

ETAPA 4 ANTEPROYECTO
ESTUDIO DE RIESGOS Y PROTECCIÓN AMBIENTAL
Riesgos Naturales

Actualización Plan Regulador Comunal de Yungay

Versión 1: Septiembre 2022



Organismo responsable:

Ilustre Municipalidad de Yungay



Apoyo Técnico:

Habiterra Ltda.

Este documento forma parte del Estudio de Riesgos y de Protección Ambiental para la “Actualización Plan Regulador Comuna de Yungay”, encargado por la Municipalidad de Yungay a HABITERRA.

Responsable de Proyecto

Pablo Guzmán Martínez

Arquitecto planificador

Equipo consultor

Rodrigo Rauld Plott - Profesional responsable del estudio de riesgos

Geólogo, doctor en ciencias

Felipe García Huidobro Covarrubias

Geólogo, magister en ciencias

Héredi Jara Rivera

Geóloga

Matías Surijanovic Zepeda

Geólogo

CONTENIDOS

Tabla de contenido

1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.1.1	Objetivos del estudio.....	3
1.1.2	Contexto legal del estudio.....	3
1.1.3	Metodología general del estudio de riesgos y protección ambiental	4
1.2	LÍNEAS DE BASE	6
1.2.1	Marco geodinámico.....	6
1.2.2	Marco geomorfológico	8
1.2.3	Marco geológico.....	18
1.2.4	Clima e hidrografía.....	23
1.2.5	Sismicidad.....	26
1.3	INUNDACIONES TERRESTRES	31
1.3.1	Diagnóstico	38
1.3.2	Susceptibilidad.....	43
1.4	REMOCIONES EN MASA	47
1.4.1	Catastro	47
1.4.2	Diagnóstico	48
1.4.3	Susceptibilidad.....	49
1.5	SISMICIDAD.....	54
1.5.1	Catastro	54
1.5.2	Diagnóstico	56
1.6	VOLCANISMO	57
1.6.1	Catastro	57
1.6.2	Diagnóstico	58

1.7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
1.7.1	Zonificación de peligros	60
1.7.2	Definición de las áreas de riesgo	62
1.7.3	Conclusiones y recomendaciones específicas	64
1.8	REFERENCIAS	66
	ANEXOS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1—1	Ubicación de las áreas de estudio.	2
FIGURA N° 1—2	Metodología general del estudio de riesgos y protección ambiental.....	4
FIGURA N° 3—1	Marco geodinámico de Chile.....	7
FIGURA N° 3—2	Unidades morfoestructurales de la Región de Ñuble.....	9
FIGURA N° 3—3	Unidades geomorfológicas a escala 1:60.000.	11
FIGURA N° 3—4	Niveles de terrazas fluviales con respecto al cauce actual del río Trilaleo.	12
FIGURA N° 3—5	Carta morfométrica de elevaciones de la comuna de Yungay a escala 1:300.000.	14
FIGURA N° 3—6	Carta morfométrica de pendientes de la comuna de Yungay a escala 1:300.000.....	15
FIGURA N° 3—7	Carta morfométrica de elevaciones de las comunas Yungay, Cholguán y Campanario a escala 1:60.000.	16
FIGURA N° 3—8	Carta morfométrica de pendientes de las comunas Yungay, Cholguán y Campanario a escala 1:60.000.	17
FIGURA N° 3—9	Mapa geológico de la comuna de Yungay a escala 1:60.000.....	20
FIGURA N° 3—10	Depósito de Formación La Montaña.	21
FIGURA N° 3—11	Depósitos fluviales asociados al estero Camarones.....	21
FIGURA N° 3—12	Distintos niveles de terraza asociados al Río Trilaleo. A la izquierda se presenta la terraza más joven (PIHf-2) y hacia la derecha la terraza más antigua (PIHf-1).	22
FIGURA N° 3—13	Diagrama de temperatura de Yungay durante los meses del año	23
FIGURA N° 3—14	Hidrografía de la comuna de Yungay.....	25
FIGURA N° 3—15	Representación gráfica de los terremotos de subducción históricos con magnitud estimada superior a 7.0 y sus respectivos largos de ruptura (abajo, escala en años). En color rojo se resalta la región de Ñuble y en la franja los principales terremotos ocurridos frente a sus costas.	27
FIGURA N° 3—16	Mapa regional del contexto de la comuna de Yungay con los epicentros de la sismicidad registrada de magnitud superior a 2,5 según el catálogo NEIC entre 1970 y 2020.	29
FIGURA N° 3—17	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 Ilustración 2. Notar diferencia en escala vertical de ambos gráficos.	30
FIGURA N° 4—1	Catastro de inundaciones por desborde de cauce, anegamiento y remociones en masa en la comuna de Yungay.	36
FIGURA N° 4—2	Recorrido de terreno durante los días 13 y 14 de diciembre del 2021.....	37
FIGURA N° 4—5	Terraza sur del río Trilaleo en el Balneario Municipal que hace años fue inundada debido a lluvias intensas.....	38

FIGURA N° 4—7 Puente Cholguán donde se observan ramas atoradas en la estructura del puente que evidencian los niveles que ha alcanzado el agua del río.....	39
FIGURA N° 4—6 Calle Ignacio Carrera Pinto que es afectada por inundaciones debido a la modificación e intervención de un antiguo canal.	40
FIGURA N° 4—3 Canales que atraviesan la localidad de Campanario.....	41
FIGURA N° 4—4 Zona deprimida al oriente dentro de Campanario que podría ser afectada por anegamiento. En la parte baja de la fotografía, adyacente a la vereda, se ve el material arenoso permeable que cubre la mayor parte de la localidad.....	42
FIGURA N° 4—8 Mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauce.....	44
FIGURA N° 4—9 Mapa de susceptibilidad de inundación por anegamiento.....	46
FIGURA N° 5—1 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno.....	49
FIGURA N° 5—2 Mapa de susceptibilidad de procesos de ladera.....	51
FIGURA N° 5—3 Mapa de susceptibilidad de flujos de barro y/o detrito.....	53
FIGURA N° 8—1 Esquema del daño provocado por eventos de inundación por desborde de cauces con diferentes magnitudes.....	62

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO N° 1—1 Comparación entre la definición de áreas de riesgo del artículo 2.1.17 de la OGUC y la nomenclatura utilizada en este informe.....	4
CUADRO N° 1—2 Categorías en el análisis del nivel de amenaza y susceptibilidad comparable.....	6
CUADRO N° 3—1 Datos de terremotos históricos con magnitud superior a 7.0 cuya zona de ruptura coincide con la comuna de Yungay.....	27
CUADRO N° 4—1 Catastro de inundaciones que han afectado la comuna de Yungay y sus alrededores.....	32
CUADRO N° 5—1 Catastro de remociones en masa en la comuna de Yungay.....	48
CUADRO N° 6—1 Catastro de sismos que han afectado la comuna de Yungay.....	54
CUADRO N° 7—1 Registro de eventos eruptivos históricos cercanos a la comuna de Yungay.....	58
CUADRO N° 8—1 Resumen de los aspectos metodológicos para la determinación de la susceptibilidad.....	61
CUADRO N° 8—2 Criterios de definición de las áreas de riesgo (escala 1:5.000) según el artículo 2.1.17 de la OGUC para cada peligro estudiado.....	63
CUADRO N° 2—1 Lista de antecedentes en formato shape de localidades de la comuna de Yungay.....	72
CUADRO N° 2—2 Lista de antecedentes en formato shape (.shp) a nivel comunal del PRC Yungay 2009. ..	73

