcanes activos, evidentemente la exposición a un peligro de la naturaleza se incrementa. Es justamente allí, en donde se deben concentrar los esfuerzos en el ámbito del desarrollo local, en términos de establecer políticas (decisiones) claras y consistentes, en torno a la gestión del riesgo de desastre. Es por esto, que es necesario al menos, identificar cuáles son las principales amenazas y situaciones de riesgo que afectan a la comuna de Villa Alemana, de manera tal de considerar antecedentes para la planificación de acciones y lineamientos en la materia, en el Plan de Desarrollo Comunal.

Respecto de las inundaciones, se señala que las inundaciones fluviales y el anegamiento de calles constituyen una de las mayores problemáticas que afectan a la comuna. Al revisar la prensa, se encuentran noticias desde el año 2006 a la fecha, en donde se da cuenta de la inundación de los pasos peatonales bajo nivel de la línea férrea, poblaciones y puntos bajos de la comuna.

Es por esto, que el MOP y la Municipalidad han realizado inversiones en la construcción de sumideros, canalización y limpieza de quebradas y esteros, de manera de prevenir las inundaciones. No obstante, dado

Estudio Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana

la ubicación de la comuna, en una cuenca hidrográfica pequeña, de régimen de alimentación exclusivamente pluvial, las precipitaciones intensas concentradas en 24 horas inevitablemente ocasionan inundaciones.

El fenómeno de las inundaciones en la comuna de Villa Alemana es una situación tan recurrente, que, “a pesar de los 147 millones de pesos invertidos por el MOP, para el encauce de las aguas lluvias y así evitar las posibles inundaciones en las comunas de Quilpué y Villa Alemana, el problema persiste tal como ha ocurrido los últimos 35 años, es decir, cada vez que llueve con fuerza, se inundan los mismos sitios. Un clásico es la calle Ramón Ángel Jara, cuyas primeras cuadras colapsan, anegando casas y jardines del sector, tal como ocurrió este sábado con la fuerte lluvia caída las primeras horas de la mañana” (<https://www.loginregional.cl>: mayo de 2016).

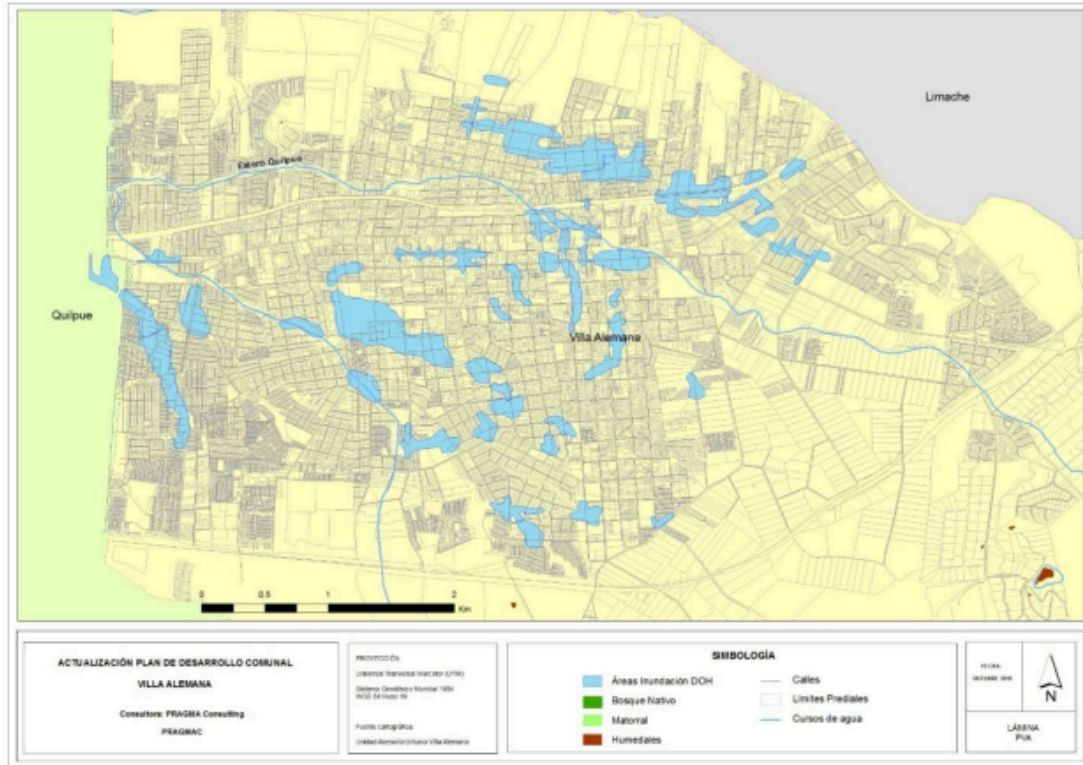
Unos de los sectores más afectados corresponden a las viviendas de la Villa El Quillay, dado que se generan problemas de filtración e inundación.

Las principales áreas de riesgo de inundación corresponden a zonas adyacentes a cauces de esteros y quebradas y, tal como fue indicado, a pasos bajo nivel que atraviesan la línea férrea y puntos bajos dentro de la trama urbana de la ciudad.

Una de las principales causas que contribuyen a las inundaciones, es que la comunidad arroja basura, escombros y distintos desechos a los lechos de los cursos de agua, lo que ocasiona inundaciones y anegamiento de áreas colindantes.

En el mapa que se presenta en la Figura 9-4 se grafican las principales áreas de inundación catastradas por la Dirección de Obras Hidráulica (DOH) en la comuna de Villa Alemana.

Figura 11-4 Principales Áreas de Inundaciones en la zona urbana de la comuna de Villa Alemana



Fuente: PLADECOS 2017 – 2020. Comuna Villa Alemana

11.2 Geología

- **Mapa Geológico de Chile: Versión digital. Publicación geológica digital N°4. Base geológica escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003)**

En este documento se presenta la geología de Chile a escala 1:1.000.000. Se señala que la comuna de Villa Alemana se encuentra inserta en la Cordillera de la Costa, en un área dominada por rocas intrusivas de edad Jurásica. A escala más local, Villa Alemana se encuentra sobre depósitos sedimentarios no consolidados (aluviales, coluviales y de remoción en masa) de edad Pleistocena-Holocena.

- **Mapa Geológico del área de Valparaíso – Curacaví. Regiones de Valparaíso y Metropolitana. Escala 1:100.000 (Gana, et al., 1996)**

En este documento se presenta la geología de la totalidad de la comuna a escala 1:100.000. Según este documento, los cerros que rodean la comuna corresponden a intrusivos de edad Jurásica y las áreas más planas se asocian a depósitos aluviales y coluviales de edad Pleistocena-Holocena.

11.3 Hidrología

- **Plan de Obras Públicas para el Gran Valparaíso. Diagnóstico y Plan. Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2006.**

El Plan de Obras Públicas para el Gran Valparaíso señala que el sistema de drenaje natural de las ciudades de Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana está constituido por el estero de Viña del Mar y sus afluentes (esteros Quilpué y Marga-Marga). En los márgenes del estero Quilpué se ha concentrado gran parte del crecimiento urbano. En cuanto al impacto de estas ciudades en los cauces receptores, el régimen de los esteros presenta alta variación, deterioro significativo y problemas de erosión, asociados a los mayores caudales debido a la condición urbana de las zonas aportantes.

En general, los problemas de inundación se producen debido no sólo a la existencia de puntos ciegos en las ciudades, sino también a la incapacidad de los colectores dispuestos para darle continuidad a las quebradas altas que fueron borradas hacia abajo. En cuanto a las precipitaciones, el agua promedio caída al año es de alrededor de 390 mm repartidos en 32 días en promedio. Anualmente, el 75% de los días con lluvia llueve menos de 10 mm, mientras que poco más del 2% lo hace con precipitaciones superiores a los 50 mm. Si bien no es una zona de pluviometría importante, las intensidades máximas de corta duración pueden generar problemas de erosión en laderas y cerros como se ha observado en eventos extremos.

Respecto del Plan Maestro del Gran Viña del Mar (ciudades de Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana), señala que el diagnóstico reveló una serie de puntos a sanear en las diferentes ciudades (en Villa Alemana se identificaron 27 puntos de inundación). En cuanto al sistema de Villa Alemana, señala que el Plan Maestro del Gran Viña del Mar estimó que es insuficiente en su extensión y capacidad de porteo y requiere de una revisión.

Finalmente, se señala que en el área de Villa Alemana los mayores requerimientos tienen que ver con la solución de los cauces de los esteros, minimizando el riesgo de crecidas, lo que no forma parte del Plan Maestro de Aguas Lluvias. Sin embargo, señala que se dispone de estudios que proponen y cuantifican algunas soluciones, como el estudio para el estero Quilpué (Arrau, 1998) que recomienda peraltar riberas y definir adecuadamente su sección.

11.4 Peligros Naturales

- **“Catástrofes en Chile 1541 – 1992” (Urrutia & Lanza, 1993)**

Este libro es una recopilación de antecedentes bibliográficos relativos a catástrofes que han afectado a Chile a lo largo de su historia, donde se describe lo que ocurrió, los efectos de los peligros, los costos económicos

de estos efectos y las consecuencias políticas, entre otros. No se incluye aquí una descripción completa del contenido, pero si se ha incorporado en el catastro de peligros.

- **Sismos del 28 de marzo de 1965, Chile. Informe sobre daños en estructuras** (Mongue, et al., 1965)

Se describen los efectos del sismo de 1965 en función de la ciudad donde se emplazan las obras, los tipos de estructuras y de los materiales utilizados para la construcción. Además, se describen peligros que afectaron a sectores puntuales (deslizamientos, rodados, etc.). Además, se incluyen una serie de recomendaciones respecto de la construcción de diferentes obras.

No aparecen menciones a daños en Villa Alemana, pero si en Quilpué (Iglesia Parroquial) y en un estanque de aguas ubicado en Achupallas y un talud de agua ubicado entre Viña del Mar y Quilpué, además de otras menciones en Viña del Mar y Valparaíso.

- **Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile** (SERNAGEOMIN, 2017)

Este documento es una descripción de peligros de origen natural que han afectado a diferentes zonas del país desde al año 1980, donde se menciona sus efectos. Los datos relativos a la zona de estudio o cercanos a ella se han incluido en el catastro de peligros.

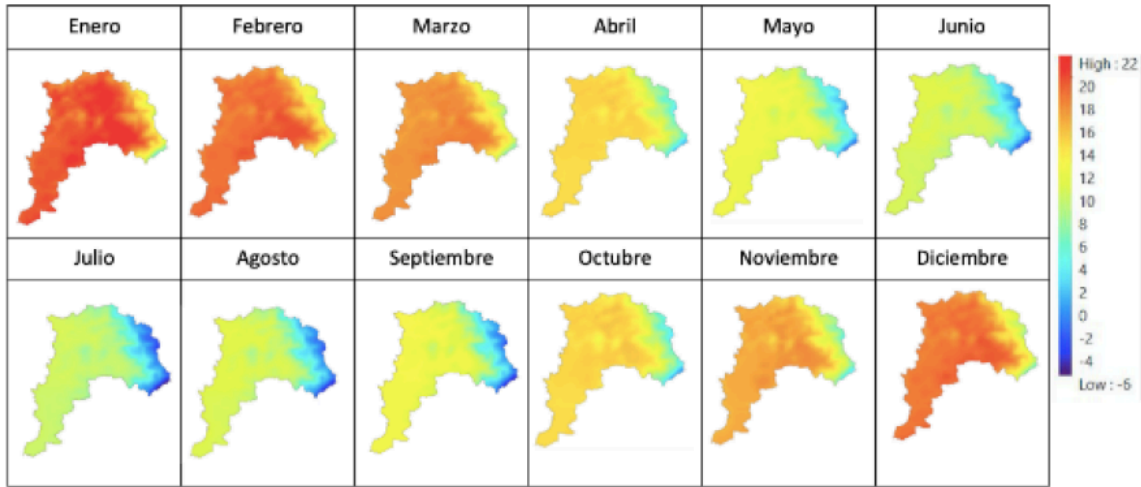
- **Terremotos y grandes temblores habidos en Chile** (Taulis, 1938)

Este documento presenta un catastro de los principales sismos que han afectado al país a lo largo de su historia, con una breve mención a sus efectos.

- **“Programa de Resiliencia Climática Para el Área Metropolitana de Valparaíso” Estudios del Índice de Vulnerabilidad y Riesgo de Territorio del Área Metropolitana de Valparaíso al Cambio Climático e Identificación de las Respectivas Medidas de Adaptación. Corporación Andina de Fomento (CAF), Ministerio de Medio Ambiente (MMA), desarrollado por Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Universidad de Playa Ancha (UPLA), de Valparaíso (UV), Técnica Federico Santa María (UTFSM), consultora Suiza Ernst Basler – Partner (EBP), 2019.**

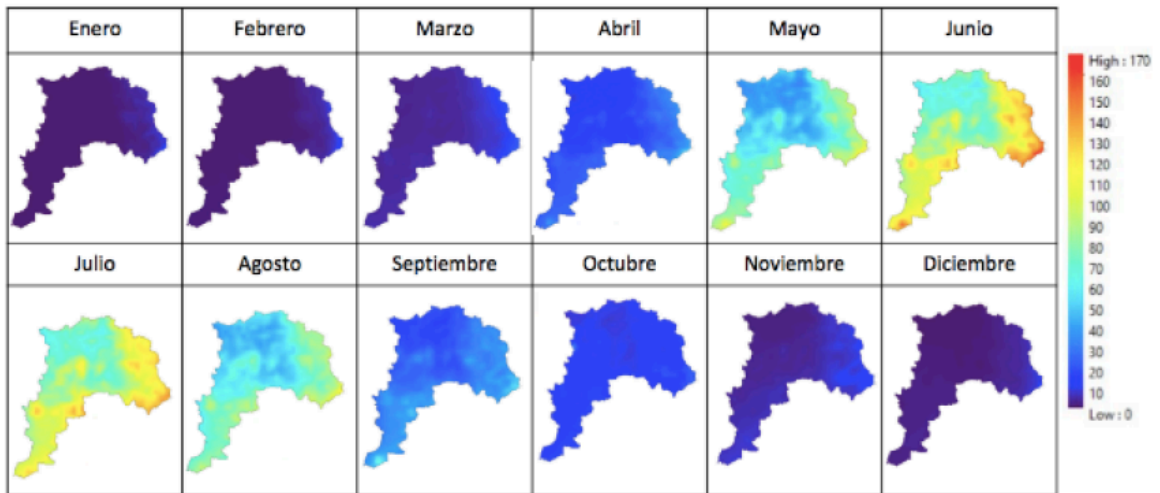
Se presenta un diagnóstico de estaciones monitoras de variables meteorológicas en el área Metropolitana de Valparaíso (AMV). Para el análisis de los datos de temperatura y precipitación dentro del área de estudio se realizó la búsqueda de estaciones que presentan medidas de temperatura máxima, media y mínima y de precipitación, utilizando entre ellas dos ubicadas en el área de estudio y dos en una zona interior cercana, a saber: Punta Ángeles (PA) y Lago Peñuelas (PE) en la Comuna de Valparaíso y las estaciones del Embalse Lliu-Lliu (LI) en la Comuna de Limache y de Quillota en la misma comuna. Las climatologías reafirman la marcada estacionalidad del área de estudio, con un período cálido y seco entre los meses de noviembre y marzo, mientras que uno húmedo y frío el resto del año (Figura 9-5 y Figura 9-6).

Figura 11-5 Ciclo anual de temperatura media para la región de Valparaíso en base al CR2MET



Fuente: “Programa de resiliencia climática para el Área Metropolitana de Valparaíso”

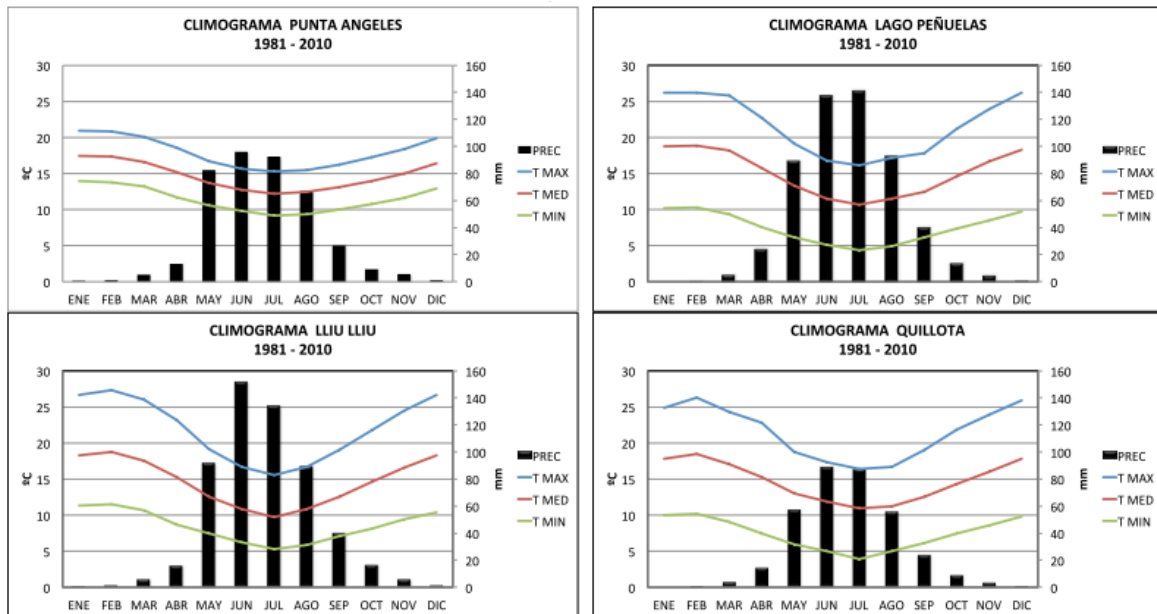
Figura 11-6 Ciclo anual de precipitaciones para la región de Valparaíso en base a CR2MET



Fuente: “Programa de resiliencia climática para el Área Metropolitana de Valparaíso”

Desde los registros de estaciones meteorológicas se analizó el ciclo estacional de temperatura y precipitación. En general, la climatología de las estaciones reafirma el característico ciclo de temperaturas más bajas en los meses de junio a agosto mientras las más altas entre diciembre y febrero (Figura 9-7). La situación inversa ocurre para precipitación. La estación que más se diferencia en este grupo es Punta Ángeles (PA), donde la estacionalidad es menos marcada relativa a los registros de zonas interiores. Estos resultados sugieren que Punta Ángeles y Lago Peñuelas son registros que capturan el rango de climatologías presentes en el AMV.

Figura 11-7 Climogramas de temperatura y precipitación para Punta Ángeles, Lago Peñuelas, Lliu Lliu y Quillota.



Fuente: “Programa de resiliencia climática para el Área Metropolitana de Valparaíso”

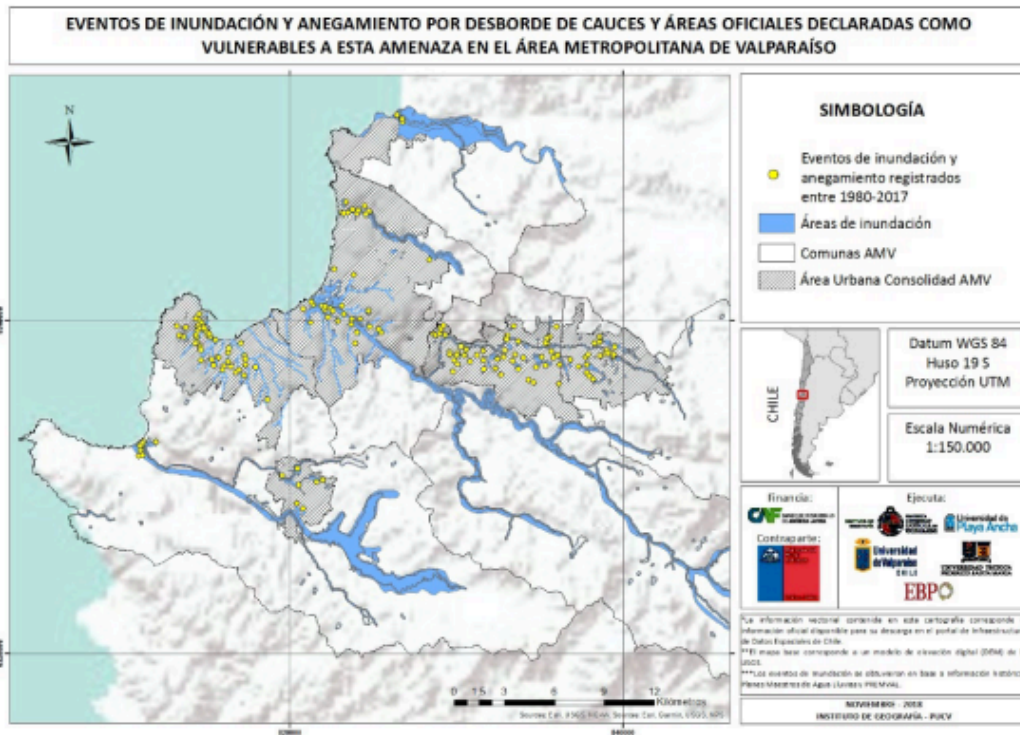
Respecto de las inundaciones, se señala que las inundaciones y anegamientos son uno de los eventos más recurrentes en el Gran Valparaíso, que se presentan con distintos niveles de impacto, acorde fundamentalmente al nivel de las precipitaciones.

Se señala que el estudio Análisis de los desastres socio - naturales en la ciudad de Valparaíso, González M. 2009, establece que, de acuerdo a las estadísticas meteorológicas de eventos ocurridos entre 1958 y 2005, toda vez que las lluvias superaron los 55 mm de agua caída en un periodo 24 horas, así como cuando ocurrieron precipitaciones continuas que alcanzaron 114 mm o más de precipitación total, se generaron inundaciones y anegamientos que registraron daños importantes a la integridad de las personas (heridos y/o muertos) daño y destrucción de viviendas, afectación al comercio, interrupción de servicios básicos, entre otros impactos.

Los eventos de mayor magnitud, están asociados a temporales de lluvias muy intensas y de varios días de duración que generan inundaciones y anegamientos en las zonas urbanas y remociones en masa, tanto por el desborde de los cauces más significativos de la zona, que son básicamente los esteros Viña del Mar, Quilpué, Marga - Marga y Reñaca y el Río Aconcagua en su desembocadura, como por problemas de permeabilidad debido a la pérdida de superficies naturales y la propia saturación de los suelos, lo cual genera aumentos en el escurrimiento de las aguas. Otro factor asociado a las inundaciones y anegamientos son las deficiencias, ausencia o mal manejo de los sistemas de drenaje urbano y la intervención en las quebradas y cauces.

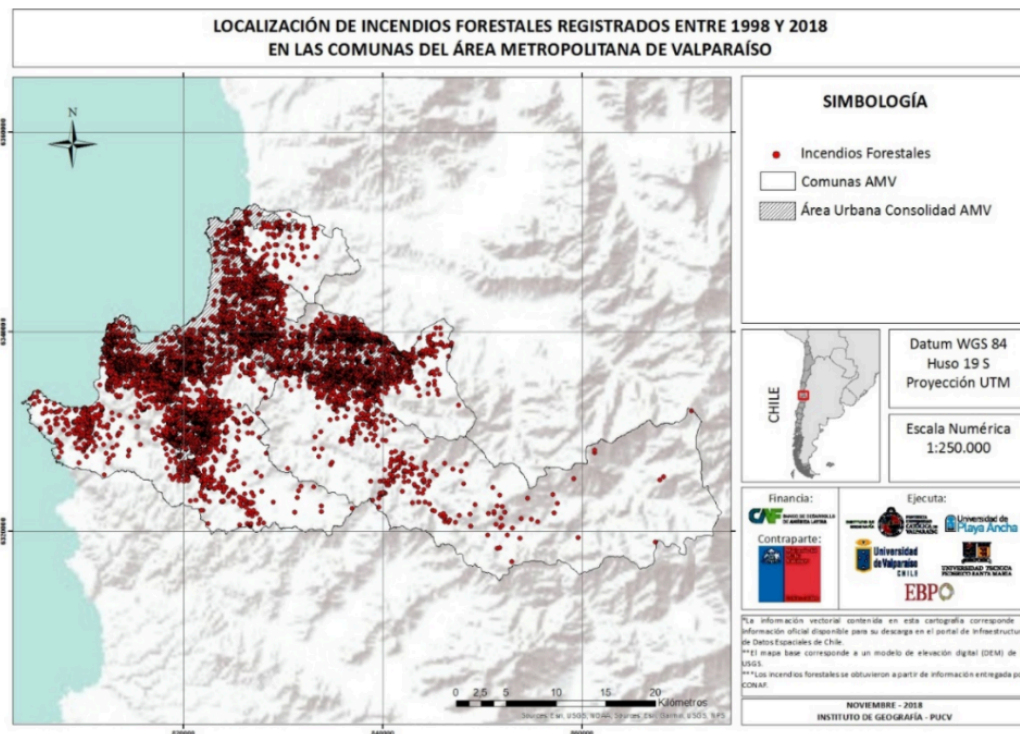
Respecto a las áreas susceptibles de inundación estas se encuentran en los bordes de los cauces principales de las comunas del AMV. Se realizó una figura con áreas de inundación por desborde de cauces, elaborada con base al Plan Maestro de Aguas Lluvias y PREMVAL (Figura 9-8).

Figura 11-9 Eventos de inundación y anegamiento en el AMV entre el año 1980 y 2017.



Fuente: “Programa de resiliencia climática para el Área Metropolitana de Valparaíso”

Figura 11-10 Localización de incendios forestales en el AMV entre 1998 y 2018.



Fuente: “Programa de resiliencia climática para el Área Metropolitana de Valparaíso”

En cuanto a las sequías, el Gran Valparaíso ha registrado eventos de sequía prolongados desde el año 2010, que han afectado especialmente a las zonas rurales de la Provincia de Marga Marga. En este período, y hasta el año 2018, se han firmado decretos de escasez hídrica los años 2013, 2014, 2017 y 2018. Se proyecta que para las zonas centro y centro-norte ocurra un alza significativa en el número probable de eventos de sequía, identificándose incluso zonas de sequía permanente hacia fines de siglo.

Diversas investigaciones indican que la temperatura en el Área Metropolitana de Valparaíso estaría subiendo (Dirección Meteorológica de Chile, Universidad de Monash en Australia), lo que afectaría la mortalidad y la morbilidad. Junto con el aumento de temperatura, existe una clara relación entre la expansión de las áreas construidas, la ocurrencia de olas de calor y las islas de calor urbano en las ciudades (Hoffer et al., 2008).

- **Plan comunal de Protección Civil de Villa Alemana** (Altoya Ltda., 2018).

Este estudio identifica tres amenazas: incendios forestales, sismos y amenazas hidrometeorológicas.

Sobre los incendios forestales se señala que estos suelen afectar a Villa Alemana en época estival. En la región de Valparaíso, los incendios forestales son causados por el tránsito de personas, vehículos o aeronaves, intencionales o por actividades recreativas. No se dispone de estadística exclusiva para Villa Alemana.

En la comuna de Villa Alemana se cuenta con la siguiente información:

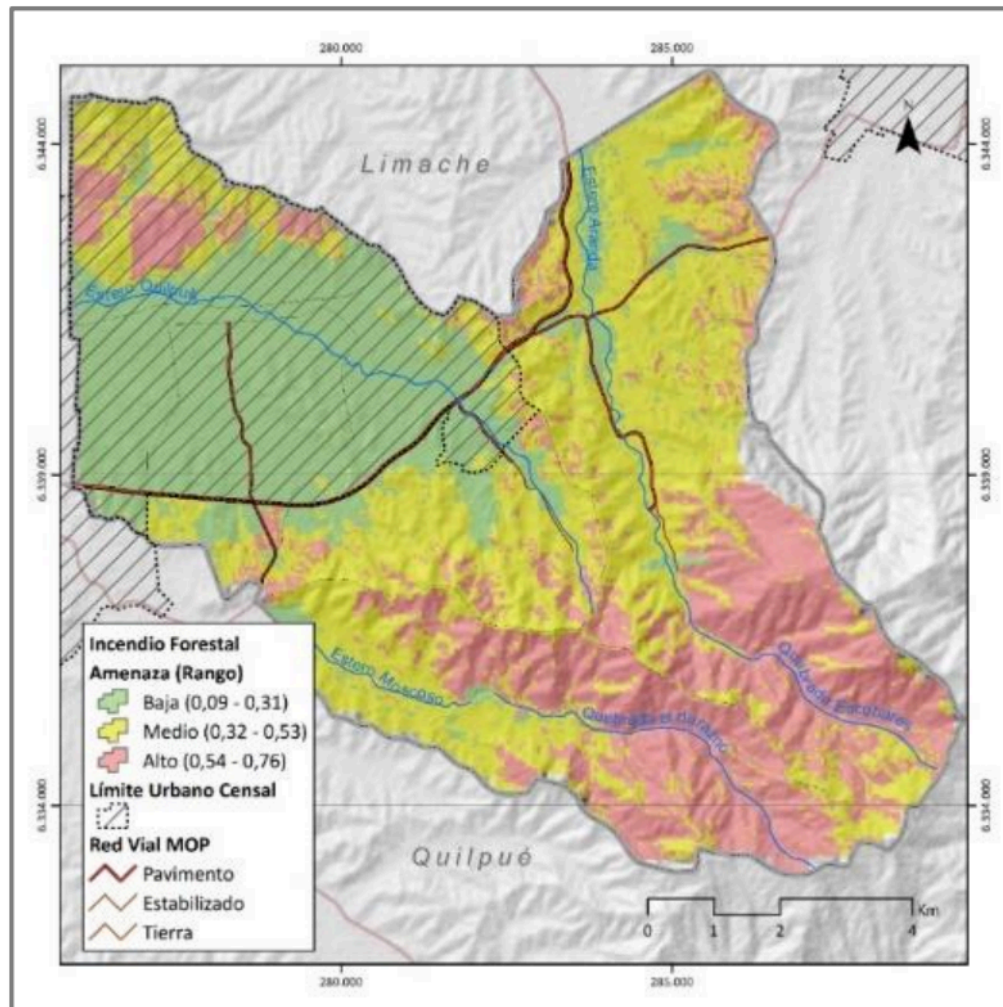
- La superficie afectada principalmente se encuentra cubierta por vegetación natural tipo arbolados, matorrales y pastizales (87% de la superficie afectada).
- Los focos de incendio entre los años 1985 y 2010 muestran que estos tienen su origen en la zona de interfase urbano-rural, al norte y al sur del área urbana, lo que ratifica la estadística respecto de la intencionalidad de los incendios.

A partir de múltiples factores (combustible disponible, clima, relieve y antecedentes históricos) se determina que, dentro del área urbana, la zona noroeste es la que presenta una mayor amenaza (Figura 9-11). Otros sectores que presentan una amenaza alta se encuentran alrededor de las quebradas Escobares y Durazno.

Esta zonificación permite establecer medidas de mitigación priorizadas por zona y nivel de amenaza de incendios forestales, lo que permite gestionar óptimamente los recursos con los que cuenta el municipio. Ejemplos de estas medidas corresponden a:

- Instruir a las comunidades cercanas acerca de las amenazas de incendios y tipos de medidas de autogestión y autoprotección pueden implementar para mitigar esta amenaza.
- Intervenir microbasurales partiendo por las zonas de máxima prioridad.
- Generar cortafuegos en las zonas de interface en donde la amenaza es mayor.
- Enfocar los recursos de limpieza y desmalezado de caminos en las zonas rojas.

Figura 11-11 Amenaza de incendio forestal en Villa Alemana.

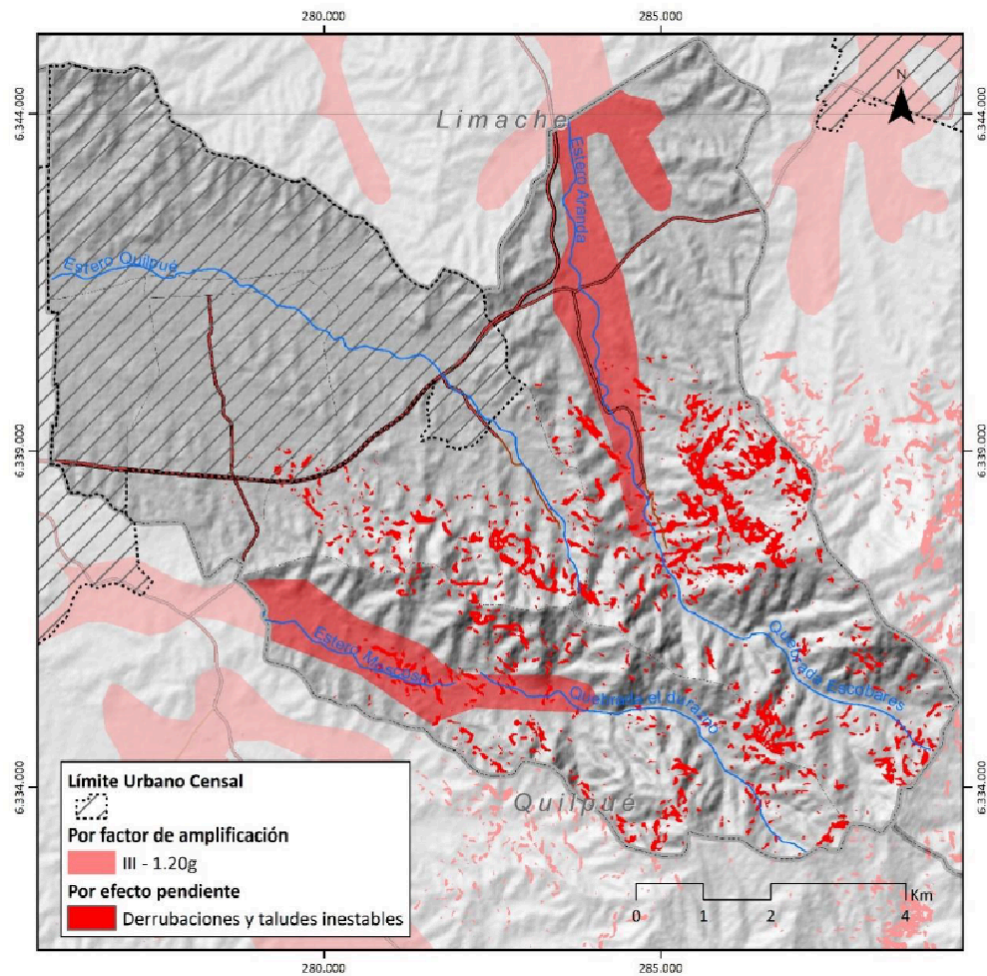


Fuente: Plan comunal de protección civil de Villa Alemana. Julio 2018

Respecto de la amenaza sísmica, Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica en el mundo. A escala de la comuna se cuenta con los siguientes antecedentes:

- Según la NCh 433, la comuna de Villa Alemana se sitúa en la zona sísmica 3, de mayor aceleración sísmica.
- Este estudio define una densidad de epicentros, y a partir de esto asigna una alta amenaza sísmica a la comuna.
- A partir de un sismo control (3 de marzo de 1985), la amplificación de la intensidad sísmica, estimada a partir de las formaciones geológicas de la comuna y de la NCh 433, la pendiente del terreno y las fallas geológicas presentes en la comuna, se zonificó la amenaza sísmica en la comuna (Figura 9-12).

Figura 11-12 Amenaza sísmica en Villa Alemana



Fuente: Plan comunal de protección civil de Villa Alemana. Julio 2018

Por último, con respecto a las amenazas hidrometeorológicas, se identifican tres cuencas principales (esteros Moscoso, Quilpué y Aranda), que nacen en la comuna y tienen régimen pluvial. Sobre estas y dos cuencas aportantes al estero Quilpué se analizó el peligro de inundación, considerando parámetros morfológicos de las cuencas y un análisis de curva número. De acuerdo con este análisis, las áreas de mayor amenaza se encuentran en la quebrada Escobares y en el casco urbano de la comuna.