1.1 INTRODUCCIÓN

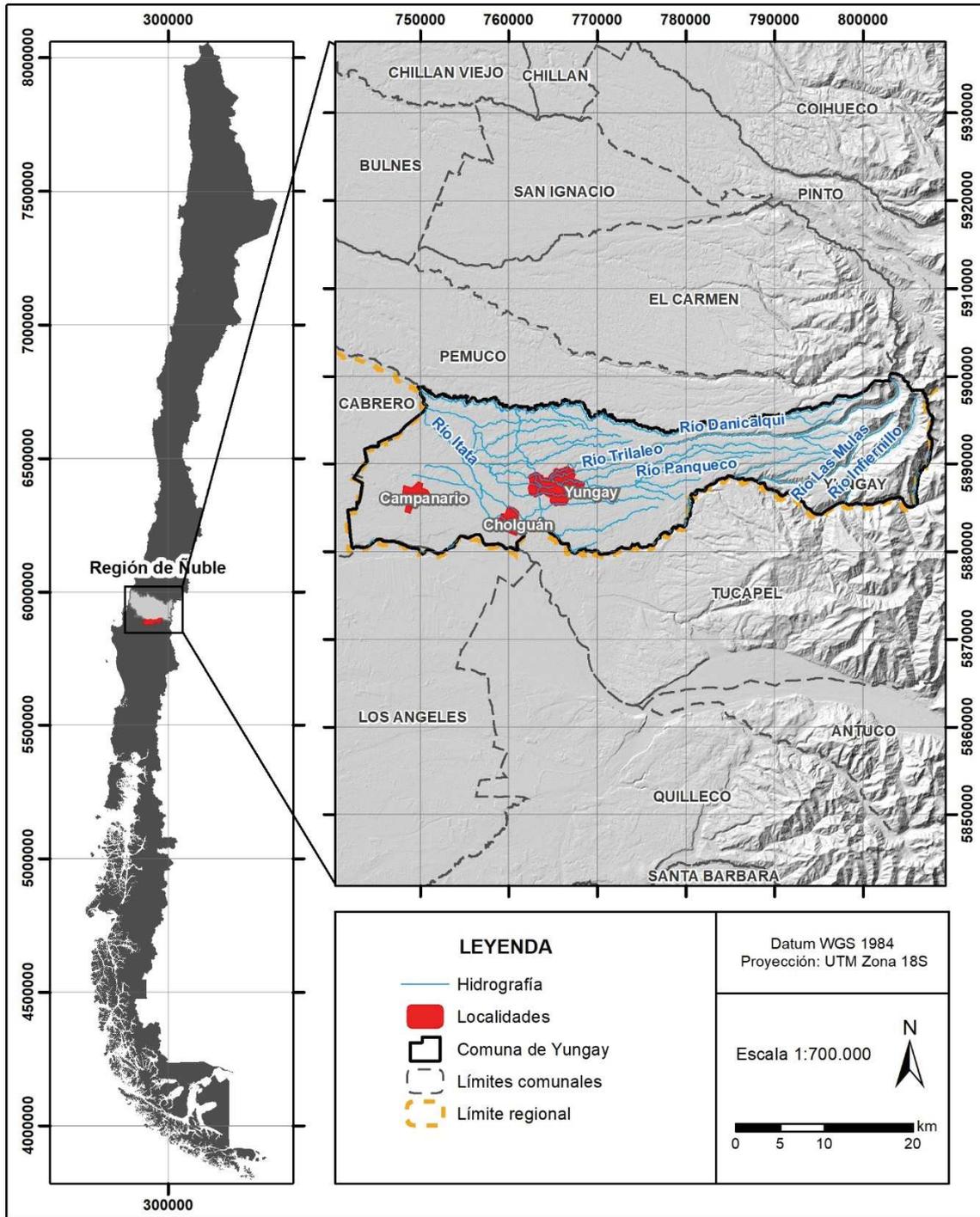
Este documento se ha elaborado para la actualización del Plan Regulador Comunal (PRC) de Yungay, y en él se analizan los peligros de origen natural. Según el artículo 2.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), que define los documentos que conforman el Plan Regulador Comunal, el instrumento debe considerar, entre otros, un “Estudio de Riesgos y de Protección Ambiental”, con sus respectivas áreas de restricción y condicionadas para ser utilizadas de acuerdo con las disposiciones contempladas en los artículos 2.1.17 y 2.1.18 de la misma OGUC.

La comuna de Yungay se ubica en la provincia de Diguillín, Región de Ñuble. Limita al norte con la comuna de Pemuco, al noreste con la comuna de Pinto, al sur con las comunas de Tucapel y Los Ángeles, al poniente con la comuna de Cabrero y al oriente con Antuco, estas últimas cuatro comunas pertenecen a la región del Biobío.

El estudio analiza las amenazas naturales en la comuna de Yungay, además de un análisis detallado de la ciudad de Yungay y de las localidades de Cholguán y Campanario.

Este informe incluye la recopilación de los antecedentes que fueron utilizados en el desarrollo del estudio, las líneas de base necesarias para su elaboración, un catastro de los peligros geológicos relevantes para el análisis, un diagnóstico de cada uno de ellos, su zonificación por susceptibilidad y una propuesta de definición de áreas de riesgo.

FIGURA N° 1.1—1 Ubicación de las áreas de estudio.



1.1.1 Objetivos del estudio

El objetivo general de este estudio es identificar y delimitar de áreas susceptibles a ser afectadas por peligros de origen natural, que sirvan para la actualización del Plan Regulador Comunal de Yungay, y que se guíe por las directrices definidas en la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), así como de otros reglamentos, guías y circulares.

1.1.2 Contexto legal del estudio

El Estudio de Riesgos y de Protección Ambiental se define en el artículo 2.1.10 de la OGUC, y contiene las áreas de restricción y condiciones para ser utilizadas de acuerdo con las disposiciones contempladas en los artículos 2.1.17 y 2.1.18 del mismo cuerpo legal. En consecuencia, dicho estudio debe delimitar las zonas no edificables y las áreas de riesgo que se contemplan en el artículo 2.1.17 de la OGUC y las áreas de protección de recursos de valor natural y patrimonial cultural según los criterios contenidos en el artículo 2.1.18 de la OGUC.

Las zonas no edificables son *“aquellas 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”*¹, es decir, *“los terrenos que por su especial naturaleza y ubicación no sean edificables”*². De esta forma, las zonas no edificables corresponden a *“aquellas franjas o radios de protección de obras de infraestructura peligrosa, tales como aeropuertos, helipuertos, torres de alta tensión, embalses, acueductos, oleoductos, gasoductos, u otras similares, establecidas por el ordenamiento jurídico vigente”*³.

Las áreas de riesgo son *“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”*⁴.

Pese a que la OGUC cuenta con una categorización de las áreas de riesgos, esta no se ajusta a definiciones utilizadas y aceptadas internacionalmente. La categorización que se utiliza en la OGUC que se encuentra en el artículo 2.1.17 considera cuatro numerales, asociadas a diferentes 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.*
4. *Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.*

En el CUADRO N° 1.1—1 se establece una homologación entre las categorías anteriores, definidas en la OGUC, y las definiciones utilizadas en este estudio. El análisis de los peligros de origen natural y los criterios y resultados de la zonificación estos se encuentra en los capítulos 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6.

¹ Inciso tercero del artículo 2.1.17 de la OGUC.

² Inciso primero del artículo 60° de la LGUC.

³ Inciso sexto del artículo 2.1.17 de la OGUC.

⁴ Inciso cuarto del artículo 2.1.17 de la OGUC.

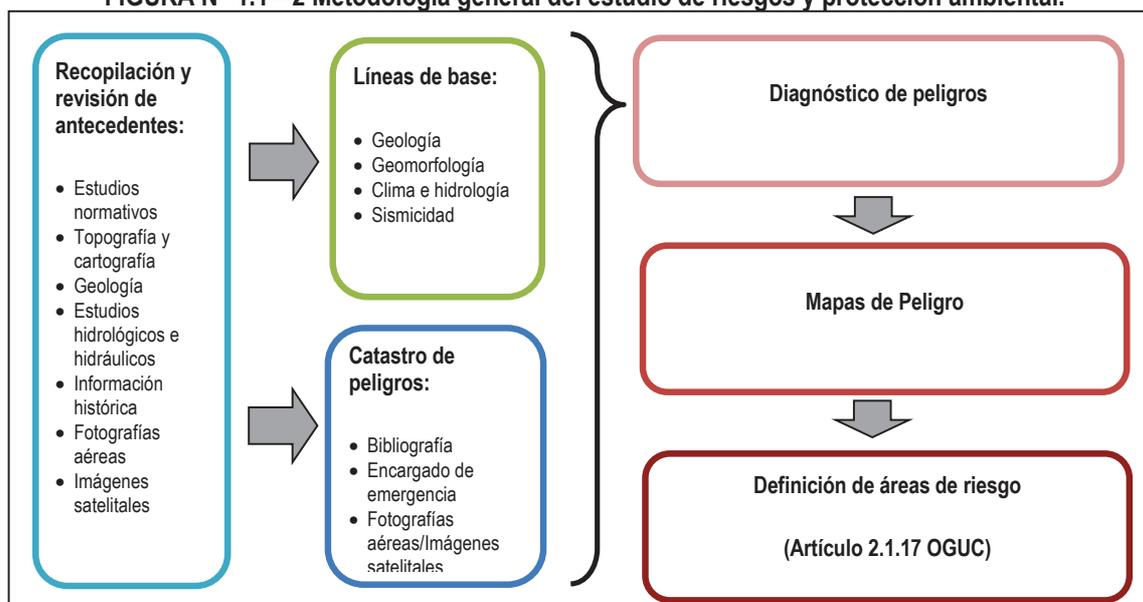
CUADRO N° 1.1—1 Comparación entre la definición de áreas de riesgo del artículo 2.1.17 de la OGUC y la nomenclatura utilizada en este informe.

"Áreas de riesgo" según artículo 2.1.17 de la OGUC	Nomenclatura utilizada en este informe		Análisis y 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 cauce	Capítulo 1.3
		Anegamiento	
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas	Remociones en masa	Flujos de barro y/o detritos	Capítulo 1.4
		Procesos de ladera	
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas	Sismicidad		Capítulo 1.5
	Volcanismo		Capítulo 1.6

1.1.3 Metodología general del estudio de riesgos y protección ambiental

En función de los objetivos propuestos, la metodología de dicho 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 de las áreas urbanas; además de aquellas áreas ocupadas por la población, se considerarán aquellas donde se puedan establecer nuevas poblaciones u obras de infraestructura, según corresponda, para que, de esta forma, definir las áreas de riesgo, según la definición de la OGUC (FIGURA N° 1.1—2). A continuación, se describen de manera general las actividades que se realizan para elaborar este estudio.

FIGURA N° 1.1—2 Metodología general del estudio de riesgos y protección ambiental.



a) Recopilación y revisión de antecedentes

Se recopilaron y revisaron los antecedentes entregados por el mandante, relevantes para la elaboración del estudio de riesgos de la comuna. Adicionalmente, se utiliza información disponible en instituciones públicas y privadas. La información recopilada es:

- Información topográfica y cartográfica, ya sea levantada para este estudio o en alguno anterior.
- Antecedentes entregados que corresponden a PRC Yungay 2009.
- Cartografía geológica de la comuna.
- Información hidrológica y meteorológica de la comuna.
- Información histórica y estudios de carácter técnico relativos a peligros que han afectado a la comuna.
- Fotografías aéreas e imágenes satelitales.

Los antecedentes revisados y consultados se sintetizan en el "Revisión de antecedentes".

b) 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 identificar aquellos sectores que son más propensos a su ocurrencia y estimar, aunque sea de manera general, la recurrencia de estos peligros. De esta forma, la línea de base para el estudio fundado de riesgos considera las siguientes componentes:

- Geología: En ella se identifica y caracteriza los materiales y estructuras presentes en el territorio estudiado.
- Geomorfología: Reconoce y describe las formas presentes en la comuna y en las áreas urbanas, y cuantifica sus parámetros morfométricos.
- Sismicidad: Identifica las distintas fuentes sísmicas que pueden afectar al territorio comunal.
- Clima e hidrología: Se identifica el clima, la hidrografía e hidrología de la zona.

c) Catastro de peligros

Se elaboran cuadros con los eventos peligrosos que han afectado al área estudiada, que contienen, en la medida que fuera 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 utiliza para elaborar los diagnósticos de cada uno de los peligros estudiados. Las fuentes de información utilizadas son:

- Fuentes bibliográficas.
- Revisión de fotografías aéreas e imágenes satelitales.
- Campaña de terreno.
- Reunión con encargado de emergencias.

d) Diagnóstico de peligros

La información recopilada y generada se sistematiza para definir las áreas donde existen condiciones para que ese peligro las afecte. El resultado de esta actividad es un análisis, por una parte, de los **factores condicionantes**, que permite identificar los sectores que reúnen condiciones más favorables para la ocurrencia del peligro y, por otra parte, los **factores desencadenantes** que permiten estimar la recurrencia de los eventos del peligro en cuestión, de cada uno de los peligros reconocidos a partir de la información disponible y las características físicas de los peligros estudiados cuando la información lo permite.

e) Elaboración de mapas de peligros

A partir de los factores condicionantes reconocidos en la actividad anterior, se definen criterios objetivos que permiten asignar un nivel de **susceptibilidad por generación** en el territorio. En términos generales, se asigna un grado de susceptibilidad ‘muy alta’ a aquellas 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 más grandes de los que se tengan registros históricos) y susceptibilidad ‘moderada’ a las áreas que puedan ser afectadas por eventos excepcionales, de los que muchas veces no existen registros históricos, pero si otro tipo de evidencias, como geológicas o morfológicas. En el CUADRO N° 1.1—2 se comparan los grados de susceptibilidad anteriormente expuestos con las categorías establecidas por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE). Estos criterios se representarán gráficamente en mapas de peligros que dan cuenta de manera gráfica los diferentes niveles de susceptibilidad.

CUADRO N° 1.1—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	0,10 – 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 y más años	<0,01	Moderada

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

f) Definición de áreas de riesgo y recomendaciones

Una vez elaborados los mapas de susceptibilidad, se definieron las áreas de riesgo de acuerdo con lo establecido en el artículo 2.1.17 de la OGUC. Para lo anterior, se asignó esta categoría en función de los mapas de susceptibilidad 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 mediante los distintos niveles de susceptibilidad.

1.2 LÍNEAS DE BASE

1.2.1 Marco geodinámico

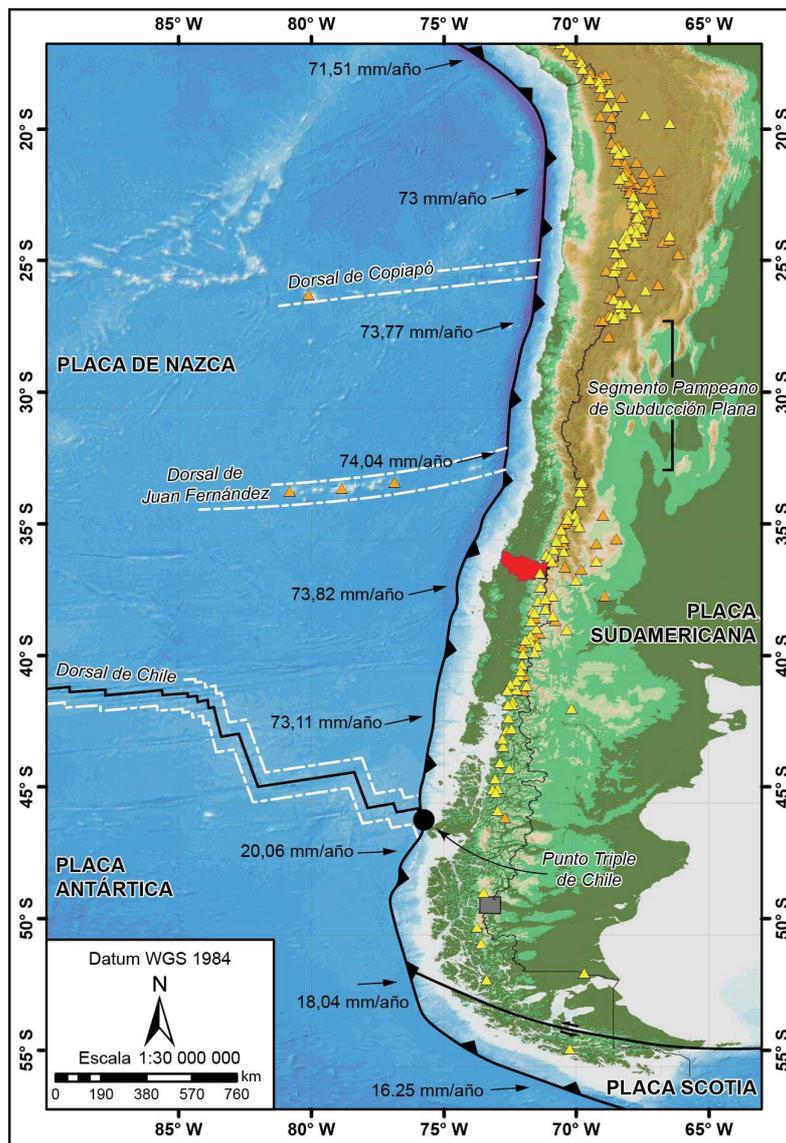
Chile se ubica en un margen convergente activo de placas oceánica-continental (FIGURA N° 1.2—1) en donde la placa oceánica Nazca subducta bajo el margen occidental de la placa continental Sudamericana, dando origen a los Andes Centrales. Este proceso de subducción se reconoce activo, al menos, desde el Jurásico Temprano (Mpodozis & Ramos, 1989), o inclusive podría persistir desde el Pérmico (Coloma, y otros, 2017). A partir del Eoceno, la tasa de convergencia ha variado entre 5 y 15 cm/año (Somoza, 1998), siendo actualmente en torno a 7,5 cm/año (DeMets, Gordon, Argus, & Stein, 1994).