11.5 Información vectorial

- Shapefiles

Tabla 11-1 Resumen de coberturas entregadas por la municipalidad (formato .shp)

Nombre shape	Información que contiene	Tipo de shape
Curvas.shp	Curvas de nivel de la comuna cada 10 m	Línea
DRENES.shp	Clasificación de hidrografía en esteros, quebradas embalses y laguna	Línea

Estudio Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana

Limite_comunal.shp	Límite comunal	Polígono
PRC.shp	Zonificación PRC Villa Alemana 2003	Polígono
Redes_de_agua.shp	Red de agua interna de Villa Alemana	Línea
Riesgos.shp	Clasificación de áreas de riesgo por terrenos en pendiente o por inundación	Polígono

- Geodatabase (BASE_RIESGO.gdb)

Tabla 11-2 Resumen de coberturas entregadas por la municipalidad (formato .gdb)

Nombre	Información que contiene	Tipo shape/raster
SISMOS_SOBRE_4	Catastro de sismos de magnitud sobre 4, donde se indica ubicación epicentro, profundidad, magnitud, fecha y hora	Puntos
FALLAS_ACTIVAS	Fallas geológicas activas donde se indican sus características	Línea
Cauce1dis	Cauces asociados al Estero Quilpué	Línea
Cauce2dis	Cauces asociados al Estero Quilpué	Línea
Cauce3dis	Cauces y quebradas asociados al Estero Aranda	Línea
Cauce4dis	Cauces y quebradas asociados al Estero Moscoso	Línea
Cauce5dis	Cauces y quebradas asociados al Estero El Belloto	Línea
DRENAJE_MAYOR	Drenajes y Esteros mayores de la comuna	Línea
ZONIF_SIS_NCH433	Zonificación sísmica según norma NCH 33	Polígono
SUELOS_SISMICOS_NCH433	Zonificación suelos según norma NCH 33 (Polígono)	Polígono
AMENAZA_R5_GORE	Zonificación amenaza R5 GORE (Polígono)	Polígono
GEOLOGIA_VA	Geología de Villa Alemana (Polígono)	Polígono
CONSOLIDADO_CN	Distribución de uso de las áreas de Villa Alemana (Polígono)	Polígono
GRUPOS_HGEO		Polígono
Union_cuencas	Distribución de cuencas de Villa Alemana	Polígono
PENDIENTES_INC	Ráster de pendientes de Villa Alemana	RASTER
PENDIENTES (RASTER)	Ráster de pendientes	RASTER
AMENAZA_INC (RASTER)		RASTER
MULTI_RIESGO (RASTER)		RASTER
VULNERAB_IVRI (RASTER)		RASTER
HILLSHADE (RASTER)	Modelo de sombras	RASTER
DEM_PALSAR (RASTER)	Modelo digital de elevación	RASTER
RIESGO_SIS1 (RASTER)		RASTER

AMENAZA-.SIS (RASTER)		RASTER
RIESGO_INV1		RASTER
AMENAZA_INV (RASTER)		RASTER
RIESGO_INC1 (RASTER)		RASTER

- Geodatabase (PRC Villa Alemana.gdb)

Tabla 11-3 Resumen de coberturas entregadas por la municipalidad (formato .gdb)

Nombre	Información que contiene	Tipo
Red_Hidrométrica	Ubicación de la red hidrométrica	Puntos
RESTRIC_CAUCES_VA		Puntos
BOCATOMAS	Ubicación bocatomas (puntos)	Puntos
Embalses_columna_datos	Ubicación de embalses (puntos)	Puntos
Embalse_2016	Ubicación de embalses (puntos)	Puntos
POZOS_VILLA_ALEMANA	Ubicación de pozos en Villa Alemana (puntos)	Puntos
TRANQUES	Ubicación de tranques en Villa Alemana	Puntos
TERREMOTOS_HISTORICOS_CHILE_1575_2012	Ubicación de epicentros de los terremotos con magnitud sobre 7 entre 1575 y 2012	Puntos
REGISTRO_EVENTOS_CRITICOS_INVIERNO_ONEMI	Ubicación de puntos críticos en Villa Alemana que presentan alguna amenaza como inundación, erosión, interrupción de caminos, vientos o anegamiento	Puntos
FUERTES_SISMOS_MUNDIALES_2007_2012	Ubicación de epicentro de sismos entre 2007-2012	Puntos
MOVIMIENTOS_SISMICOS_MUNDO	Ubicación epicentros de sismos	Puntos
TERREMOTOS_HISTORICOS_MUNDIALES	Ubicación epicentros de sismos	Puntos
TERREMOTOS_MUNDIALES_70_2002	Ubicación epicentros de sismos	Puntos
COLECTOR_TRAZADO	Ubicación de colectores en Villa Alemana	Línea
INUNDACION_LINEA_VA	Zonas de inundación en Villa Alemana	Línea

Estudio Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana

ZONAS_DE_RIESGO	Zona de riesgo	Línea
ESCORRENTÍA	Escorrentía	Línea
ESTERO_VA	Esteros Villa Alemana	Línea
ESTEROS_DOH	Esteros Villa Alemana, DOH	Línea
ESTEROS_REGISTRO_CASERO	Esteros Villa Alemana	Línea
HIDROGRAFIA_PRINC	Hidrografía principal	Línea
HIDROGRAFIA_SEC	Hidrografía secundaria	Línea
CUENCAS_LINEA	División de cuencas	Línea
ISOTERMAS	Distribución de isotermas en Chile	Línea
ISOYETAS	Distribución de isoyetas en Chile	Línea
PRECIPIT_ANUAL	Distribución de precipitación anual en Chile	Línea
PRECIPIT_MAX_DIARIAS	Distribución de precipitación máximas diarias en Chile	Línea
CURVAS_NIVEL_100MT	Curvas de nivel cada 100 m	Línea
LIMITE_URBANO	Límite urbano de la comuna de Villa Alemana	Línea
Limite_comunal	Límite comunal de Villa Alemana	Polígono
Provincia	Límites provinciales de la región de Valparaíso	Polígono
Region	Limite regional de Valparaíso	Polígono
Inventario_Humedales_2012	Ubicación y distribución de humedales en Chile	Polígono
PLAN_REGULADOR_COMUNAL_VA	Zonificación Plan Regulador Comunal de Villa Alemana	Polígono
SUMIDEROS	Ubicación y distribución de sumideros en Villa Alemana	Polígono
INUNDACION_POLIGONO_VA	Zonas de inundación en Villa Alemana	Polígono
ZONAS_INUNDACION_R_DOH	Zonas de inundación	Polígono
REGISTROS_ARRASTRE_EROSION_FLUVIAL_R_DOH	Zonas de arrastre y erosión fluvial en Villa Alemana	Polígono
AMENAZA_SISMICA_R05	Zonificación de amenaza sísmica	Polígono

Estudio Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana

AMENAZA_REMOCION_EN_MASA_R05	Zonas de remociones en masa	Polígono
CATASTRO DE LAGOS	Ubicación y distribución de lagos en Chile	Polígono
CUENCAS_LINEA	Cuencas en Chile	Polígono
SUBCUENCAS	Subcuencas de Chile	Polígono
PRECIPITACIONES MEDIAS	Distribución de precipitaciones medias en Chile	Polígono
TEMPERATURAS_MEDIAS	Distribución de temperaturas medias en Chile	Polígono
GEOLOGIA	Geología de Chile (polígono)	Polígono
RIESGO_EROSION_ACTUAL_2017	Riesgo por tipo de erosión	Polígono
RIESGO_EROSION_POTENCIAL_2010	Riesgo por tipo de potencial erosión	Polígono
UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	Unidades geomorfológicas	Polígono
EROSION_ACTUAL_2017	Distribución de tipos de erosión	Polígono

12 Anexo D Estimación de caudales

12.1 Metodología

12.1.1 Revisión de antecedentes

En el Marco hidrológico, se analiza la estadística de las estaciones hidrométricas cercanas a la zona, considerando datos fluviométricos y meteorológicos. En ella se observa que la estadística hidrológica con una cantidad de datos confiables corresponde a la del periodo de años 1990-2000. Dada esta falta de actualización de datos climáticos se consideró apropiado el uso del análisis de la información presentada en el Plan Maestro Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar para la situación futura.

12.1.2 Caracterización de cauces y definición de caudales de crecida

Para determinar los caudales según lo recomendado en el Manual de Carreteras, Volumen 3 (2018), para cuencas pequeñas, menores a los 25 km², se usó el Método Racional que permite calcular el caudal máximo para un determinado período de retorno según la siguiente expresión:

$$Q = \frac{c \cdot i \cdot A}{3,6}$$

Dónde:

Q : Caudal [m³/s]

c : Coeficiente de escorrentía

i : Intensidad de la lluvia asociada al tiempo de concentración de la cuenca [mm/hr]

A : Área de la cuenca [km²]

12.1.2.1 Delimitación de cuencas

A partir de la topografía levantada en la zona de estudio y las cuencas definidas en el Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar (DOH, 2001), se trazan los límites de las cuencas y la red de drenaje y se definen parámetros morfológicos de las cuencas asociadas a quebradas a caracterizar. Es necesario mencionar que fue necesario corregir la cuenca del estero Quilpué, teniendo que agrandarse para incluir toda el área de influencia.

12.1.2.2 Coeficiente de Escorrentía

Se actualizaron los coeficientes de escorrentía para representar la situación actual de usos de suelo, considerándose los 4 grupos: centro, habitacional, parcelas suburbanas y suelo natural. Los coeficientes para dichas clasificaciones se detallan en la Tabla 10-1, estos valores fueron estimados considerando estimaciones del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar (DOH, 2001), Tabla 10-2, en el caso de los 3 primeros tipos, y del Manual de Carreteras, Tabla 10-3, para el suelo natural.

Tabla 12-1 Coeficiente de escorrentía Villa Alemana (T = 100 años).

Centro	0,95
Habitacional	0,64
Parcelas Sub-urbanas	0,55
Suelo natural	0,20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12-2 Coeficiente de escorrentía Plan Maestro de Evacuación y drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar.

TIPO DE AREAS URBANAS	PERIODO DE RETORNO (años)				
	2	5	10	20	50
Centro	0,70	0,73	0,76	0,81	0,86
Pericentro Residencial	0,47	0,50	0,53	0,57	0,61
Subcentro Residencial	0,42	0,45	0,47	0,52	0,55
Residencial	0,42	0,45	0,47	0,51	0,55
Habitacional	0,45	0,48	0,50	0,54	0,58
Poblacional	0,45	0,49	0,51	0,55	0,58
Grandes Lotes Suburbanos	0,40	0,44	0,46	0,50	0,53

Fuente: Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar, V Región (PM-03). DOH, 2001.

Tabla 12-3 Coeficiente de escorrentía Manual de Carreteras

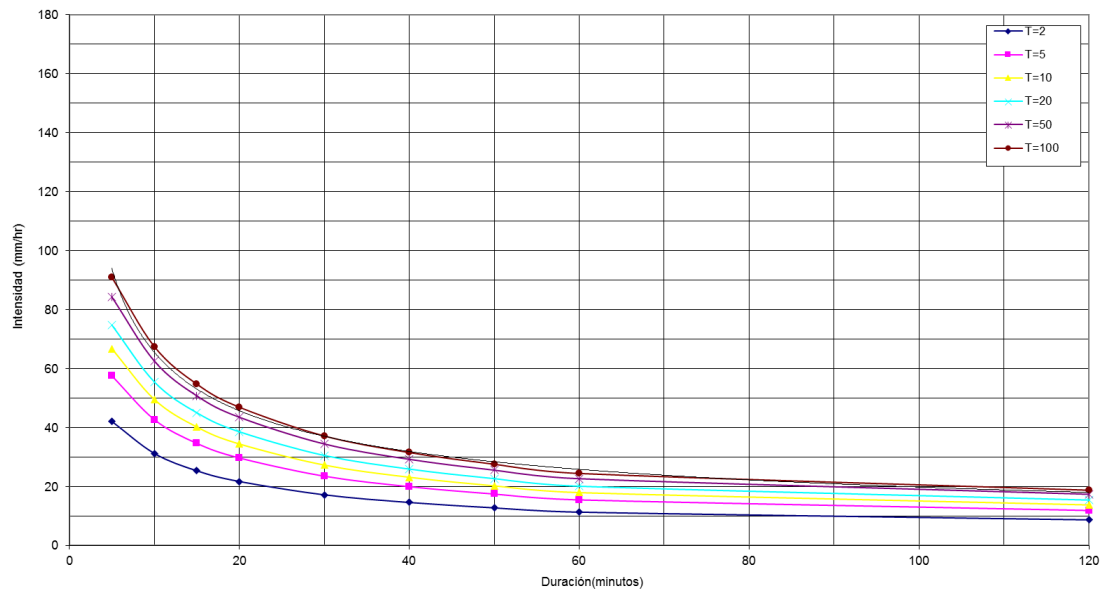
Factor	Extremo	Alto	Normal	Bajo
Relieve	0,28 – 0,35: Escarpado con pendientes mayores que 30 %	0,20 – 0,28: Montañoso con pendientes entre 10 y 30 %	0,14 – 0,20: Con cerros y pendientes entre 5 y 10 %	0,08 – 0,14: Relativamente plano con pendientes menores al 5 %
Infiltración	0,12 – 0,16: Suelo rocoso, o arcilloso con capacidad de infiltración despreciable	0,08 – 0,12: Suelos arcillosos o limosos con baja capacidad de infiltración, mal drenados	0,06 – 0,08: Normales, bien drenados, textura mediana, limos arenosos, suelos arenosos	0,04 – 0,06: Suelos profundos de arena u otros suelos bien drenados con alta capacidad de infiltración
Cobertura Vegetal	0,12 – 0,16: Cobertura escasa, terreno sin vegetación o escasa cobertura	0,08 – 0,12: Poca vegetación, terrenos cultivados o naturales, menos del 20 % del área con buena cobertura vegetal	0,06 – 0,08: Regular a buena; 50 % del área con praderas o bosques, no más del 50 % cultivado	0,04 – 0,06: Buena a excelente, 90 % del área con praderas, bosques o cobertura equivalente
Almacenamiento Superficial	0,10 – 0,12: Despreciable, pocas depresiones superficiales, sin zonas húmedas	0,08 – 0,12: Baja, sistema de cauces superficiales pequeños bien definidos, sin zonas húmedas	0,06 – 0,08: Normal; posibilidad de almacenamiento buena, zonas húmedas, pantanos, lagunas y lagos	0,04 – 0,06: Capacidad alta, sistema hidrográfico poco definido, buenas planicies de inundación o gran cantidad de zonas húmedas, lagunas o pantanos
Si T > 10 años amplificar resultado por: T = 25; C x 1,10 – T = 50; C x 1,20 – T = 100; C x 1,25				

Fuente: Manual de Carreteras, Volumen 3 (2018).

12.1.2.3 Intensidad

La intensidad de la lluvia de diseño corresponde a aquella de duración igual al tiempo de concentración. Se consideró la representación de la intensidad en función del tiempo como la obtenida por las curvas IDF, intensidad, duración, frecuencia, estimadas por el Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar (DOH, 2001), Figura 10-1.

Figura 12-1 Curva IDF



Fuente: Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar, V Región (PM-03). DOH, 2001.

12.1.2.4 Tiempo de concentración

Para estimar el tiempo de concentración, dadas las condiciones de las cuencas, se calcularon mediante las fórmulas de California y Norma Española. Luego se adoptó un valor en horas considerando un promedio de los resultados.

Fórmula de California

$$t_c = 0,95 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385}$$

Dónde:

t_c : Tiempo de Concentración [hr]

L : Longitud del Cauce Principal [km]

H : Desnivel máximo [m]

Fórmula de Normas Españolas

$$t_c = \frac{18 \cdot L^{0,76}}{S^{0,19}}$$

Dónde:

t_c : Tiempo de Concentración [hr]

L : Longitud del Cauce Principal [km]

S : Pendiente [m/m]

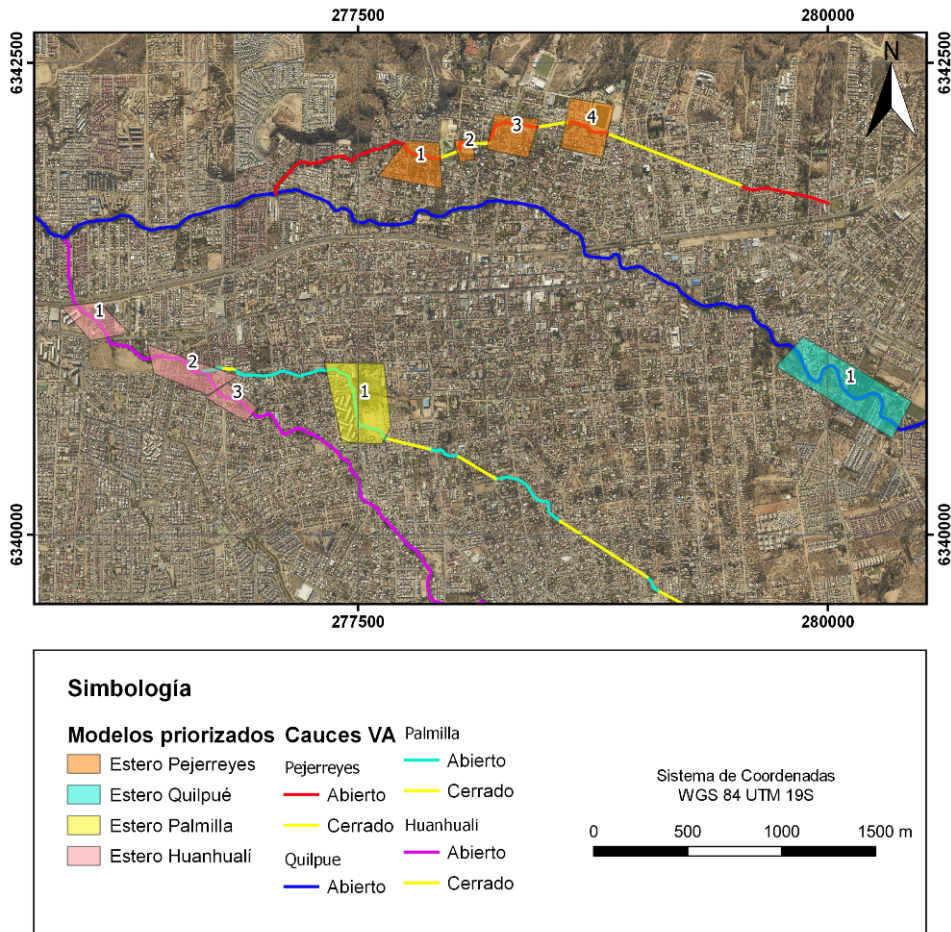
12.2 Delimitación y Caracterización de Cuencas

De acuerdo con la extensión del área de estudio, a la presencia de cauces, a la presencia de construcciones y posibles zonas de expansión se han determinado las cuencas a estudiar en la comuna de Villa Alemana. Se han identificado como relevantes en la zona urbana los esteros Quilpué, Pejerreyes, Palmilla y Huanhualí

La estimación de los caudales se realiza específicamente para las zonas donde se realizarán los modelos hidráulicos para definir las áreas de riesgo. Para esto, se priorizaron los modelos a desarrollar, considerando la recopilación de antecedentes, presentada en el Capítulo 9: Anexo C, un análisis geológico de la zona urbana realizada junto al equipo de geólogos, reuniones con la Ilustre Municipalidad de Villa Alemana y la Dirección de Obras Hidráulicas Región de Valparaíso, y la realización de un análisis preliminar de los cauces utilizando la ecuación de Manning para definir la capacidad de los tramos aproximados y su comparación con los caudales estimados en el estudio de crecidas.