El segmento ubicado entre los 33°S y los 46°S corresponde, dentro del esquema de segmentación andina de Mpodozis y Ramos (1989), a una zona de subducción tipo chilena caracterizada por un ángulo de subducción entre las placas Nazca y Sudamericana de aproximadamente 30°.

La acumulación y posterior relajación de los esfuerzos producto de la convergencia del régimen de subducción es la causa de que, desde el extremo norte de Chile hasta la península de Taitao, sea afectado frecuentemente por terremotos. La gran mayoría de estos sismos y los eventos de gran magnitud se originan en la zona del contacto entre placas y surgen de la liberación súbita de gran parte de la energía acumulada durante el proceso

de convergencia de placas (Ej. Sismos del 6 de abril de 1943 que afectó a la Región de Coquimbo, sismo de mayo de 1960 en Valdivia, 3 de marzo de 1985 en la Región de Valparaíso, 27 de febrero de 2010 que afectó a la Región del Bio Bío). Los esfuerzos acumulados por la subducción también se propagan hacia el interior de la placa continental y se liberan mediante sismos superficiales, normalmente de menor magnitud, pero más destructivos localmente (Ej. Sismo de Las Melosas de 1958, sismo de Chusmiza de 2001). Otros sismos son provocados por la relajación de esfuerzos de la Placa de Nazca una vez subductada, estos sismos pueden ser muy destructivos a pesar de no tener las mayores magnitudes (Ej. Sismo de Chillán de 1939, sismo de Punitaqui de 1997 y sismo de Tarapacá de 2005).

FIGURA N° 1.2—1 Marco geodinámico de Chile.



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

1.2.2 Marco geomorfológico

a) Unidades morfoestructurales

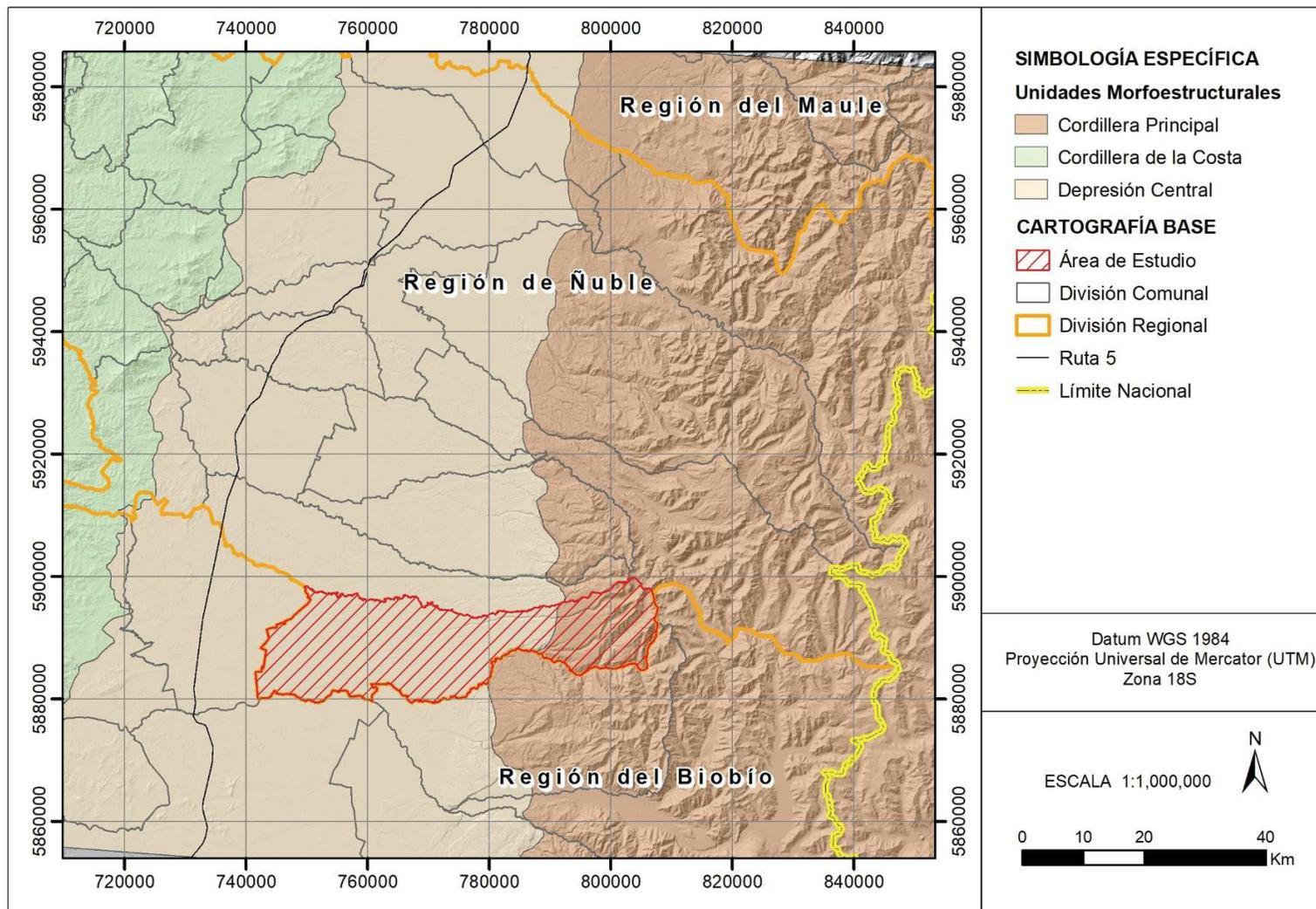
El segmento andino chileno que abarca la región del Ñuble exhibe cuatro unidades morfoestructurales principales dispuestas en franjas de orientación NNE-SSW. De oeste a este: Planicies Litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal. La comuna de Yungay se ubica entre la Depresión Central y el flanco occidental de la Cordillera Principal (FIGURA N° 1.2—2). Sus características geomorfológicas más relevantes se describen a continuación.

La Depresión Central constituye una amplia llanura a unos 150 m de altitud media y con una superficie plana a levemente ondulada (Gajardo, 1981). Está formada a partir de la coalescencia de grandes abanicos aluviales originados por los ríos más importantes que drenan desde la Cordillera Principal, por lo que hacia el este su altura media aumenta gradualmente hasta unos 400 a 500 m s.n.m. En consecuencia, esta zona se encuentra disectada por los ríos que la inciden. Dentro del área comunal, el material que forma y rellena esta llanura de sedimentación corresponde a elementos originados de la erosión de los depósitos volcánicos procedente de las erupciones principalmente de los volcanes Chillán y Antuco.

La Cordillera Principal corresponde a una cadena montañosa de morfología abrupta que incluye el arco volcánico actual, con alturas máximas que alcanzan los 3.000 m s.n.m. y cuyo paisaje contiene la impronta de una fuerte erosión glacial sucedida por la erosión fluvial y pluvial. Dentro de la comuna, que incorpora el segmento más bajo de esta unidad, se caracteriza por tener una topografía de serranías y cordones montañosos con altura que varían entre 400 y los 2.180 m s.n.m.

Las localidades estudiadas se encuentran en la Depresión Central.

FIGURA N° 1.2—2 Unidades morfoestructurales de la Región de Ñuble.



b) Aspectos morfológicos relevantes

Como fue mencionado en el capítulo a), la comuna de Yungay se ubica entre la Depresión Central y el flanco occidental de la Cordillera Principal. Dentro de cada una de estas morfoestructuras se reconocen una serie de geoformas que se presentan en la FIGURA N° 1.2—3 y se detallarán a continuación.