En la Figura 10-2 se presenta la ubicación de las cuencas y la definición de los cauces (tramos abiertos y cerrados), en la Figura 10-3 se presentan los modelos priorizados, mientras que los detalles de los cauces utilizados para la estimación de caudales se incluyen en la Tabla 10-4. Es importante señalar, respecto de la información presentada para el estero Pejerreyes, que corresponde a valores representativos para facilitar la comprensión del informe, toda vez que para la estimación de caudales se sumaron los estimados por cada subcuenca según corresponde.

Figura 12-3 Modelos priorizados



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12-4 Características cauces por zona de modelación

Cuenca	Área cuenca [km ²]	Longitud Cauce [m]	Desnivel Cuenca [m]	Diferencia Altura Media Cuenca y Altura en el Punto de Salida [msnm]
Pejerreyes 1 (*)	3,6	1,1	744,3	210,2
Pejerreyes 2 (*)	3,3	1,2	676,7	192,0
Pejerreyes 3 (*)	2,2	1,1	539,7	161,3
Pejerreyes 4 (*)	1,7	1,1	403,2	113,7
Quilpué 1	14,0	6,9	401,5	96,8
Palmilla 1	2,6	4,1	105,9	32,6
Huanhualí 1	12,8	5,5	413,5	77,6
Huanhualí 2	12,5	4,9	410,0	75,8
Huanhualí 3	9,7	4,6	407,2	85,0

(*) Para mejor comprensión, se presenta un resumen de los valores utilizados para las distintas subcuencas, siendo el área la suma de las cuencas involucradas, y la longitud y alturas un promedio de las cuencas involucradas.

Fuente: Elaboración propia

12.3 Determinación de Caudales de Crecidas

Los caudales se estimaron según lo recomendado en el Manual de Carreteras, Volumen 3 (2018), para cuencas pequeñas, menores a los 25 km², mediante el uso del Método Racional que permite calcular el caudal máximo para un determinado periodo de retorno según la siguiente expresión:

$$Q = \frac{c \cdot i \cdot A}{3,6}$$

Dónde:

Q : Caudal [m³/s]

c : Coeficiente de escorrentía

i : Intensidad de la lluvia asociada al tiempo de concentración de la cuenca [mm/hr]

A : Área de la cuenca [km²]

12.4 Coeficiente de Escorrentía

Los coeficientes de escorrentía se estimaron para representar la situación actual de usos de suelo, considerándose los 4 grupos: centro, habitacional, parcelas suburbanas y suelo natural. Los coeficientes para dichas clasificaciones se detallan en la Tabla 10-5, estos valores fueron estimados considerando estimaciones

del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar (DOH, 2001), en el caso de los 3 primeros tipos, y del Manual de Carreteras, Volumen 3, para el suelo natural.

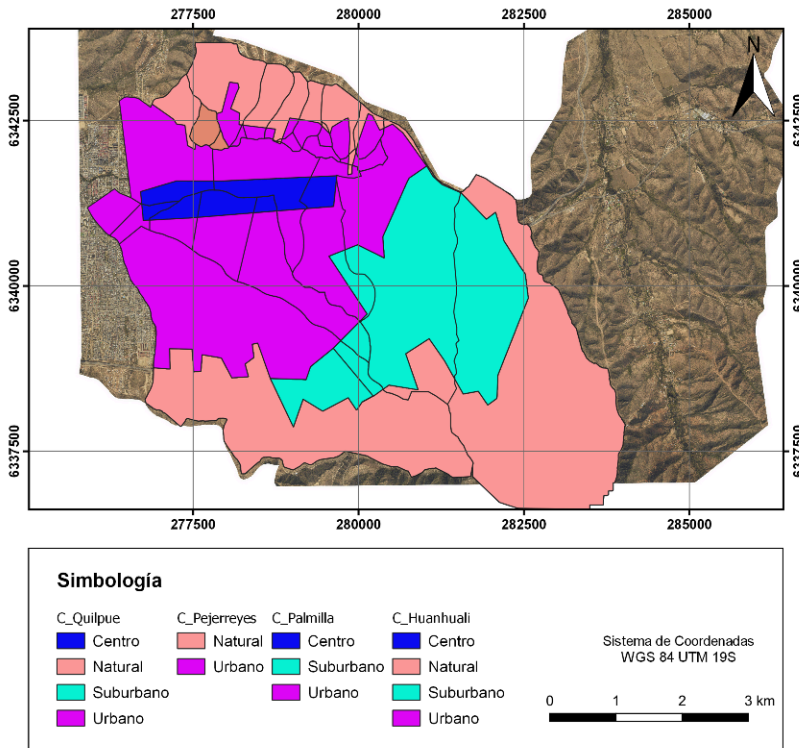
Tabla 12-5 Coeficiente de escorrentía Villa Alemana (T = 100 años)

Centro	0,96
Habitacional	0,64
Parcelas Sub-urbanas	0,55
Suelo natural	0,20

Fuente: Elaboración Propia

Se designaron valores del coeficiente de escorrentía por áreas, para las distintas cuencas, según lo observado en la fotografía aérea, basado en las definiciones de suelos realizadas en el Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar (DOH, 2001), como se puede apreciar en la Figura 10-4.

Figura 12-4 Coeficientes de escorrentía cuencas Villa Alemana



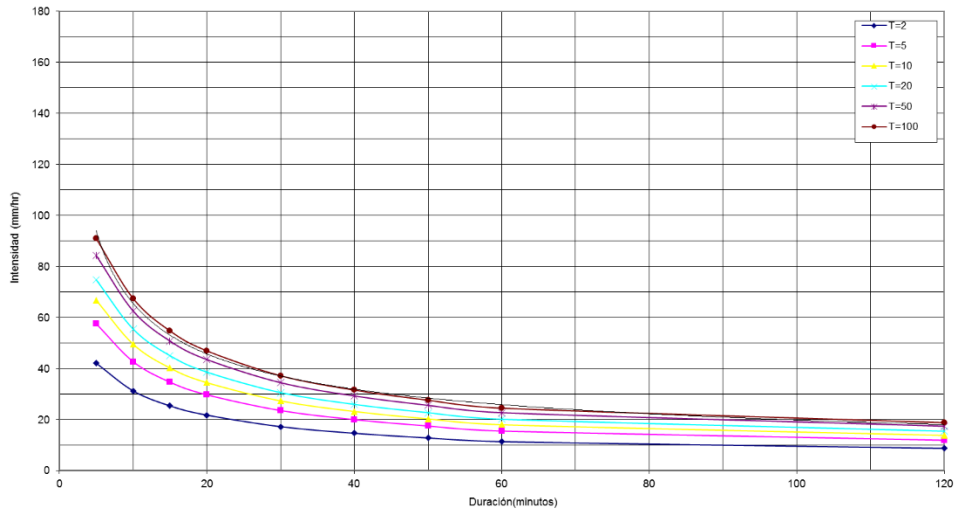
Fuente: Elaboración propia.

12.5 Intensidad

La intensidad de la lluvia de diseño corresponde a aquella de duración igual al tiempo de concentración. Se consideró la representación de la intensidad en función del tiempo como la obtenida por las curvas IDF, intensidad, duración, frecuencia, estimadas por el Plan Maestro Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de

Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar (DOH, 2001) para la zona de Villa Alemana para la situación futura, Figura 10-5.

Figura 12-5 Curva IDF



Fuente: Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar, V Región (PM-03). DOH, 2001.

Para estimar se el tiempo de concentración, dadas las condiciones de las cuencas, se calcularon dichos tiempos según las fórmulas de California y Norma Española. Finalmente se adoptó un valor en horas considerando un promedio de los resultados. En la Tabla 10-6 se presentan los valores estimados.

Tabla 12-6: Determinación del tiempo de concentración (Hr)

Cuenca	Norma Española	California	Valor Adoptado
Pejerreyes 1 (*)	0,34	0,23	0,28
Pejerreyes 2 (*)	0,35	0,25	0,29
Pejerreyes 3 (*)	0,37	0,18	0,28
Pejerreyes 4 (*)	0,37	0,18	0,27
Quilpué 1	1,59	0,87	1,23
Palmilla 1	1,35	0,80	1,08
Huanhualí 1	2,68	0,67	1,67
Huanhualí 2	2,46	0,59	1,53

Cuenca	Norma Española	California	Valor Adoptado
Huanhualí 3	2,36	0,55	1,46

(*) Para mejor comprensión, se presenta un resumen de los valores utilizados para las distintas subcuencas, siendo el área la suma de las cuencas involucradas, y la longitud y alturas un promedio de las cuencas involucradas.

Fuente: Elaboración propia.

12.6 Área

Las áreas de cuencas se determinaron en el análisis de delimitación de cuencas descrito en el punto anterior, según lo señalado en la Tabla 10-4.

12.7 Resultados

Finalmente, se estimaron los caudales máximos para un periodo de retorno $T = 100$ años, cuyos resultados se presentan en la Tabla 10-7.

Tabla 12-7: Caudales $T=100$ años según tramo de modelación

Cauce	Modelo	Caudal $T = 100$ años (m^3/s)
Estero Pejerreyes	1	17,0
	2	15,2
	3	11,2
	4	9,6
Estero Quilpué	1	34,4
Estero Palmilla	1	12,6
Estero Huanhualí	1	34,1
	2	34,1
	3	23,3

Fuente: Elaboración propia.

13 Anexo E Modelación hidráulica

13.1 Metodología

El software HEC-RAS permite la modelación 1D para representar el escurrimiento en cauces, con el objetivo de determinar las zonas de inundación para distintos períodos de retorno.

La rugosidad de las superficies se caracteriza mediante el coeficiente de Manning, parámetro que representa la resistencia que ejerce la superficie al escurrimiento del agua, y que se relaciona con el caudal, la pendiente y geometría del cauce según la siguiente ecuación:

$$\frac{Q \cdot n}{\sqrt{i}} = A \cdot R_h^{\frac{2}{3}}$$

Dónde:

Q : Caudal [m^3/s]

n : Coeficiente de Manning [$s/m^{1/3}$]

i : Pendiente del cauce [m/m]

A : Área de la sección transversal de escurrimiento [m^2]

R_h : Radio hidráulico [m]

Entre los factores que afectan el coeficiente de Manning se encuentran la rugosidad superficial (el tamaño y la forma de los granos), la presencia de vegetación, las irregularidades, el alineamiento, el tamaño y la forma del canal, la sedimentación y la socavación, las obstrucciones, el cambio estacional, etc.

Existen dos metodologías para determinar el valor del coeficiente de Manning: mediante la aplicación de fórmulas o mediante la revisión bibliográfica de cauces cuya rugosidad ha sido estudiada y que presentan características similares a los cauces que se desean estudiar. Con motivo de este trabajo se estimaron los coeficientes de rugosidad a través del método de Cowan.

Cowan (1956) desarrolló un procedimiento para estimar el valor del coeficiente de manning, el cual queda definido por la siguiente ecuación:

$$n = m \cdot (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$$

Dónde:

n : Coeficiente de Manning

n_0 : Valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados

n_1 : Corrección por efecto de las rugosidades superficiales

n_2 : Corrección por la variación de forma y tamaño de la sección transversal

n_3 : Corrección debido a las obstrucciones

n_4 : Corrección por presencia de vegetación

m : Consideración del efecto de los meandros

Cada uno de estos parámetros se determina según la comparación de las características del cauce vistas en terreno versus los valores propuestos por Cowan (ver Tabla 11-1).

Tabla 13-1 Valores para el cálculo del coeficiente de Manning mediante el método de Cowan

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0,020
	Corte en roca		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0,000
	Menor		0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n_2	0,000
	Ocasionalmente alternante		0,005
	Frecuentemente alternante		0,010-0,015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0,000
	Menor		0,010-0,015
	Apreciable		0,020-0,030
	Severo		0,040-0,060
Vegetación	Baja	n_4	0,005-0,010
	Media		0,010-0,025
	Alta		0,025-0,050
	Muy alta		0,050-0,100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m	1,000
	Apreciable		1,150
	Severo		1,300

Fuente: Manual de Carreteras, V3 (2018).

13.2 Coeficiente de Manning

Para determinar el valor del coeficiente de Manning en los cauces modelados, se consideró lo observado durante la visita a terreno realizada en agosto de 2021 y la fotografía aérea. Los valores fueron estimados utilizando la fórmula de Cowan.

De acuerdo con lo observado en terreno y en las fotografías, y considerando, además, el material del lecho, el grado de irregularidad del perímetro mojado, el efecto relativo de las obstrucciones, la densidad de la

vegetación, la sinuosidad y frecuencia de meandros, se determinaron los valores medios para el coeficiente de Manning en la caja principal y para las planicies de inundación en los cauces modelados. Los resultados se presentan en la Tabla 11-2.

Tabla 13-2 Estimación del coeficiente de Manning mediante el método de Cowan para los cauces modelados

Cauce	Modelo	Zona Cauce	n0	n1	n2	n3	n4	m	n
Estero Pejerreyes	1	Caja principal	0,02	0,005	0	0	0,010	1,0	0,035
		Planicies	0,02	0,005	0	0	0,020	1,0	0,045
	2	Caja principal	0,02	0,000	0	0	0,010	1,0	0,030
		Planicies	0,02	0,000	0	0	0,010	1,0	0,030
	3	Caja principal	0,02	0,000	0	0	0,005	1,0	0,025
		Planicies	0,02	0,000	0	0	0,005	1,0	0,025
	4	Caja principal	0,02	0,000	0	0	0,000	1,0	0,030
		Planicies	0,02	0,000	0	0	0,000	1,0	0,030
Estero Quilpué	1	Caja principal	0,02	0,000	0	0	0,010	1,3	0,039
		Planicies	0,02	0,000	0	0	0,025	1,3	0,059
Estero Palmilla	1	Caja principal	0,02	0,000	0	0	0,010	1,0	0,030
		Planicies	0,02	0,000	0	0	0,010	1,0	0,030
Estero Huanhualí	1	Caja principal	0,02	0,000	0	0	0,010	1,0	0,030
		Planicies	0,02	0,000	0	0	0,020	1,0	0,040
	2	Caja principal	0,02	0,000	0	0	0,015	1,0	0,035
		Planicies	0,02	0,000	0	0	0,015	1,0	0,035
	3	Caja principal	0,02	0,000	0	0	0,015	1,0	0,035
		Planicies	0,02	0,000	0	0	0,015	1,0	0,035

Fuente: Elaboración propia.

Para los sectores urbanos impermeables, en las zonas de desborde de los cauces, se ha considerado un valor del coeficiente de Manning de 0,018, tomado desde literatura técnica.

13.3 Resultados modelos HEC RAS

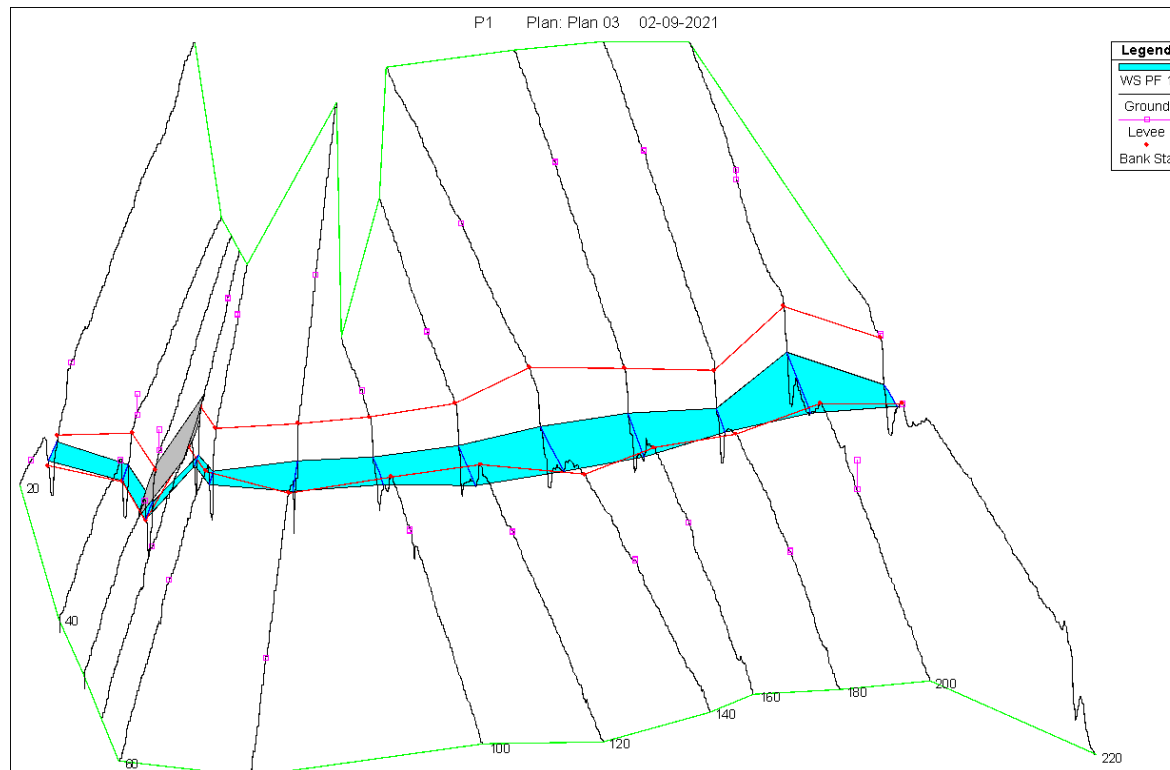
13.3.1 Resultados Estero Pejerreyes Modelo 1

Tabla 13-3 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 1, T = 100 años

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Alignment - (1)	220	PF 1	17,0	128,2	130,1	129,5	130,2	0,00394	1,4	12,0	10,6	0,4
Alignment - (1)	200	PF 1	17,0	128,1	130,1	129,5	130,2	0,00458	1,1	15,9	25,6	0,4
Alignment - (1)	180	PF 1	17,0	128,0	129,9	129,4	130,0	0,00554	1,6	11,0	11,2	0,5
Alignment - (1)	160	PF 1	17,0	128,0	129,9	129,5	129,9	0,00426	1,1	15,1	21,4	0,4
Alignment - (1)	140	PF 1	17,0	127,7	129,8	129,2	129,9	0,00300	1,0	17,0	22,0	0,4
Alignment - (1)	120	PF 1	17,0	127,6	129,7	129,1	129,8	0,00406	1,2	14,8	19,6	0,4
Alignment - (1)	100	PF 1	17,0	127,8	129,5	129,3	129,7	0,00870	1,7	10,1	13,0	0,6
Alignment - (1)	80	PF 1	17,0	127,3	129,5	128,9	129,6	0,00259	1,1	15,4	14,7	0,3
Alignment - (1)	60	PF 1	17,0	127,2	129,2	128,8	129,4	0,01091	2,3	7,5	6,4	0,7
Alignment - (1)	50		Bridge									
Alignment - (1)	40	PF 1	17,0	126,9	129,1	128,2	129,2	0,00357	1,5	11,3	7,9	0,4
Alignment - (1)	20	PF 1	17,0	126,8	128,9	128,4	129,1	0,00601	1,7	10,0	9,7	0,5

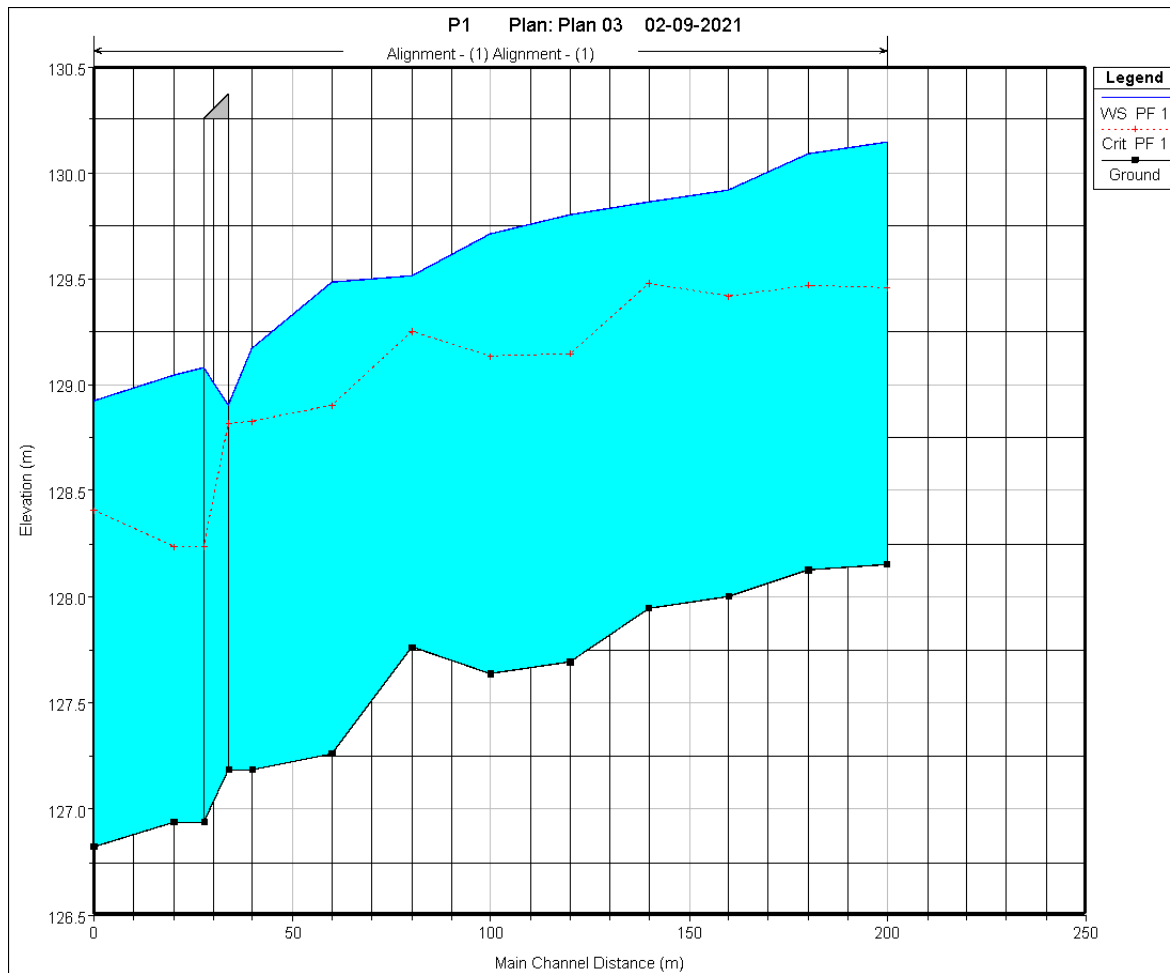
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-1 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 1, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-2 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 1, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

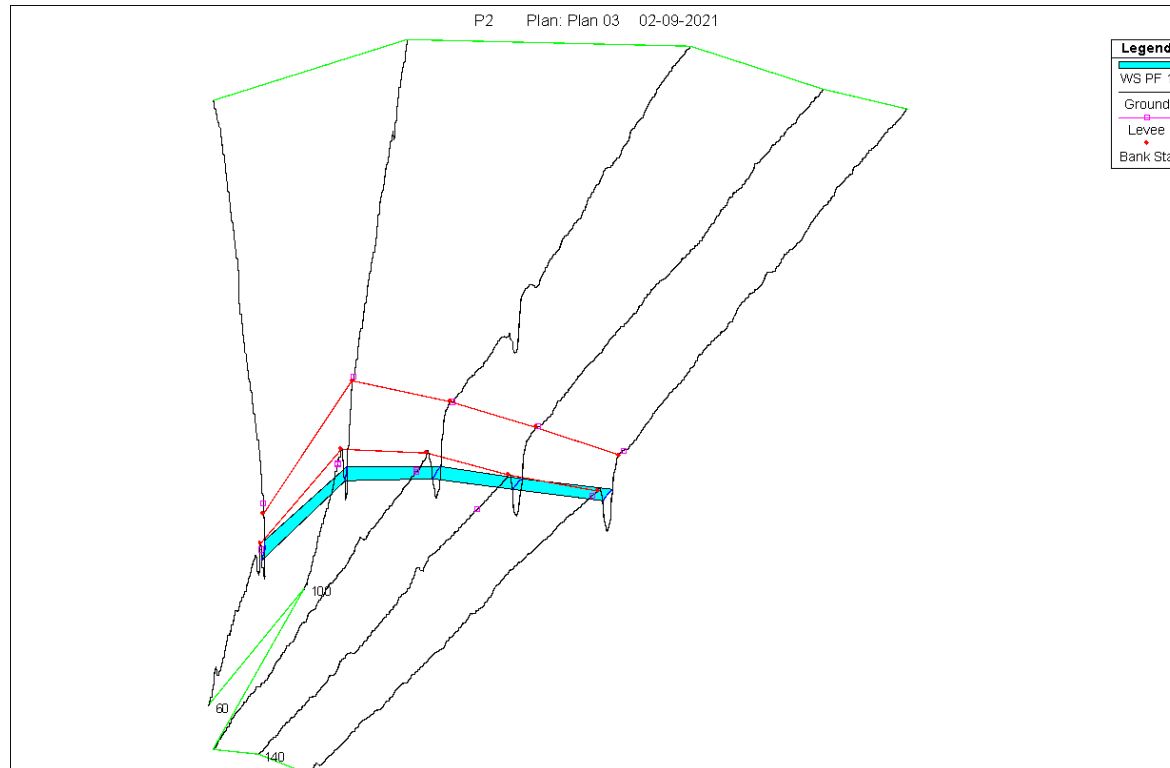
13.3.2 Resultados Estero Pejerreyes Modelo 2

Tabla 13-4 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 2, T = 100 años

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Alignment - (1)	160	PF 1	15,2	130,2	131,7	131,7	132,2	0,01148	3,1	4,9	5,0	1,0
Alignment - (1)	140	PF 1	15,2	130,0	131,4	131,4	131,9	0,01339	3,2	4,7	5,3	1,1
Alignment - (1)	120	PF 1	15,2	129,7	130,8	131,0	131,5	0,02408	3,9	3,9	5,2	1,5
Alignment - (1)	100	PF 1	15,2	129,5	130,5	130,6	131,1	0,01775	3,4	4,5	6,1	1,3
Alignment - (1)	60	PF 1	15,2	129,3	130,6	130,4	130,8	0,00600	2,2	7,0	8,4	0,8

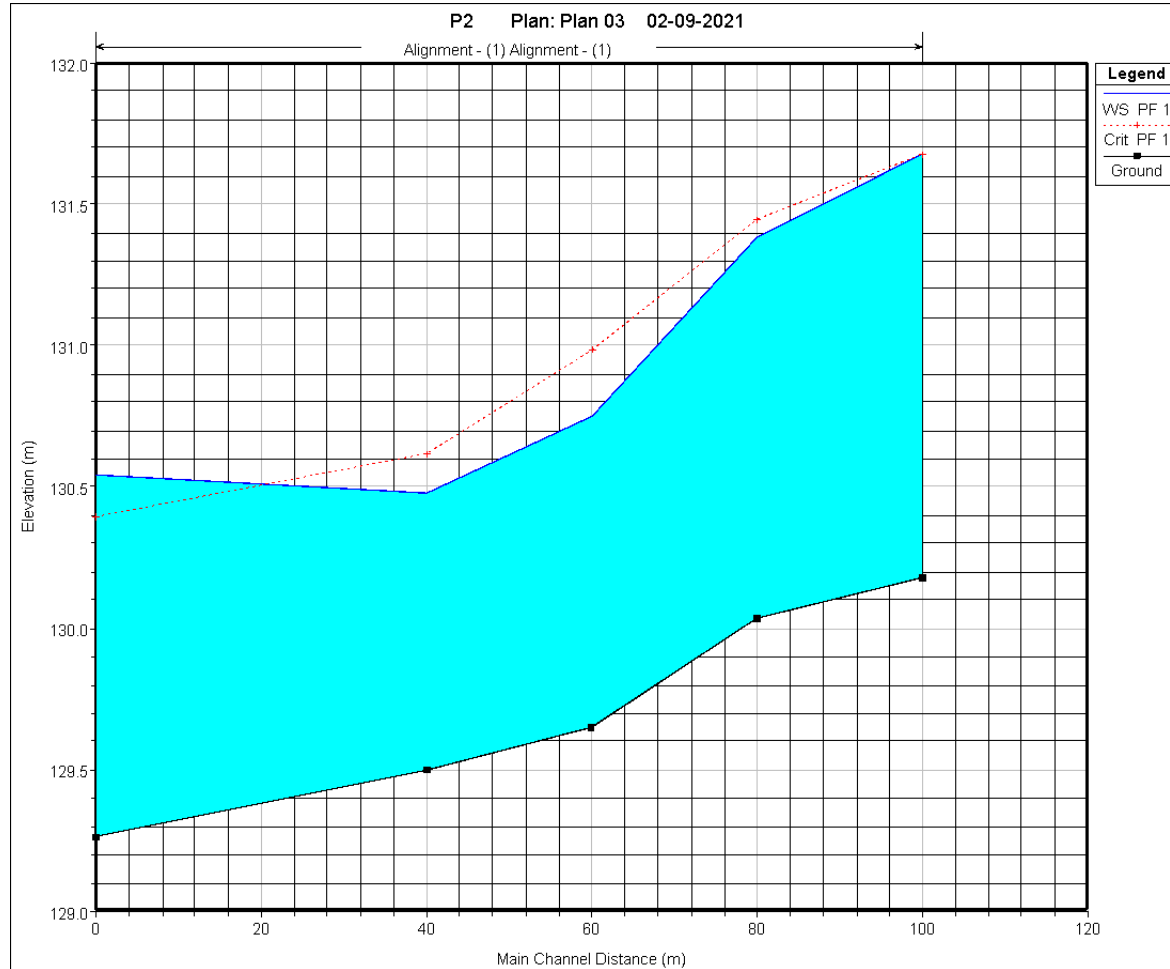
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-3 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 2, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-4 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 2, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

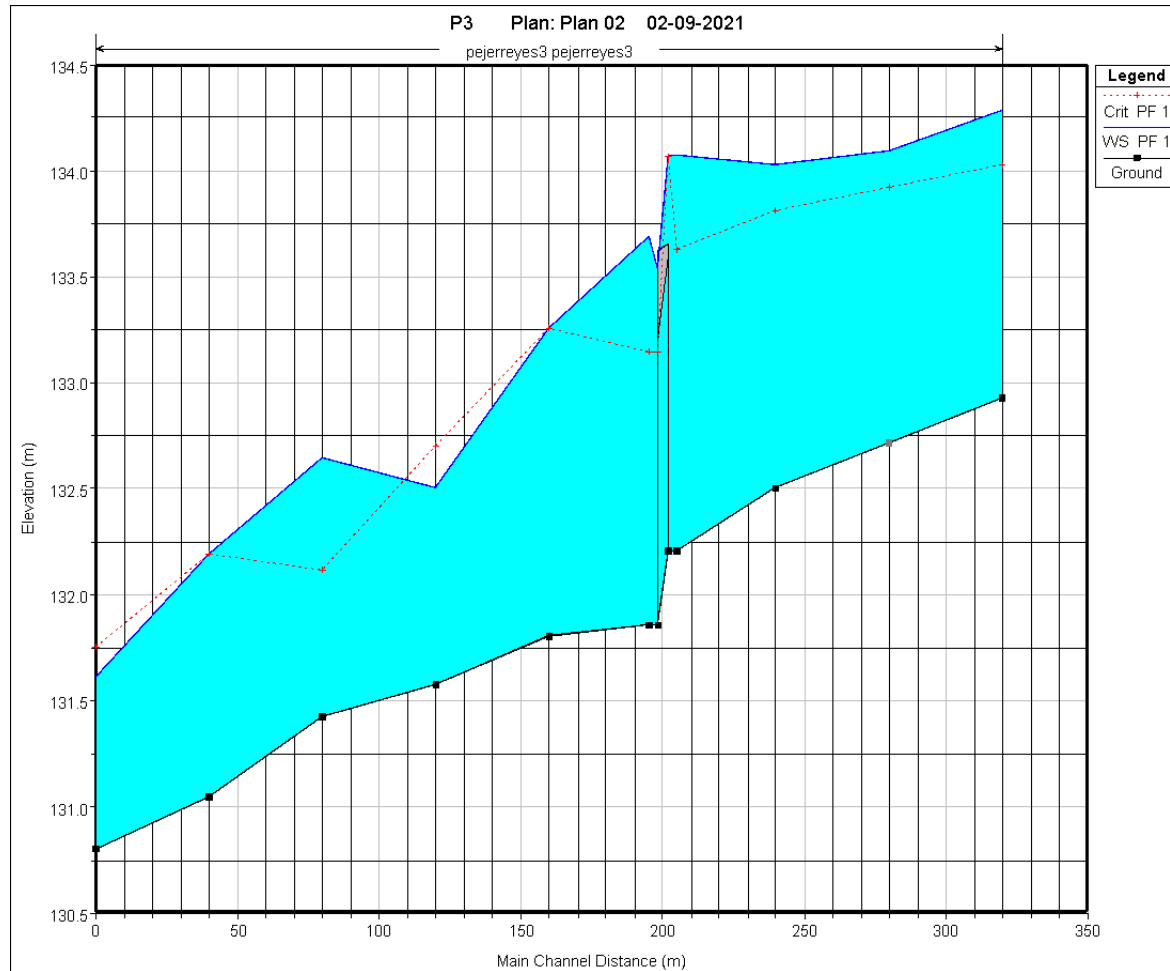
13.3.3 Resultados Estero Pejerreyes Modelo 3

Tabla 13-5 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 3, T = 100 años

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m³/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m²)	Top Width (m)	Froude # Chl
pejerreyes3	360	PF 1	11,2	132,9	134,3	134,0	134,4	0,00286	1,8	6,6	11,5	0,6
pejerreyes3	320	PF 1	11,2	132,7	134,1	133,9	134,3	0,00484	2,0	5,8	11,7	0,8
pejerreyes3	280	PF 1	11,2	132,5	134,0	133,8	134,1	0,00232	1,5	8,0	17,5	0,6
pejerreyes3	245	PF 1	11,2	132,2	134,1	133,6	134,1	0,00031	0,5	31,3	151,9	0,2
pejerreyes3	240		Bridge									
pejerreyes3	235	PF 1	11,2	131,9	133,7	133,2	133,8	0,00187	1,6	7,3	10,3	0,5
pejerreyes3	200	PF 1	11,2	131,8	133,3	133,3	133,7	0,00832	2,8	4,0	4,9	1,0
pejerreyes3	160	PF 1	11,2	131,6	132,5	132,7	133,2	0,01721	3,6	3,1	4,8	1,5
pejerreyes3	120	PF 1	11,2	131,4	132,7	132,1	132,7	0,00068	1,0	11,8	13,6	0,3
pejerreyes3	80	PF 1	11,2	131,1	132,2	132,2	132,6	0,00753	2,8	4,0	5,2	1,0
pejerreyes3	40	PF 1	11,2	130,8	131,6	131,8	132,2	0,01416	3,3	3,4	5,3	1,3

Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-6 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 3, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