En el sector que abarca la Cordillera Principal se reconocen las rocas más antiguas dentro de la comuna, que forman los cordones montañosos hacia el este, y que han sido profundamente disectadas por la acción glacial formando grandes escarpes y zonas de altas pendientes sus laderas seguido por profundos **valles**, aspecto que favorece la depositación de **abanicos aluviales** y **coluvios** en el fondo de los valles. Estos últimos son disectados por los **cauces actuales** como son los ríos Trilaleo, Las Mulas y Cangrejo que, descienden desde la Cordillera Principal y continúan por la Depresión Central.

En la Depresión Central se distingue una extensa llanura de sedimentación o depositación reciente, destacándose dos morfologías relevantes. La primera consiste en una extensa **planicie ondulada** de suaves lomajes, sin grandes pendientes y con cursos de agua normalmente encajonados, sector donde se forman **terrazas fluviales**. Esta planicie fue formada por la erosión de abanicos volcanoclásticos, originando la morfología característica ubicada entre la Cordillera Principal y el río Itata (Duran Iligaray, 2009). Hacia el sur de la localidad de Cholguán y al oeste de la ciudad de Yungay, se ubica una **llanura** asociada a un cono o abanico generado por el río Laja.

A escala local, la ciudad de Yungay se ubica sobre la planicie ondulada de la Depresión Central. Dicha planicie se encuentra incidida por varios sistemas de drenaje que limitan e intersectan a la localidad con orientación esencialmente este-oeste. Los depósitos fluviales de estos ríos han desarrollado varios niveles de **terrazas fluviales** asociadas a los procesos de erosión y sedimentación fluvial. Así, en los ríos Trilaleo e Itata y en los esteros Camarones y Los Banos se reconocieron tres niveles de terrazas, mientras que en el estero San José, sólo se reconocieron dos niveles (FIGURA N° 1.2—4).

Vinculados espacialmente a los ríos se encuentran **quebradas y conos**, principalmente en los esteros Camarones, San José y Nipilco relacionados con las zonas de mayor pendiente generados por la incisión fluvial. Relacionado a estas últimas geoformas, algunas de las quebradas desarrollan **abanicos aluviales** de escala local, reconocidas alrededor de las redes de drenaje de la zona de la ciudad de Yungay, especialmente en el río Trilaleo y los esteros Camarones, San José y Nipilco. Los abanicos se distribuyen de manera uniforme principalmente a lo largo de los sistemas de drenaje mencionados.

La localidad de Campanario se encuentra sobre la llanura del cono del río Laja. En esta geoforma se encuentran canales con fines agrícolas, donde no se han reconocido morfologías asociadas a erosión ni sedimentación fluvial.

FIGURA N° 1.2—3 Unidades geomorfológicas a escala 1:60.000.

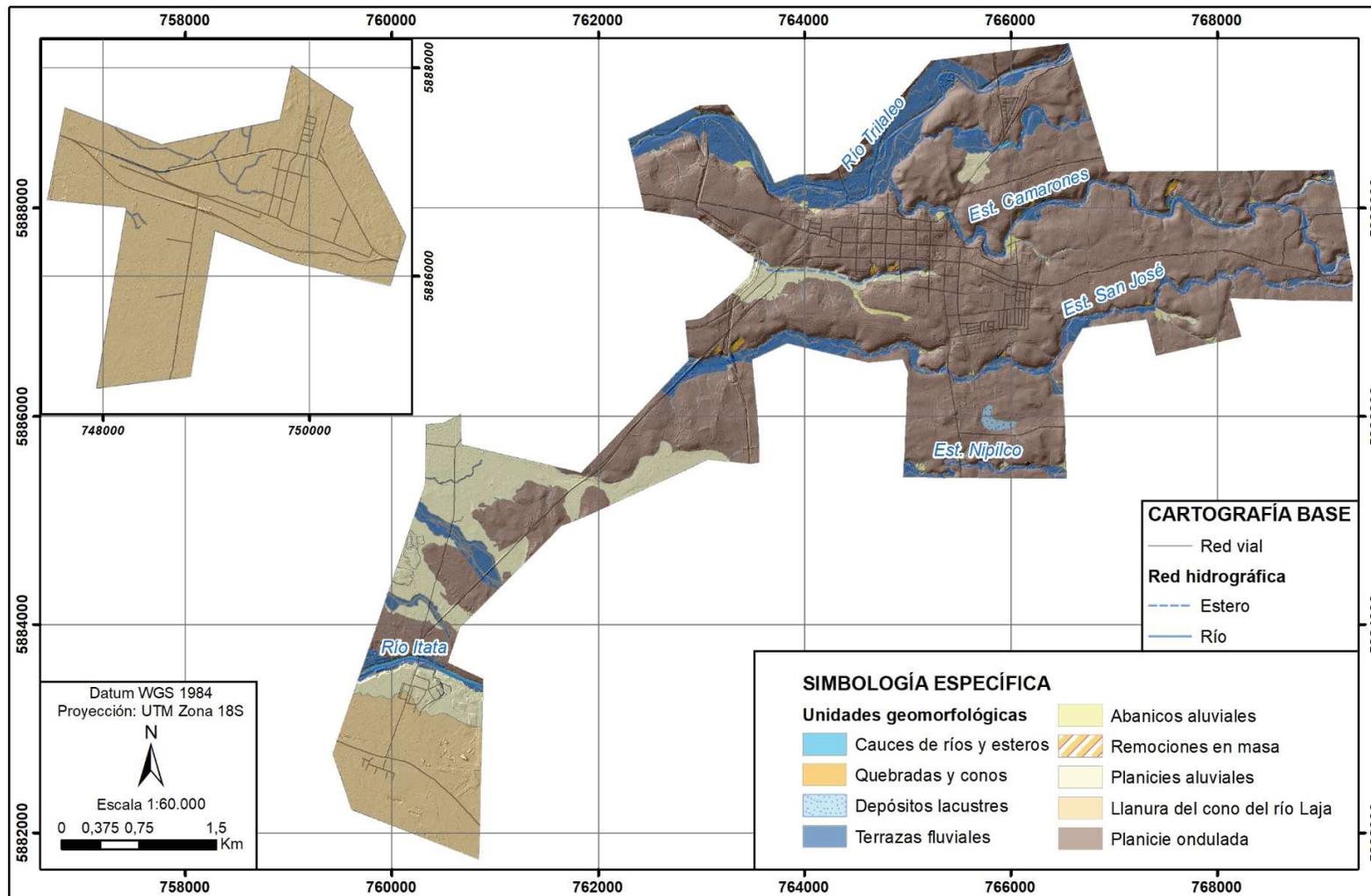
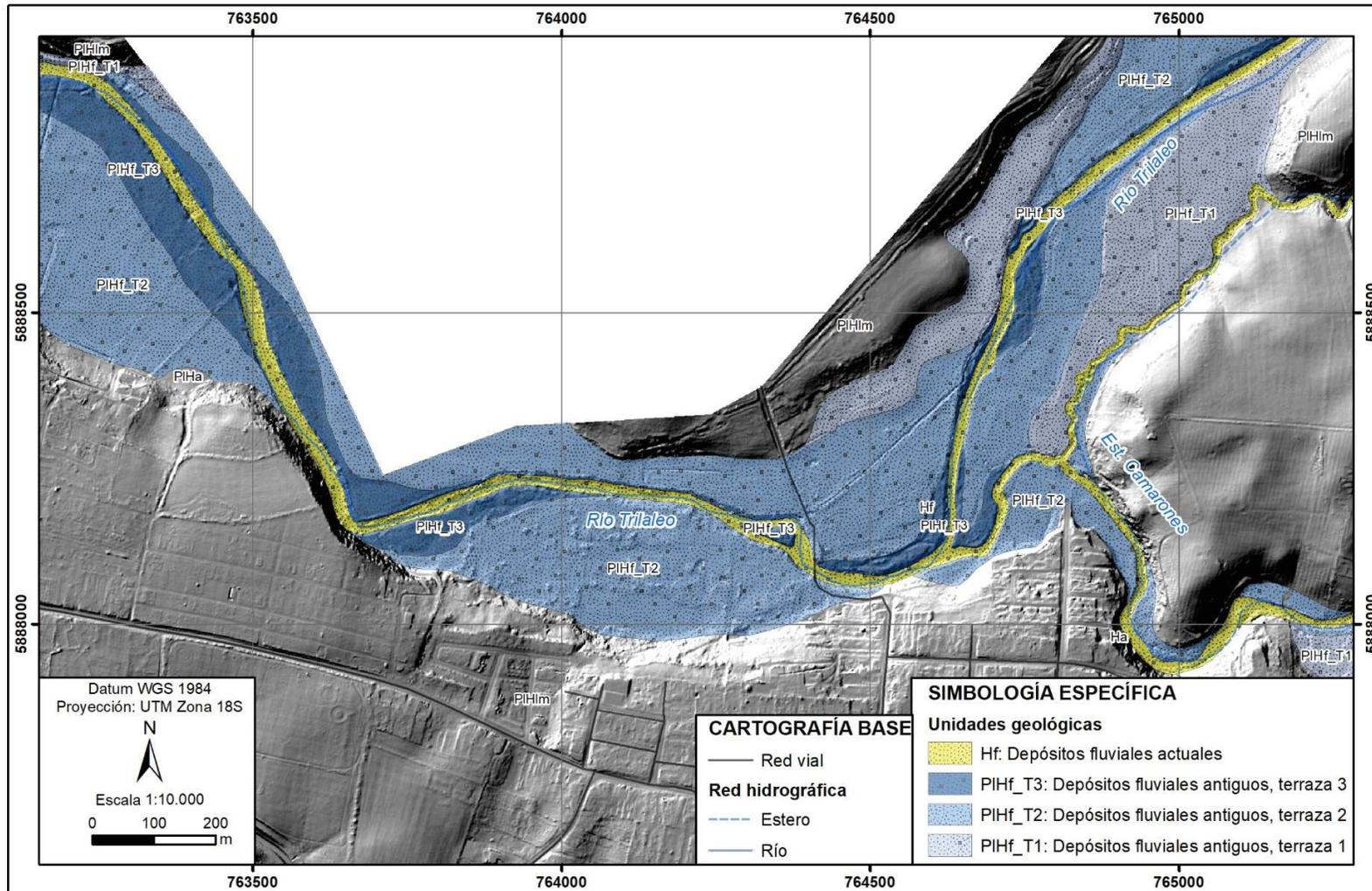