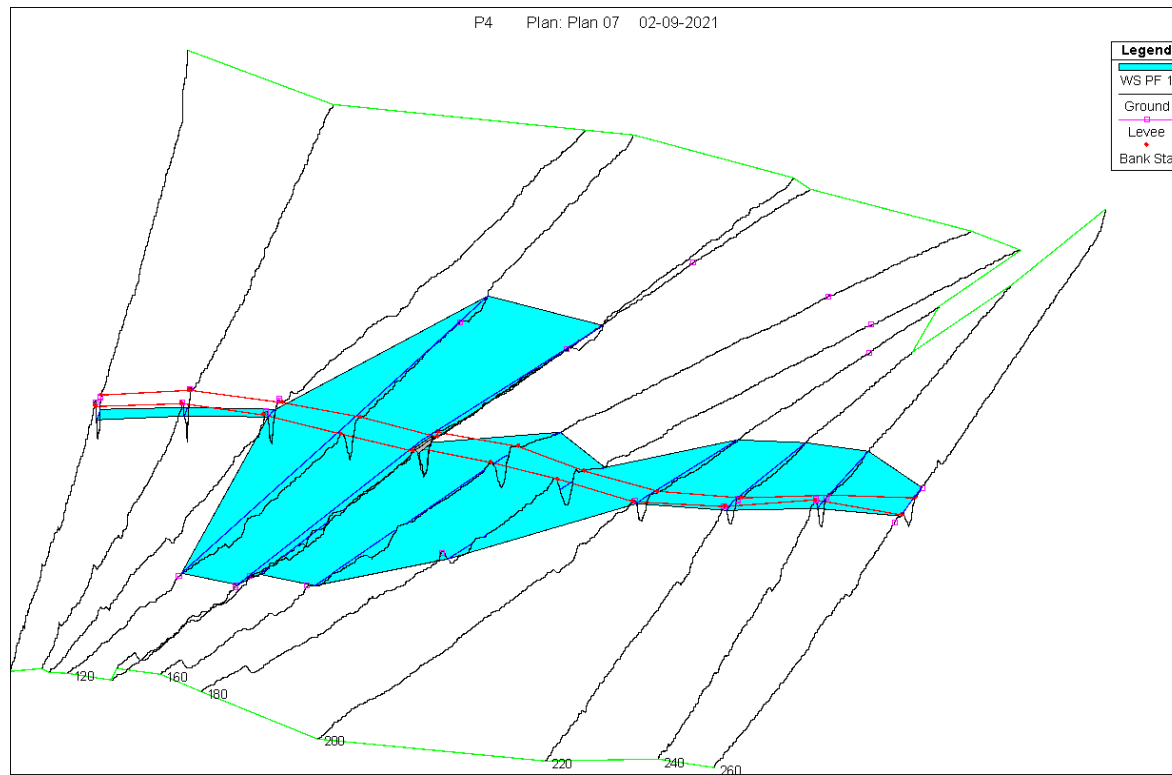
13.3.4 Resultados Estero Pejerreyes Modelo 4

Tabla 13-6 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 4, T = 100 años

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Alignment - (1)	260	PF 1	9,6	136,2	137,1	137,1	137,1	0,00410	1,2	10,1	74,8	0,6
Alignment - (1)	240	PF 1	9,6	135,9	136,9	136,9	137,0	0,00494	1,3	7,7	32,4	0,6
Alignment - (1)	220	PF 1	9,6	136,0	136,9	136,8	136,9	0,00318	1,1	9,4	39,3	0,5
Alignment - (1)	200	PF 1	9,6	135,8	136,7	136,7	136,8	0,00714	1,4	7,4	40,2	0,8
Alignment - (1)	180	PF 1	9,6	135,6	136,4	136,5	136,6	0,00954	2,1	4,8	17,0	0,9
Alignment - (1)	160	PF 1	9,6	135,2	136,5	136,2	136,5	0,00121	0,9	13,6	75,4	0,3
Alignment - (1)	140	PF 1	Bridge									
Alignment - (1)	120	PF 1	9,6	134,8	136,4	136,0	136,4	0,00006	0,2	49,9	161,9	0,1
Alignment - (1)	100	PF 1	9,6	134,7	136,0	136,0	136,4	0,01189	2,7	3,5	4,7	1,0
Alignment - (1)	80	PF 1	9,6	134,2	135,6	135,7	136,1	0,01754	3,1	3,1	4,5	1,2
Alignment - (1)	60	PF 1	9,6	134,3	135,3	135,4	135,7	0,01682	3,0	3,3	5,3	1,2

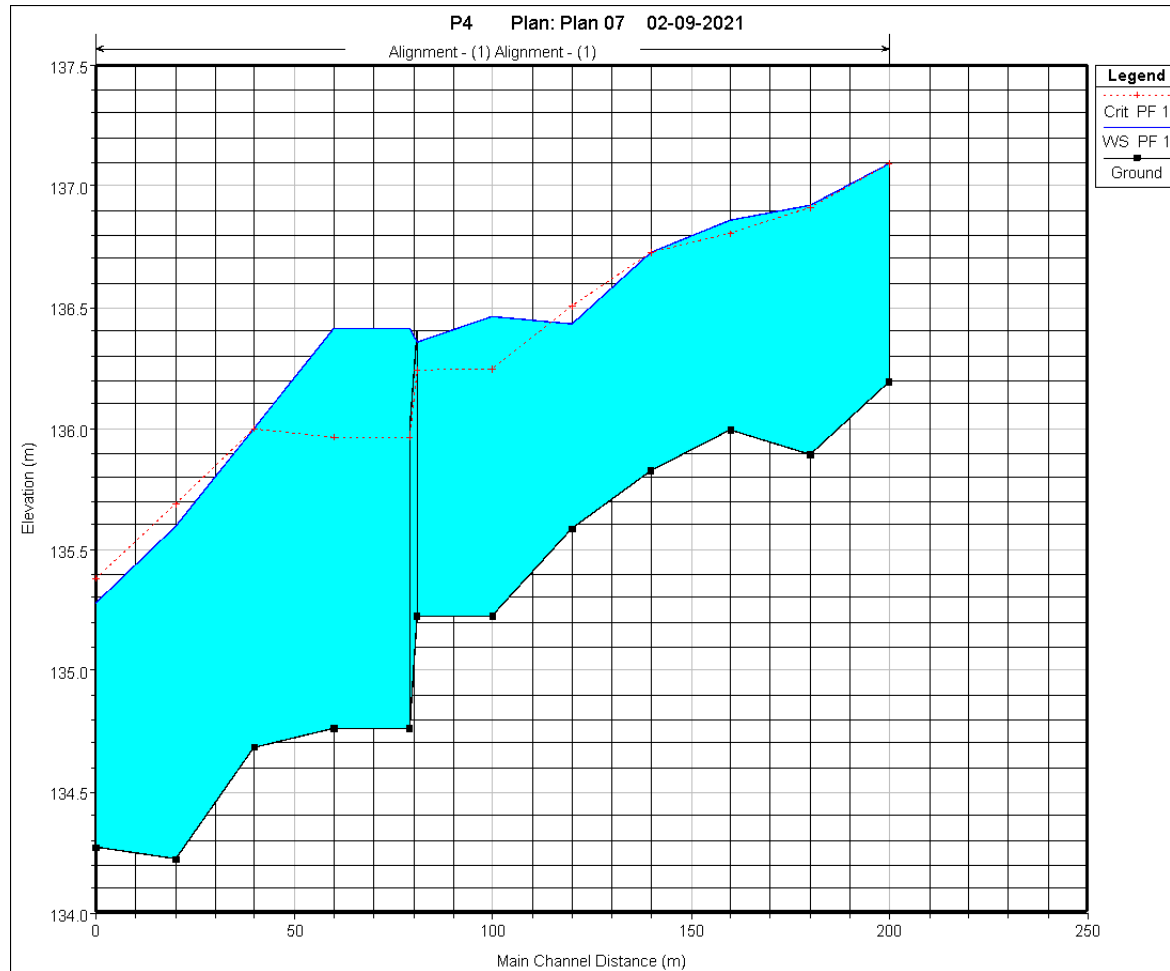
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-7 Resultados modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 4, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-8 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Pejerreyes, Modelo 4, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

13.3.5 Resultados Estero Quilpué Modelo 1

Tabla 13-7 Resultados modelo hidráulico estero Quilpué, Modelo 1, T = 100 años

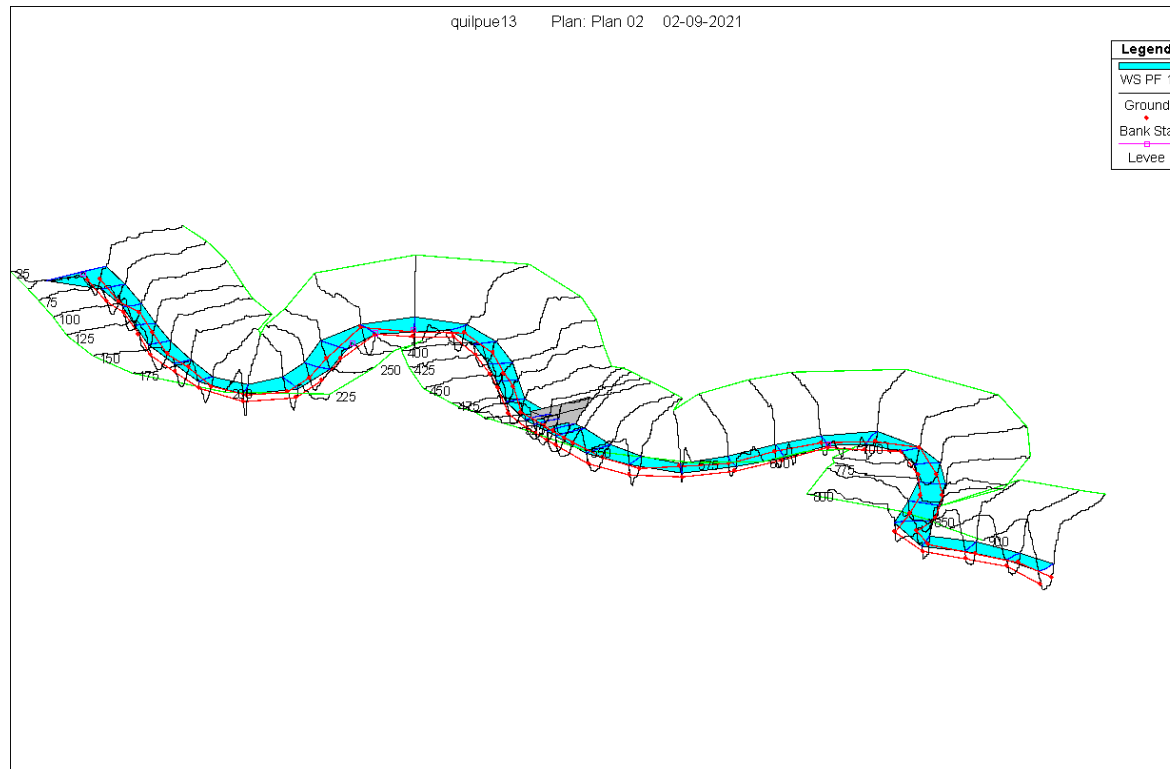
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
quilpue12	900	PF 1	34,4	150,8	152,8	152,1	153,0	0,00299	2,0	18,4	12,3	0,5
quilpue12	875	PF 1	34,4	150,7	152,5		152,9	0,00690	2,7	13,5	10,8	0,7
quilpue12	850	PF 1	34,4	150,7	152,5		152,7	0,00406	2,1	16,9	12,6	0,6
quilpue12	825	PF 1	34,4	150,8	152,3		152,6	0,00563	2,3	15,7	13,8	0,6
quilpue12	800	PF 1	34,4	150,4	152,3		152,4	0,00332	1,9	22,2	19,6	0,5
quilpue12	775	PF 1	34,4	150,3	152,3		152,4	0,00145	1,4	26,3	17,1	0,3
quilpue12	750	PF 1	34,4	150,3	152,2		152,3	0,00199	1,6	21,9	13,7	0,4
quilpue12	725	PF 1	34,4	150,0	152,1		152,2	0,00286	2,0	19,3	13,5	0,5
quilpue12	700	PF 1	34,4	149,8	151,5	151,5	152,1	0,01652	3,3	10,6	10,1	1,0
quilpue12	675	PF 1	34,4	149,8	151,7	150,9	151,8	0,00186	1,5	24,1	17,2	0,4
quilpue12	650	PF 1	34,4	149,6	151,1	151,1	151,6	0,01385	3,3	10,9	11,3	1,0
quilpue12	625	PF 1	34,4	149,3	151,0	150,6	151,2	0,00440	2,1	17,8	16,8	0,6
quilpue12	600	PF 1	34,4	148,9	150,5	150,5	151,0	0,01367	3,2	11,3	11,7	1,0
quilpue12	575	PF 1	34,4	148,7	149,9	150,0	150,5	0,02311	3,7	9,8	11,9	1,2
quilpue12	550	PF 1	34,4	147,9	150,0	149,5	150,2	0,00374	2,1	17,3	12,3	0,5
quilpue12	525	PF 1	34,4	147,8	149,9		150,2	0,00307	2,1	18,8	15,2	0,5
quilpue12	500	PF 1	34,4	147,7	149,9	149,0	150,1	0,00191	1,7	22,3	17,1	0,4

Estudio Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m³/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m²)	Top Width (m)	Froude # Chl
quilpue12	490		Bridge									
quilpue12	475	PF 1	34,4	147,7	149,8		150,0	0,00273	1,9	19,8	14,4	0,5
quilpue12	450	PF 1	34,4	147,4	149,6		149,9	0,00502	2,6	14,3	9,5	0,6
quilpue12	425	PF 1	34,4	147,2	149,5		149,8	0,00390	2,2	16,1	11,3	0,5
quilpue12	400	PF 1	34,4	147,2	149,2		149,6	0,00631	2,8	14,3	12,7	0,7
quilpue12	375	PF 1	34,4	147,0	149,2		149,4	0,00282	2,0	18,2	12,6	0,5
quilpue12	350	PF 1	34,4	146,8	149,1		149,3	0,00436	2,4	15,6	11,5	0,6
quilpue12	325	PF 1	34,4	146,7	149,0	148,3	149,2	0,00243	1,9	21,3	17,2	0,4
quilpue12	300	PF 1	34,4	146,6	149,0	148,2	149,1	0,00282	1,7	19,8	12,8	0,4
quilpue12	275	PF 1	34,4	146,4	148,9	148,0	149,1	0,00187	1,8	22,6	16,4	0,4
quilpue12	250	PF 1	34,4	146,4	148,8		149,0	0,00270	2,1	20,6	15,7	0,5
quilpue12	225	PF 1	34,4	146,4	148,8		148,9	0,00218	1,7	23,3	16,3	0,4
quilpue12	200	PF 1	34,4	146,0	148,5		148,8	0,00513	2,5	14,6	11,3	0,6
quilpue12	175	PF 1	34,4	146,0	148,3		148,6	0,00740	2,8	13,0	10,0	0,7
quilpue12	150	PF 1	34,4	145,7	148,2		148,5	0,00489	2,5	14,4	9,3	0,6
quilpue12	125	PF 1	34,4	145,5	148,2		148,3	0,00205	1,8	20,5	12,0	0,4
quilpue12	100	PF 1	34,4	145,5	148,1		148,3	0,00300	2,1	17,6	11,0	0,5
quilpue12	75	PF 1	34,4	145,5	148,0		148,2	0,00339	2,1	16,6	10,2	0,5
quilpue12	50	PF 1	34,4	145,3	147,9		148,1	0,00308	2,3	17,7	12,6	0,5
quilpue12	25	PF 1	34,4	145,2	147,7	147,3	148,0	0,00480	2,5	19,9	34,6	0,6

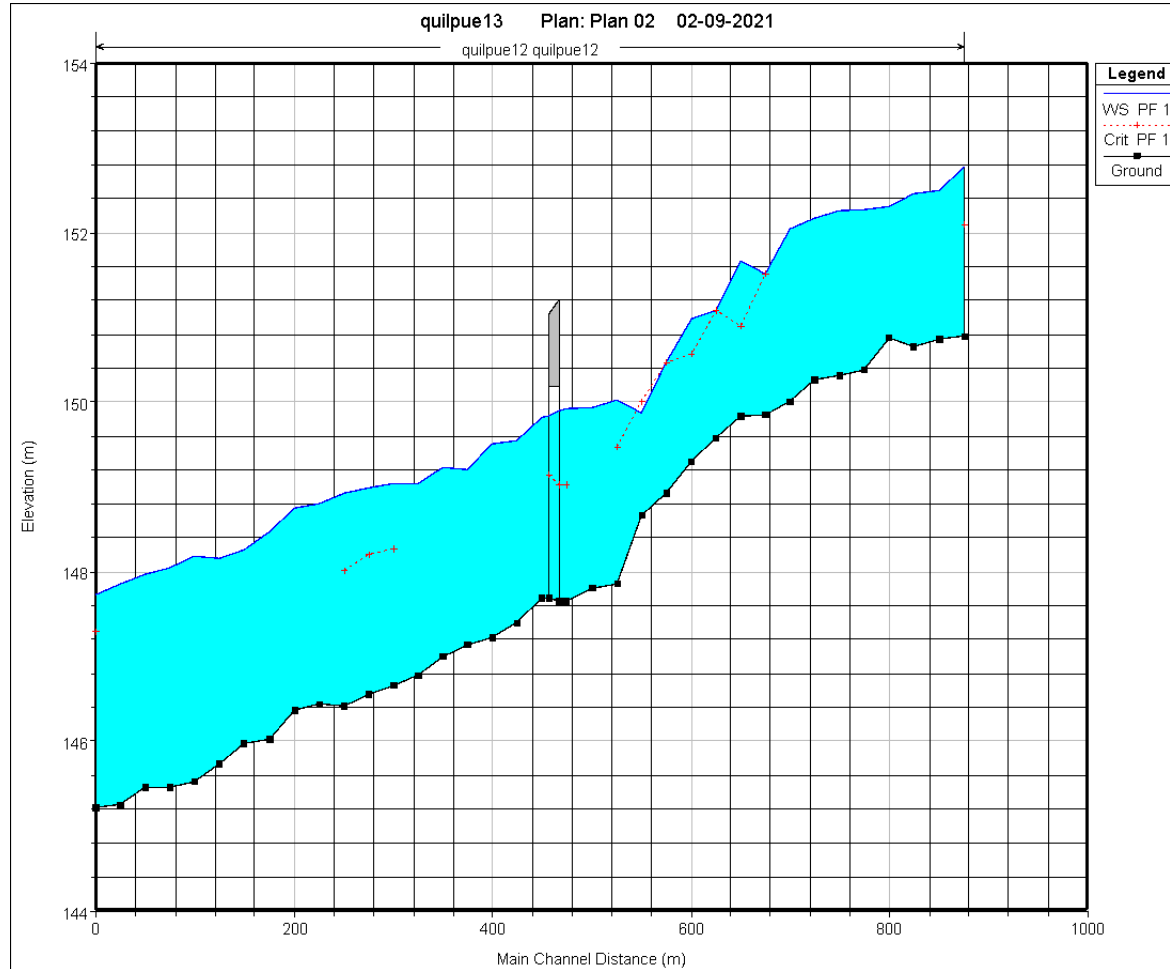
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-9 Resultados modelo hidráulico estero Quilpué, Modelo 1, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-10 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Quilpué, Modelo 1, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

13.3.6 Resultados Estero Palmilla Modelo 1

Tabla 13-8 Resultados modelo hidráulico estero Palmilla, Modelo 1, T = 100 años

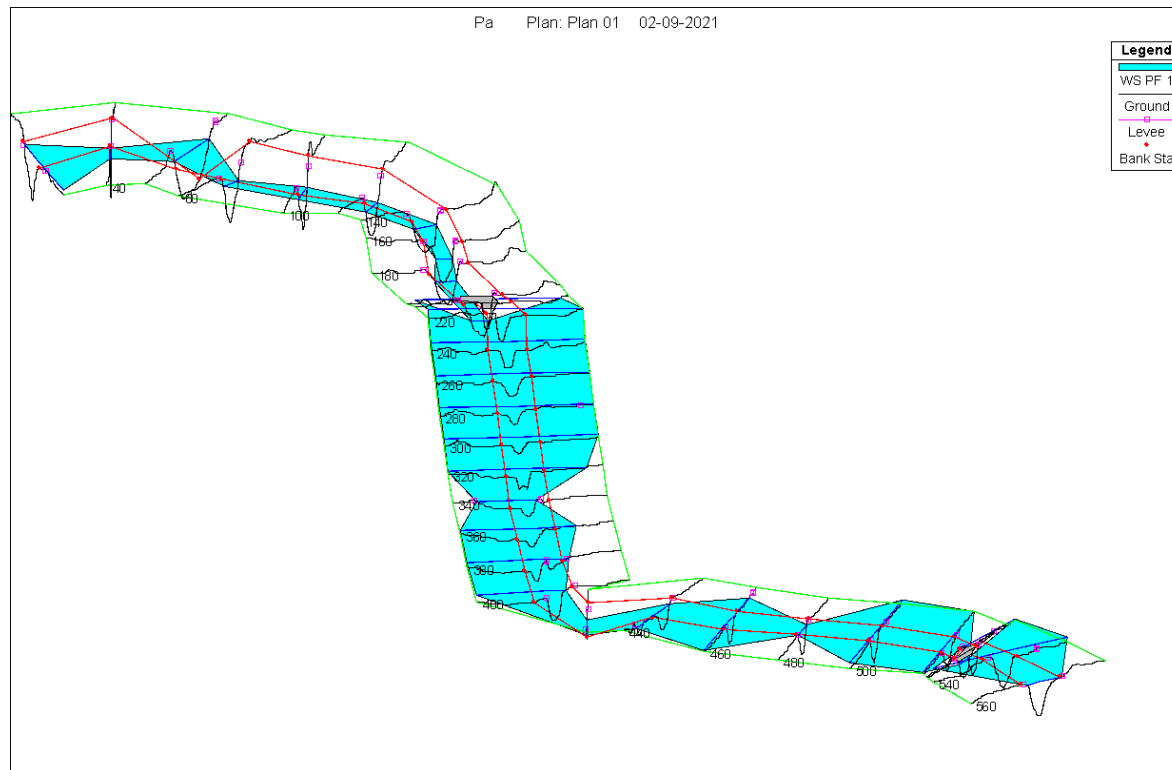
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m³/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Alignment - (1)	560	PF 1	12,6	133,5	135,1	134,8	135,3	0,00509	1,8	7,0	10,0	0,7
Alignment - (1)	540	PF 1	12,6	133,4	135,2	134,7	135,2	0,00038	0,5	21,2	40,0	0,2
Alignment - (1)	530		Bridge									
Alignment - (1)	520	PF 1	12,6	133,3	134,6	134,6	134,8	0,00424	1,6	8,8	28,9	0,6
Alignment - (1)	500	PF 1	12,6	133,2	134,6	134,6	134,7	0,00278	1,2	11,4	40,0	0,5
Alignment - (1)	480	PF 1	12,6	133,0	134,2	134,2	134,5	0,01094	2,6	4,8	6,9	1,0
Alignment - (1)	460	PF 1	12,6	132,9	134,1	134,2	134,3	0,00932	2,2	6,7	32,8	0,9
Alignment - (1)	440	PF 1	12,6	132,8	133,8	133,8	134,1	0,01139	2,2	5,6	16,3	1,0
Alignment - (1)	420	PF 1	12,6	132,5	133,1	133,3	133,7	0,03018	3,3	3,7	10,1	1,6
Alignment - (1)	400	PF 1	12,6	132,0	133,5	133,2	133,5	0,00102	0,8	13,2	23,2	0,3
Alignment - (1)	380	PF 1	12,6	132,4	133,4	133,4	133,5	0,00140	0,8	12,2	26,5	0,3
Alignment - (1)	360	PF 1	12,6	132,4	133,4		133,4	0,00238	1,0	10,6	30,2	0,5
Alignment - (1)	340	PF 1	12,6	132,3	133,1	133,1	133,4	0,00857	1,9	6,1	15,7	0,9
Alignment - (1)	320	PF 1	12,6	132,1	133,1	133,0	133,2	0,00490	1,3	9,1	35,9	0,6
Alignment - (1)	300	PF 1	12,6	132,2	133,0		133,1	0,00182	0,9	13,0	40,0	0,4
Alignment - (1)	280	PF 1	12,6	132,0	133,0	132,9	133,0	0,00348	1,1	10,2	40,0	0,5

Estudio Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m³/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Alignment - (1)	260	PF 1	12,6	131,8	132,9		133,0	0,00121	0,8	14,1	40,0	0,3
Alignment - (1)	240	PF 1	12,6	131,7	132,9		133,0	0,00065	0,7	18,0	40,0	0,3
Alignment - (1)	220	PF 1	12,6	131,3	132,9	132,7	132,9	0,00146	0,9	14,4	40,0	0,4
Alignment - (1)	200		Bridge									
Alignment - (1)	180	PF 1	12,6	130,5	131,7	131,7	132,1	0,01129	2,8	4,5	5,7	1,0
Alignment - (1)	160	PF 1	12,6	130,0	131,2	131,3	131,8	0,01735	3,4	3,7	4,4	1,2
Alignment - (1)	140	PF 1	12,6	130,0	131,2	131,0	131,5	0,00506	2,1	6,1	6,7	0,7
Alignment - (1)	120	PF 1	12,6	129,8	131,2	130,8	131,4	0,00373	1,9	6,7	6,8	0,6
Alignment - (1)	100	PF 1	12,6	129,4	131,2	130,6	131,3	0,00220	1,5	8,2	7,5	0,5
Alignment - (1)	80	PF 1	12,6	129,0	131,0	130,6	131,2	0,00466	2,1	5,9	5,1	0,6
Alignment - (1)	60	PF 1	12,6	129,0	131,1	129,7	131,1	0,00010	0,5	25,1	16,5	0,1
Alignment - (1)	40	PF 1	12,6	128,8	131,0	130,4	131,1	0,00321	1,8	6,9	5,7	0,5
Alignment - (1)	20	PF 1	12,6	128,7	131,0	130,3	131,1	0,00100	1,0	13,3	24,7	0,3

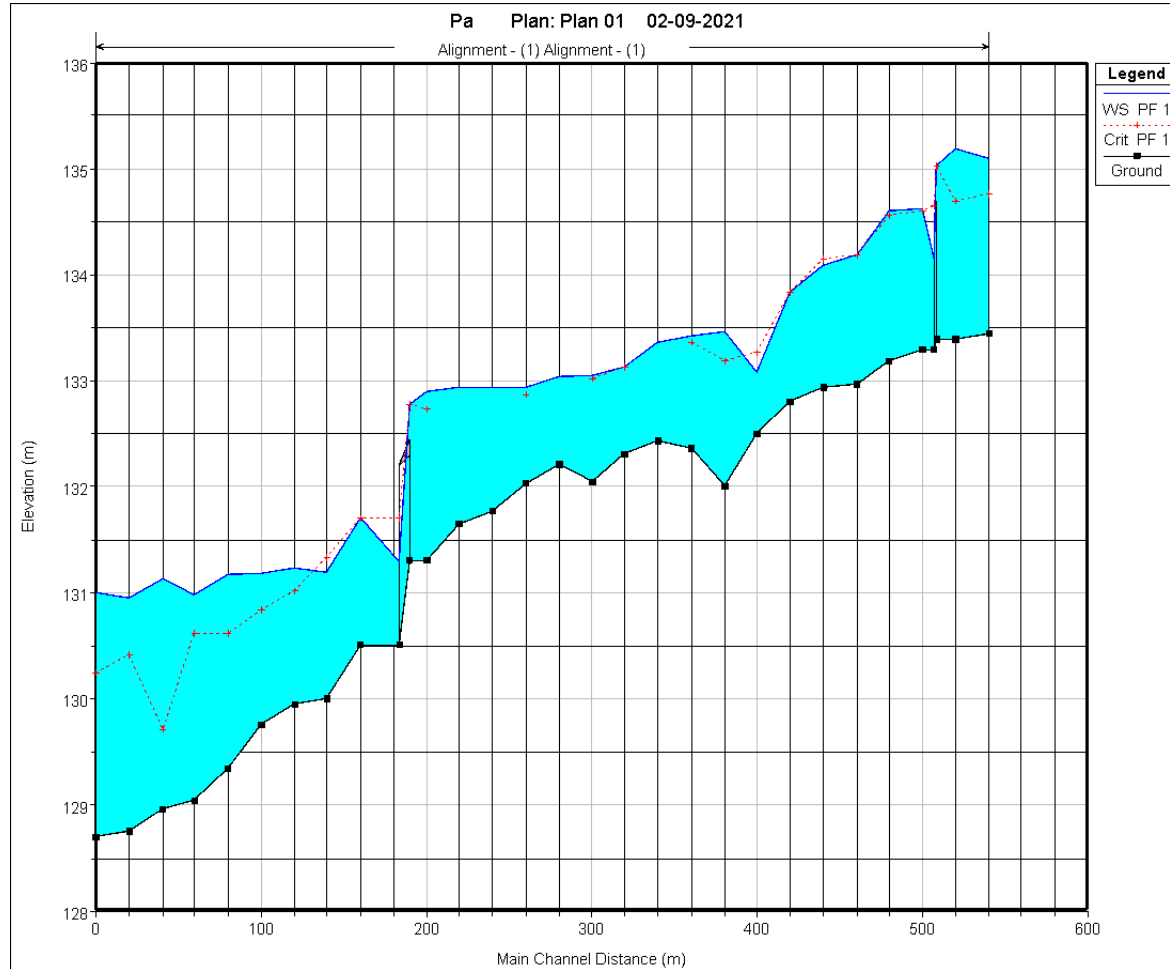
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-11 Resultados modelo hidráulico estero Palmilla, Modelo 1, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-12 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Palmilla, Modelo 1, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

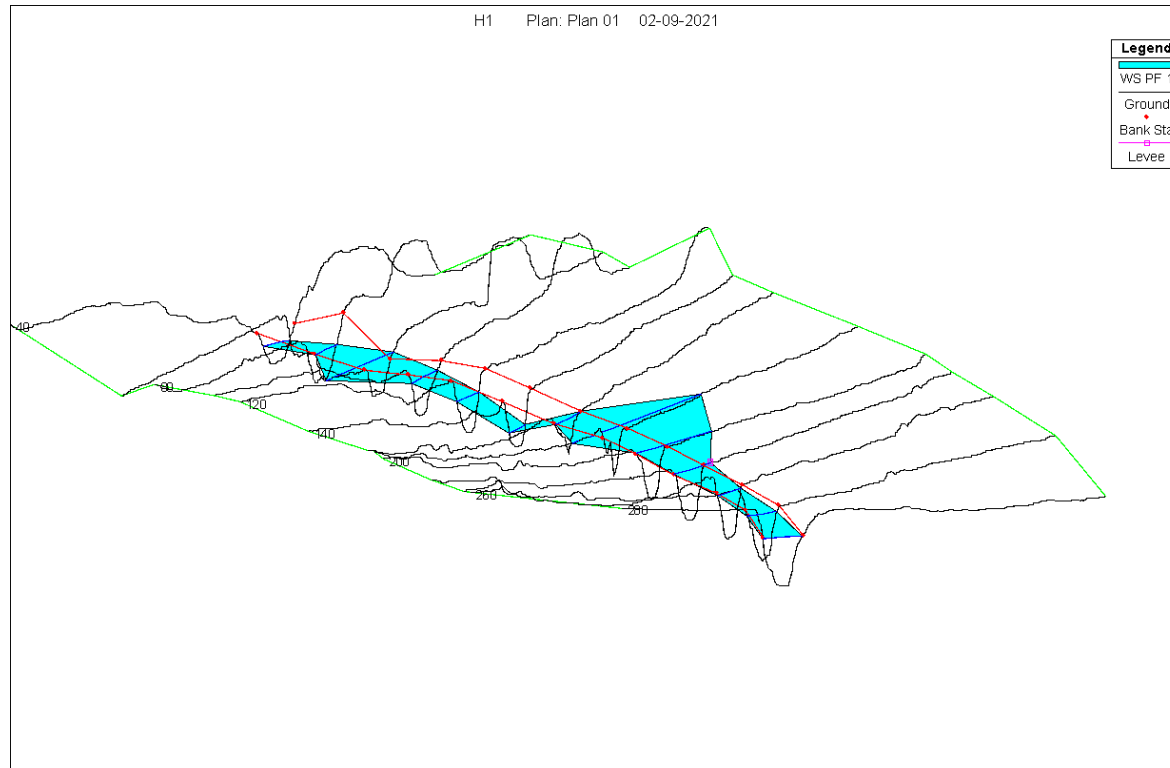
13.3.7 Resultados Estero Huanhualí Modelo 1

Tabla 13-9 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 1, T = 100 años

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m³/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Alignment - (1)	280	PF 1	34,1	117,5	120,4	119,2	120,5	0,00112	1,5	22,5	12,1	0,4
Alignment - (1)	260	PF 1	34,1	117,5	120,2		120,4	0,00238	2,1	16,7	10,0	0,5
Alignment - (1)	240	PF 1	34,1	117,4	120,2		120,4	0,00246	2,1	16,0	8,9	0,5
Alignment - (1)	220	PF 1	34,1	117,2	120,2	118,9	120,3	0,00121	1,6	21,9	14,1	0,4
Alignment - (1)	200	PF 1	34,1	117,1	120,1		120,3	0,00219	1,9	19,1	28,1	0,5
Alignment - (1)	180	PF 1	34,1	117,2	120,0	120,0	120,2	0,00422	2,2	18,6	44,2	0,6
Alignment - (1)	160	PF 1	34,1	117,3	119,5	119,6	120,0	0,01576	3,4	10,0	12,6	1,2
Alignment - (1)	140	PF 1	34,1	116,7	117,8	118,3	119,5	0,04286	5,7	6,0	7,4	2,0
Alignment - (1)	120	PF 1	34,1	116,5	118,6	118,2	118,9	0,00381	2,4	14,0	9,5	0,6
Alignment - (1)	100	PF 1	34,1	116,5	118,6		118,8	0,00309	2,1	16,4	12,7	0,6
Alignment - (1)	80	PF 1	34,1	116,4	118,6		118,8	0,00199	1,9	20,5	28,0	0,5
Alignment - (1)	60	PF 1	34,1	116,4	118,1	118,1	118,7	0,00957	3,2	10,6	10,0	1,0
Alignment - (1)	40	PF 1	34,1	116,2	117,4	117,7	118,3	0,02251	4,3	7,9	9,5	1,5

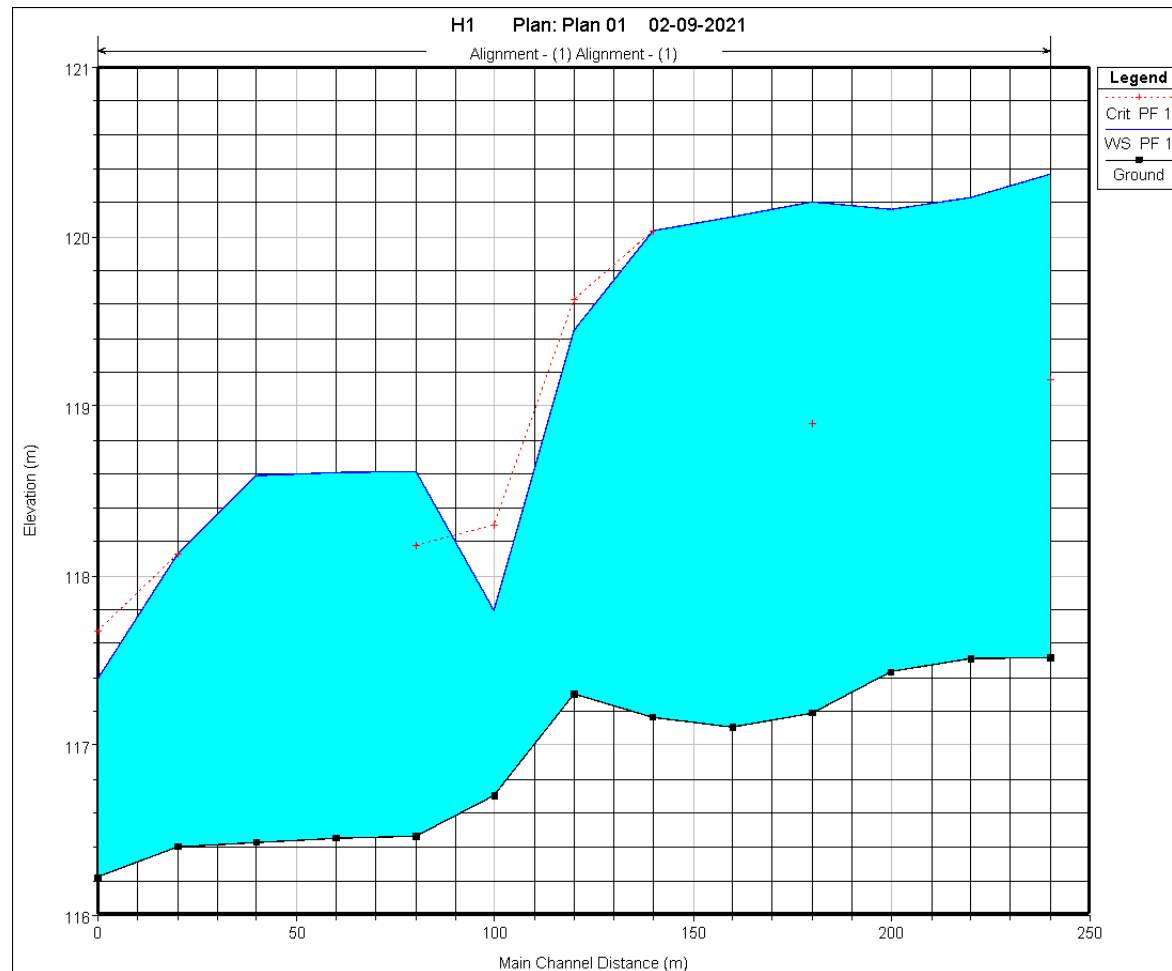
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-13 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 1, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-14 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 1, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