FIGURA N° 1.2—4 Niveles de terrazas fluviales con respecto al cauce actual del río Trilaleo.



c) Parámetros morfométricos

En la comuna de Yungay las elevaciones varían entre los 116 y 2.179 m s.n.m. (FIGURA N° 1.2—5). Las mayores alturas se ubican en la Cordillera Principal, mientras que las partes más bajas se ubican al poniente de la comuna que forma la parte de la Depresión Central.

Con relación a las pendientes (FIGURA N° 1.2—6), dominan las menores a 15° y es en estas donde se ubican los asentamientos. Corresponden a la planicie del sector poniente y a los valles dentro de la Cordillera Principal. Las pendientes mayores se encuentran en los flancos de los ríos y en las zonas más altas de la comuna.

En particular, las zonas urbanas de la comuna al encontrarse en la Depresión Central poseen una menor elevación oscilando entre los 174 y 307 m s.n.m. (

FIGURA N° 1.2—7). En relación con las pendientes, las localidades se encuentran en zonas relativamente planas con pendientes menores a 10° prácticamente en toda la extensión urbana, sin embargo, existen zonas de pendientes elevadas, sobre los 30° ubicadas en las laderas que rodean los ríos y esteros de la comuna (

FIGURA N° 1.2—8).

FIGURA N° 1.2—5 Carta morfométrica de elevaciones de la comuna de Yungay a escala 1:300.000.

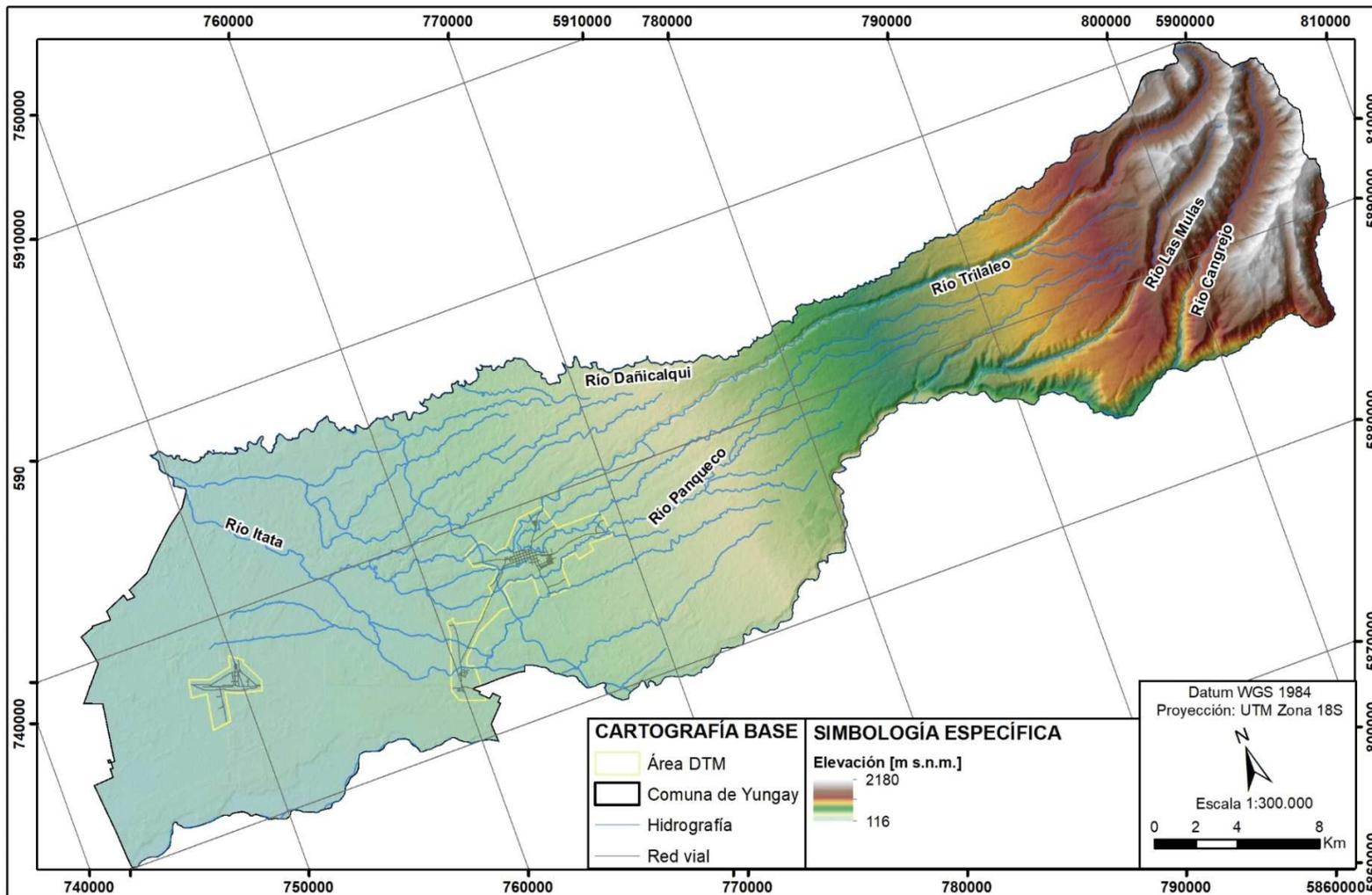


FIGURA N° 1.2—6 Carta morfométrica de pendientes de la comuna de Yungay a escala 1:300.000.