13.3.8 Resultados Estero Huanhualí Modelo 2

Tabla 13-10 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 2, T = 100 años

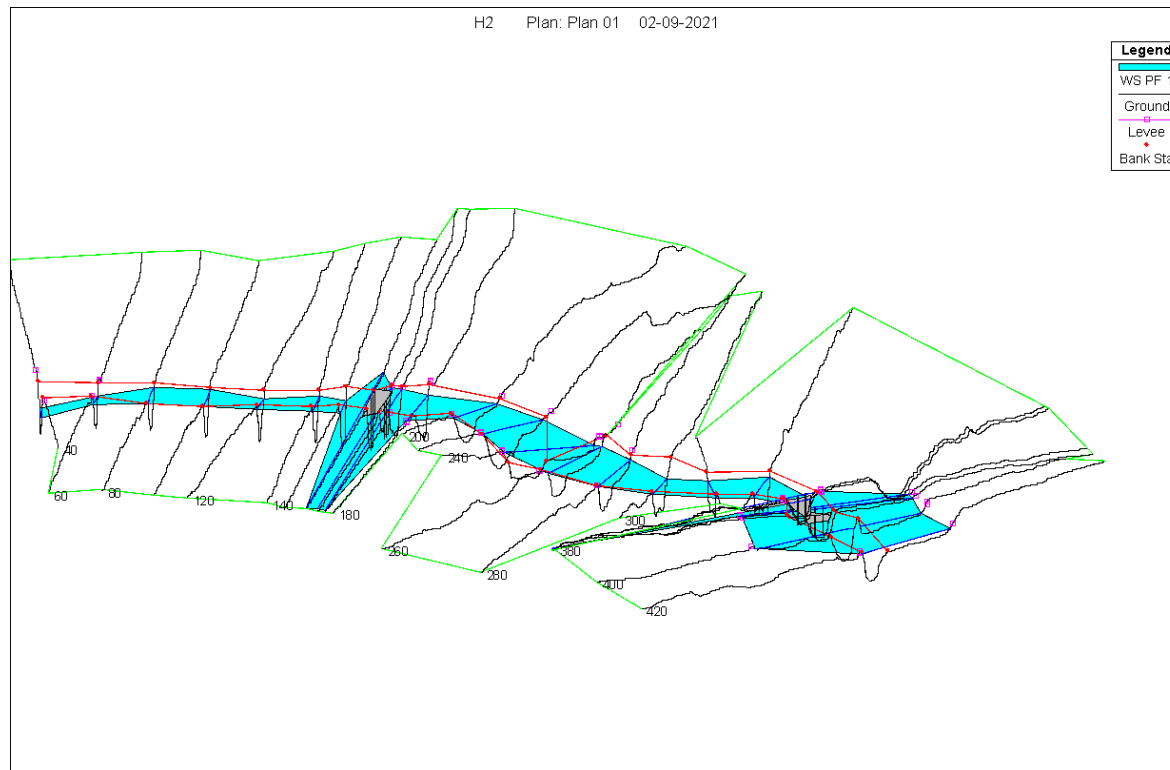
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m³/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Alignment - (1)	420	PF 1	21,5	122,5	124,5	123,8	124,6	0,00143	1,2	23,2	38,1	0,3
Alignment - (1)	400	PF 1	21,5	122,4	124,5	123,7	124,5	0,00076	1,0	30,2	64,0	0,3
Alignment - (1)	380	PF 1	21,5	122,3	124,5	123,5	124,5	0,00074	0,9	31,1	62,9	0,3
Alignment - (1)	370		Culvert									
Alignment - (1)	360	PF 1	21,5	122,1	123,5	123,3	123,8	0,00869	2,5	8,7	9,1	0,8
Alignment - (1)	340	PF 1	34,1	121,9	123,6		123,7	0,00260	1,6	21,3	17,7	0,5
Alignment - (1)	320	PF 1	34,1	121,7	123,5		123,6	0,00266	1,7	20,0	14,8	0,5
Alignment - (1)	300	PF 1	34,1	121,6	123,4		123,6	0,00328	1,9	18,2	13,9	0,5
Alignment - (1)	280	PF 1	34,1	121,5	123,4	122,9	123,5	0,00249	1,4	25,0	26,0	0,4
Alignment - (1)	260	PF 1	34,1	121,5	123,4	122,9	123,4	0,00196	1,2	28,5	30,0	0,4
Alignment - (1)	240	PF 1	34,1	121,4	123,4	122,7	123,4	0,00089	1,1	35,3	32,9	0,3
Alignment - (1)	220	PF 1	34,1	120,7	123,3	122,2	123,4	0,00107	1,1	31,7	24,5	0,3
Alignment - (1)	200	PF 1	34,1	121,2	123,1	122,8	123,3	0,00630	2,0	16,9	19,5	0,7
Alignment - (1)	180	PF 1	34,1	120,3	123,2	122,1	123,2	0,00147	1,3	25,9	22,6	0,4
Alignment - (1)	170	PF 1	34,1	120,5	123,2	121,9	123,2	0,00026	0,6	62,6	106,0	0,2
Alignment - (1)	160		Culvert									

Estudio Actualización Plan Regulador Comunal de Villa Alemana

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Alignment - (1)	150,09	PF 1	34,1	119,5	122,1		122,2	0,00168	1,6	20,9	10,5	0,4
Alignment - (1)	140	PF 1	34,1	119,5	122,1		122,2	0,00160	1,5	22,3	12,8	0,4
Alignment - (1)	120	PF 1	34,1	119,4	121,8		122,1	0,00580	2,5	13,4	9,1	0,7
Alignment - (1)	100	PF 1	34,1	119,2	121,8		122,0	0,00375	1,9	17,7	14,0	0,6
Alignment - (1)	80	PF 1	34,1	119,3	121,7		121,9	0,00346	1,9	18,0	14,0	0,5
Alignment - (1)	60	PF 1	34,1	119,3	121,1	121,1	121,7	0,01312	3,4	10,0	8,3	1,0
Alignment - (1)	40	PF 1	34,1	118,9	120,3	120,6	121,3	0,02784	4,4	7,8	8,0	1,4

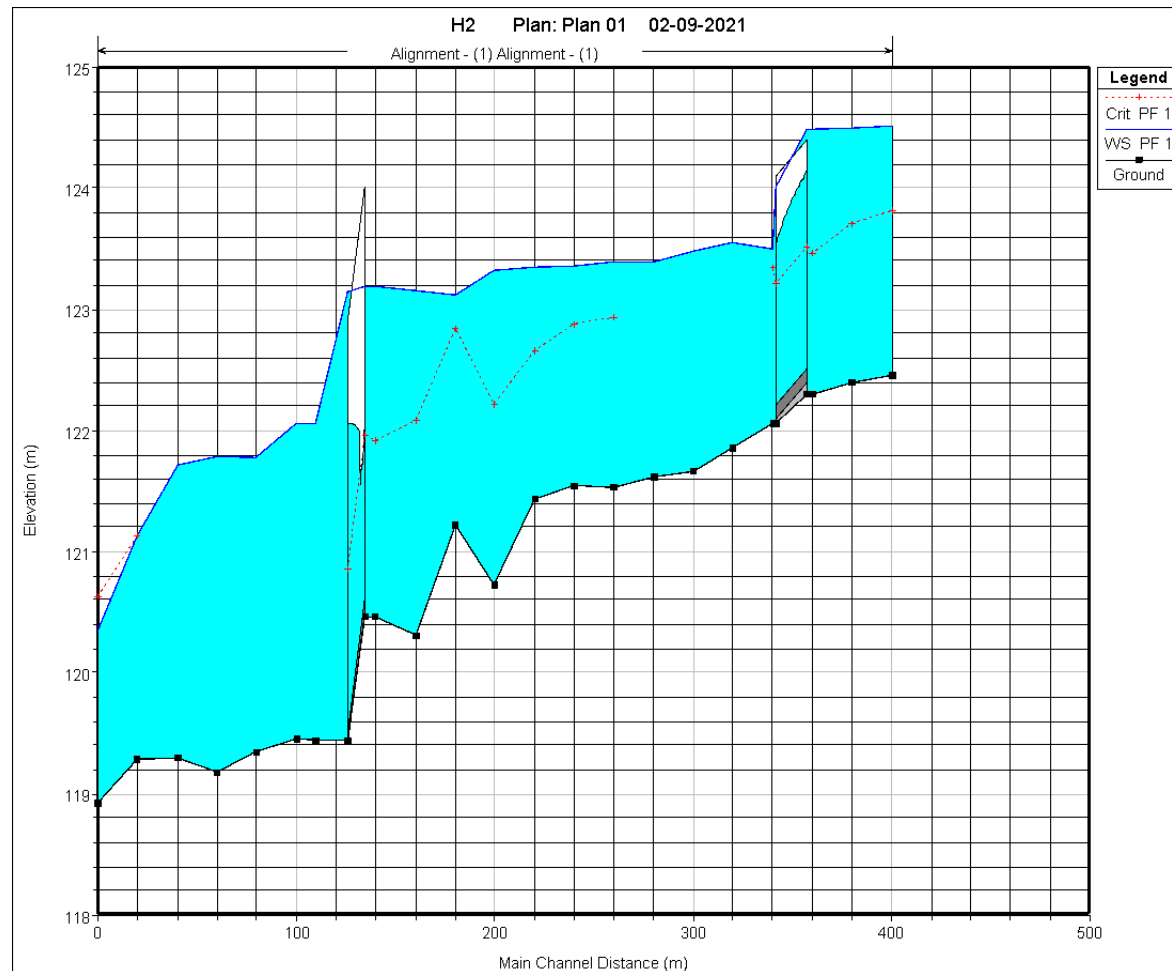
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-15 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 2, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-16 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 2, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

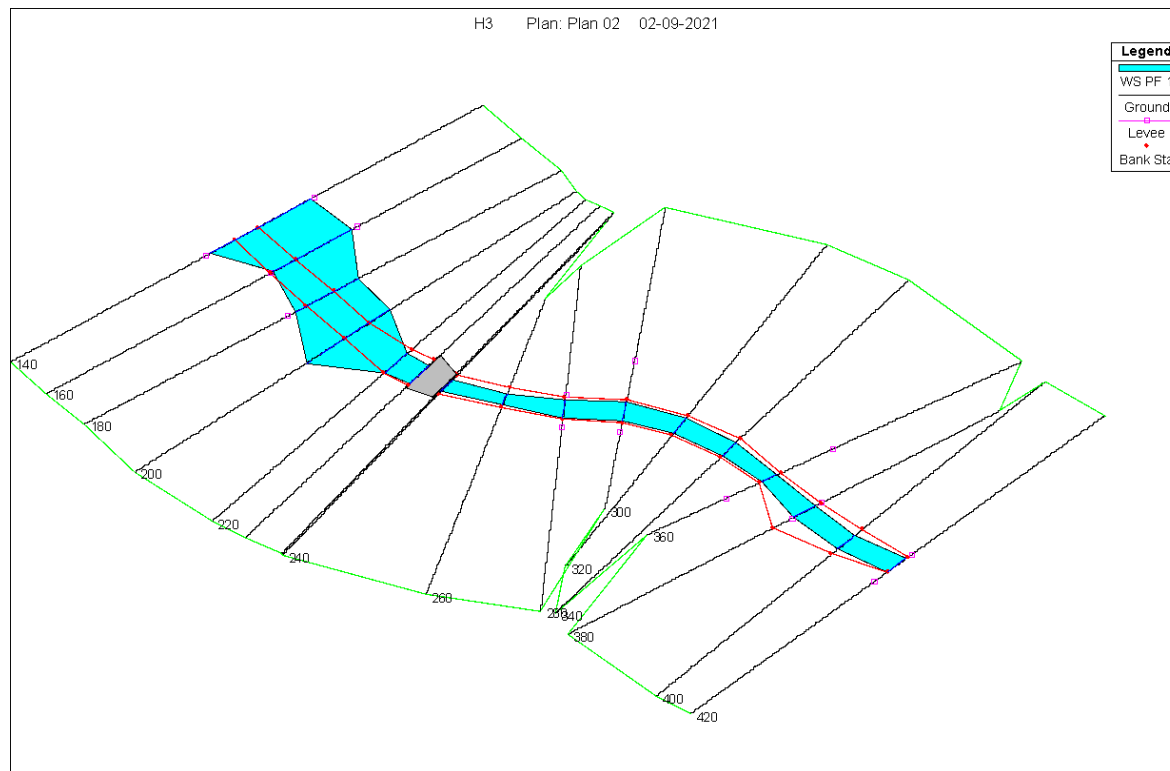
13.3.9 Resultados Estero Huanhualí Modelo 3

Tabla 13-11 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 3, T = 100 años

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m³/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Alignment - (1)	420	PF 1	23,3	124,1	126,3	125,7	126,5	0,00392	2,0	11,8	9,0	0,6
Alignment - (1)	400	PF 1	23,3	123,9	126,1		126,4	0,00605	2,3	10,2	8,5	0,7
Alignment - (1)	380	PF 1	23,3	123,9	126,1	125,5	126,3	0,00297	1,8	13,1	9,4	0,5
Alignment - (1)	360	PF 1	23,3	123,7	125,6	125,5	126,1	0,01315	3,2	7,3	5,8	0,9
Alignment - (1)	340	PF 1	23,3	123,5	125,7		125,9	0,00413	2,1	11,1	7,5	0,6
Alignment - (1)	320	PF 1	23,3	123,5	125,6		125,8	0,00288	1,8	12,7	8,1	0,5
Alignment - (1)	300	PF 1	23,3	123,3	125,6	124,8	125,8	0,00244	1,7	13,9	9,4	0,4
Alignment - (1)	280	PF 1	23,3	123,3	125,6	124,7	125,7	0,00208	1,6	14,6	9,3	0,4
Alignment - (1)	260	PF 1	23,3	123,1	125,0	125,0	125,6	0,01504	3,4	6,8	5,8	1,0
Alignment - (1)	240	PF 1	23,3	122,9	124,9	124,5	125,2	0,00704	2,6	9,1	6,8	0,7
Alignment - (1)	235		Bridge									
Alignment - (1)	220	PF 1	23,3	122,9	124,6		124,8	0,00470	1,9	12,3	12,2	0,6
Alignment - (1)	200	PF 1	23,3	122,8	124,6		124,7	0,00237	1,5	18,3	33,9	0,4
Alignment - (1)	180	PF 1	23,3	122,6	124,6	124,0	124,7	0,00165	1,4	19,5	26,1	0,4
Alignment - (1)	160	PF 1	23,3	122,6	124,5	124,3	124,6	0,00341	1,7	17,0	33,4	0,5
Alignment - (1)	140	PF 1	23,3	122,4	124,5	123,9	124,6	0,00158	1,3	23,8	42,4	0,4

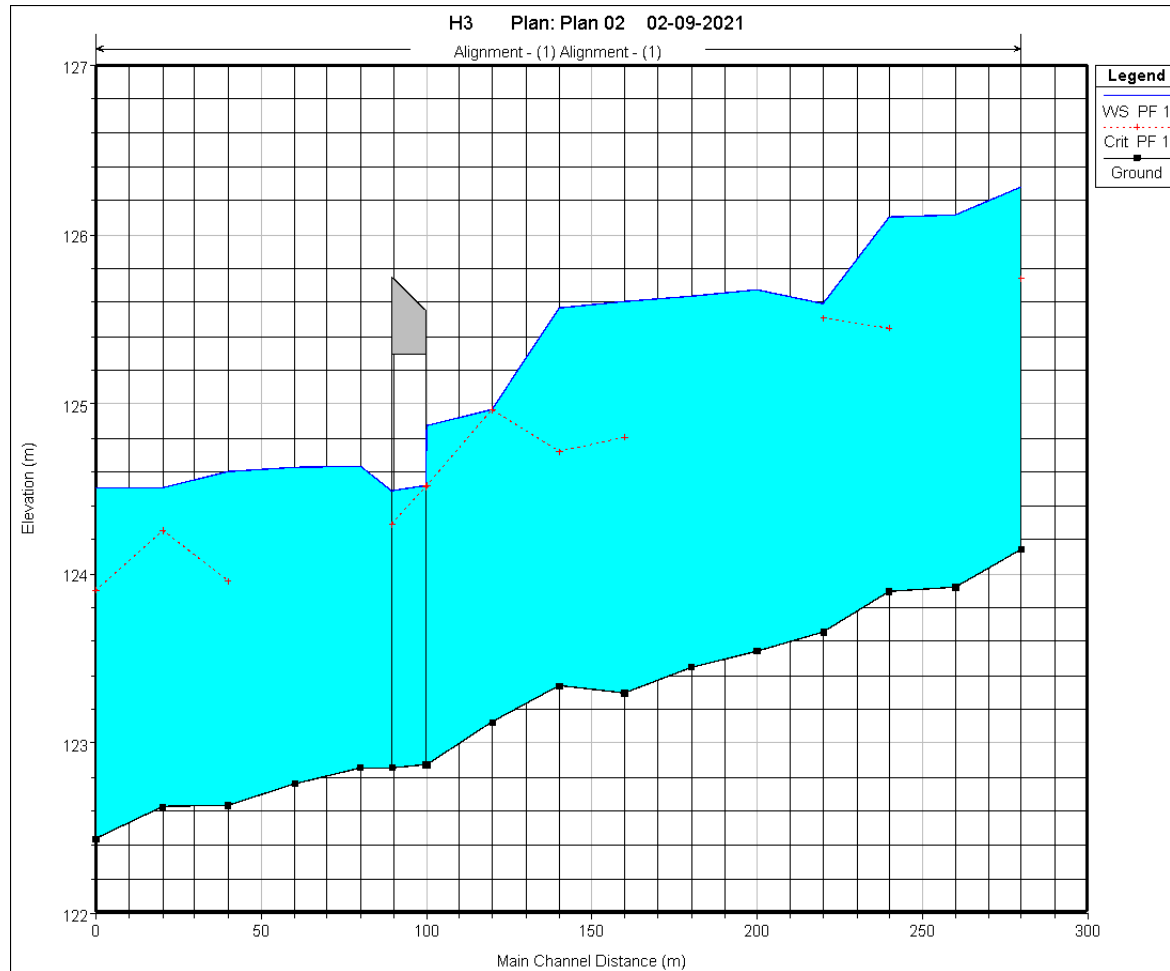
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-17 Resultados modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 3, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13-18 Perfil Longitudinal modelo hidráulico estero Huanhualí, Modelo 3, T = 100 años



Fuente: Elaboración propia.