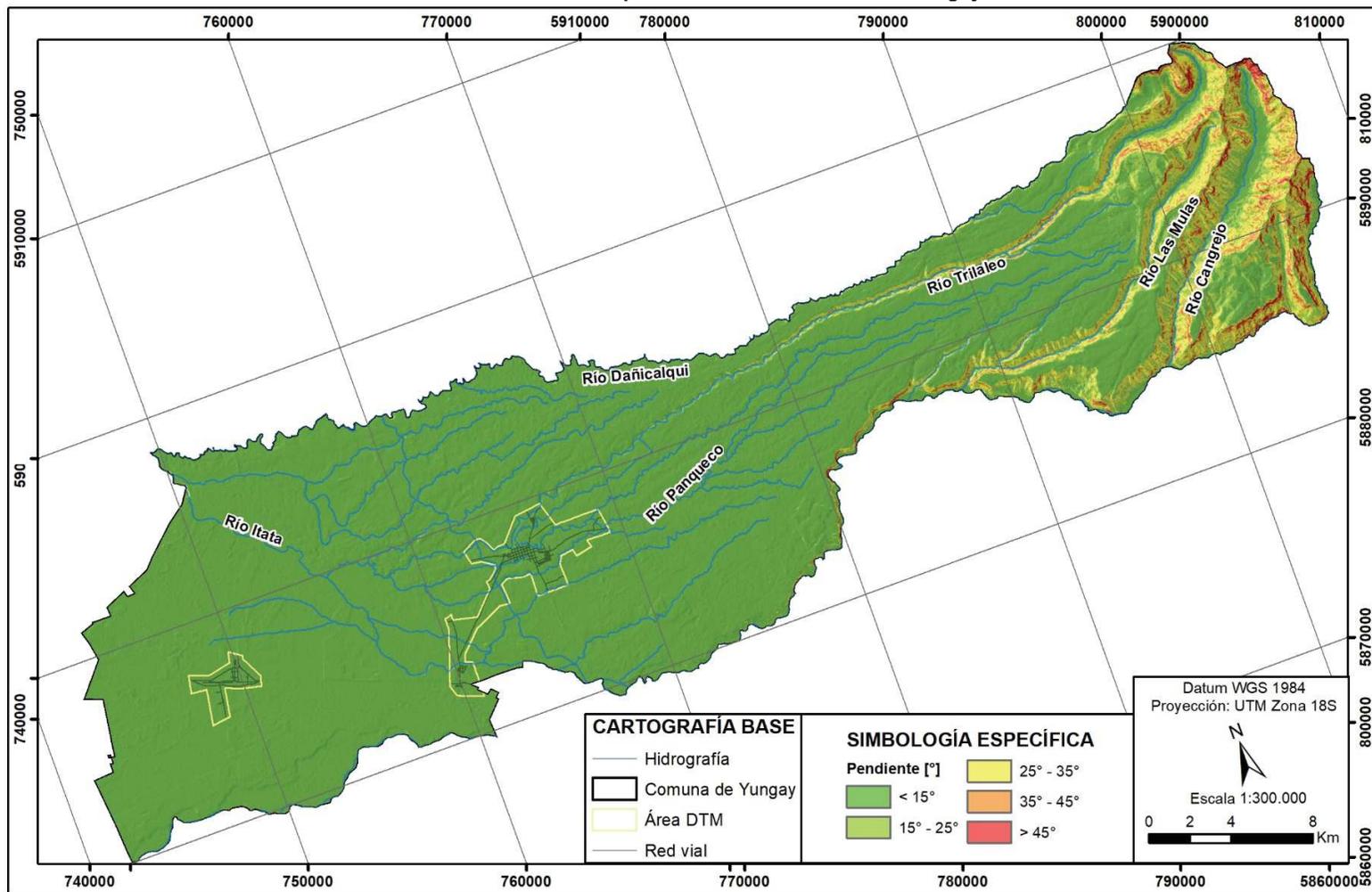


FIGURA N° 1.2—7 Carta morfométrica de elevaciones de las comunas Yungay, Cholguán y Campanario a escala 1:60.000.

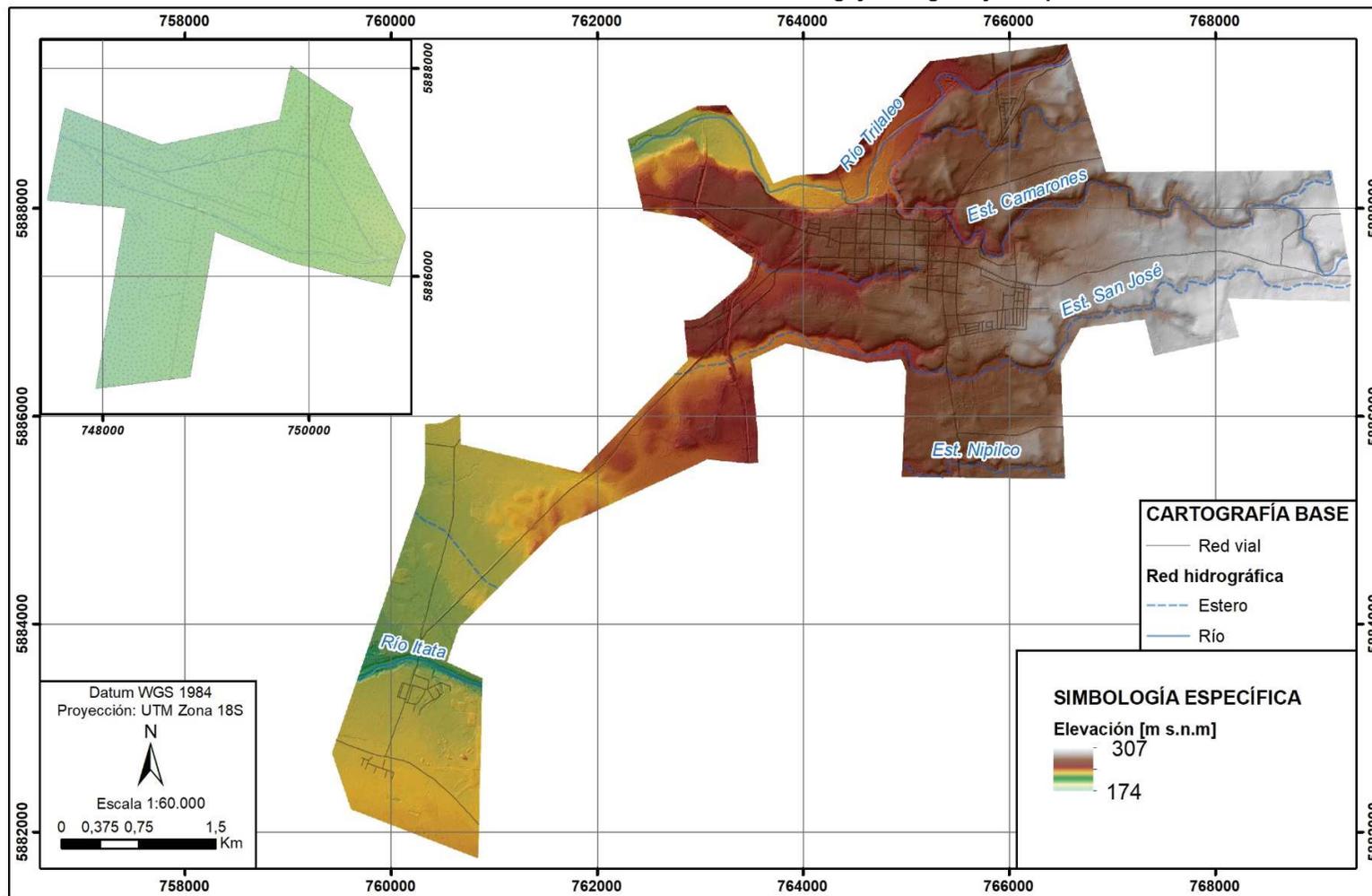
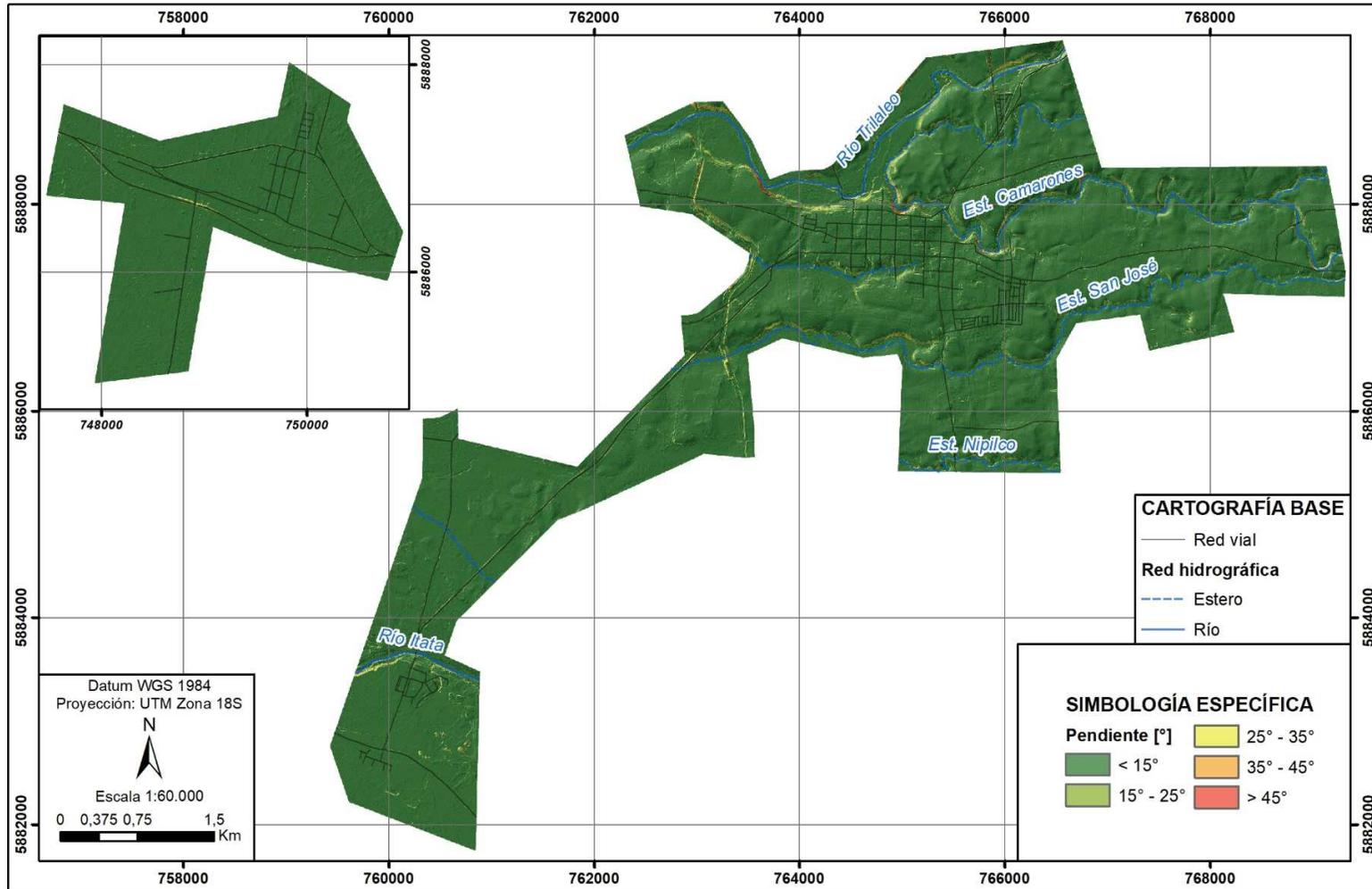


FIGURA N° 1.2—8 Carta morfométrica de pendientes de las comunas Yungay, Cholguán y Campanario a escala 1:60.000.



1.2.3 Marco geológico

a) Unidades geológicas

La geología de la comuna de Yungay abarca unidades geológicas que comprende edades desde el Cretácico al Holoceno, donde las más antiguas se ubican en la Cordillera Principal y las más jóvenes hacia la Depresión Central. La descripción y unidades geológicas identificadas se basó principalmente en las cartas Geología de la Hoja Los Ángeles – Angol (Ferraris, 1979) y el Mapa Geológico – Metalogénico VIII Región del Biobío (Departamento de Ciencias de la Tierra, 2000). Sin embargo, existen dos unidades de depósitos no consolidados identificados en este estudio, debido a que se realizó a una escala más detallada que las cartas geológicas mencionadas.

En la Depresión Central se expone la Formación La Montaña (PIHm) y Llanura arenosa del Cono de arenas del Río Laja (HCrI), donde ambas son disectadas por el sistema de drenaje actual de valle, que genera depósitos fluviales (Hf) y depósitos aluviales y coluviales (Ha), estos dos últimos reconocidos y definidos en este estudio.

A continuación, se describe cada una de las unidades recién mencionadas y se muestran en la FIGURA N° 1.2—9 a modo referencial a escala 1:60.000 que fue levantado a escala 1:5.000 con los insumos mencionados en los capítulos 4665351.0.mmmmmmmmm) y 0.

- *Estratos de Polcura-Cholguán, JKpch (Jurásico Superior-Cretácico)*: esta unidad consiste en una secuencia clástica continental con intercalaciones volcánicas compuesta por areniscas brechosas volcánicas, formadas por fragmentos de rocas volcánicas y toba. Esta unidad aflora al sureste de la comuna en la ladera norte del valle que contiene al Río Cholguán (fuera del área de levantamiento).
- *Intrusivos de la Cordillera Andina, Kg (Cretácico Superior – Paleógeno Inferior)*: unidad que se compone de cuerpos graníticos, tonalitas y granodioritas ubicada al sureste de la comuna en la ladera sur del valle que atraviesa el Río Cangrejo (fuera del área de levantamiento).
- *Formación Cola de Zorro, PPlcz (Plioceno Superior-Pleistoceno)*: se compone de lavas y rocas piroclásticas con composición predominantemente andesíticas y materiales fluviovolcánicos. Cubre casi la totalidad de la zona cordillerana de la comuna formando cerros disectados por los cursos de agua y valles de origen glacial (fuera del área de levantamiento).
- *Formación La Montaña, PIHm (Pleistoceno)*: compuesta por depósitos morrénicos y aluviales de escasa compactación, que contienen fragmentos de rocas volcánicas, basálticas y graníticas, de distinto grado de redondeamiento y alteración y con tamaños de clastos que varían entre 7 y 40 cm de diámetro, existiendo algunos clastos de hasta 5 m (FIGURA N° 1.2—10). Existen, además, intercalaciones de arcillas, arenas y cenizas volcánicas bien estratificadas, que corresponderían a depósitos lacustres. Se encuentran presente en la ciudad de Yungay y localidad de Cholguán. En la primera cubre completamente la ciudad de Yungay siendo erosionada por distintos procesos geológicos como generación de distintos tipos de remociones en masa y erosión fluvial. Mientras que en la segunda se ubica en el sector norte de Cholguán, incidida por el río Itata.
- *Depósitos de Arenas del Cono del Río Laja, HCrI (Holoceno)*: compuesto por una cubierta de arenas negras, los granos que las constituyen son restos de piroclastos de composición andesítica basáltica, producto de las erupciones volcánicas del Holoceno. Se ubica al sur de Cholguán y cubre totalmente la localidad de Campanario.

Depósitos fluviales actuales (Hf) y antiguos (PIHf): depósitos de bolones, gravas, arenas, limos de origen fluvial, formando terrazas en los cauces de los ríos y esteros principales. Es posible reconocer el cauce principal y sus depósitos asociados (Hf) (

- FIGURA N° 1.2—11) y diferentes niveles de terrazas (FIGURA N° 1.2—12) (PIHf enumerados del 1 al 3, de más antiguo al más joven, respectivamente).

- *Depósitos de remoción en masa (PIHm)*: en algunos sectores de las laderas de ríos y esteros se reconocen algunos tipos de remociones en masa. Estos forman taludes de menor pendiente que aquellos de los sectores colindantes y exhiben superficies irregulares que indican la presencia de bloques con un escarpe en la zona superior.
- *Depósitos aluviales y coluviales antiguos (PIHa)*: los depósitos coluviales-aluviales antiguos incluyen bloques, gravas, arenas y barro, generados por colapso gravitacional y por flujos de detritos desencadenados por lluvias. Estos depósitos se reconocen en las faldas de los cerros o laderas de los ríos y esteros formando escombreras, o como las zonas medias y distales de abanicos aluviales antiguos.
- *Depósitos aluviales y coluviales actuales, Ha (Holoceno)*: unidad que ha sido identificada en este estudio en las zonas de alta pendiente en laderas que bordean los cauces y en quebradas. Generalmente corresponden a depósitos clastosoportados, mal seleccionados de gravas y bloques generados por el colapso gravitacional de taludes inestables. En presencia de lluvias torrenciales, se acumulan en quebradas como depósitos aluviales que incluyen gravas, arenas y barro.
- *Depósitos lacustres (Hl)*: Sedimentos limosos y arcillosos, así como materia orgánica, depositados en el fondo de cuerpos de agua. Es reconocido al sur de la ciudad de Yungay y al noreste de la localidad de Cholguán.
- *Depósitos antrópicos (Han)*: depósitos variados generados por la acción del hombre. Se ubican en todas las localidades, principalmente como construcción de canales y terraplenes y construcciones de caminos en toda la extensión del área de levantamiento.

FIGURA N° 1.2—9 Mapa geológico de la comuna de Yungay a escala 1:60.000.

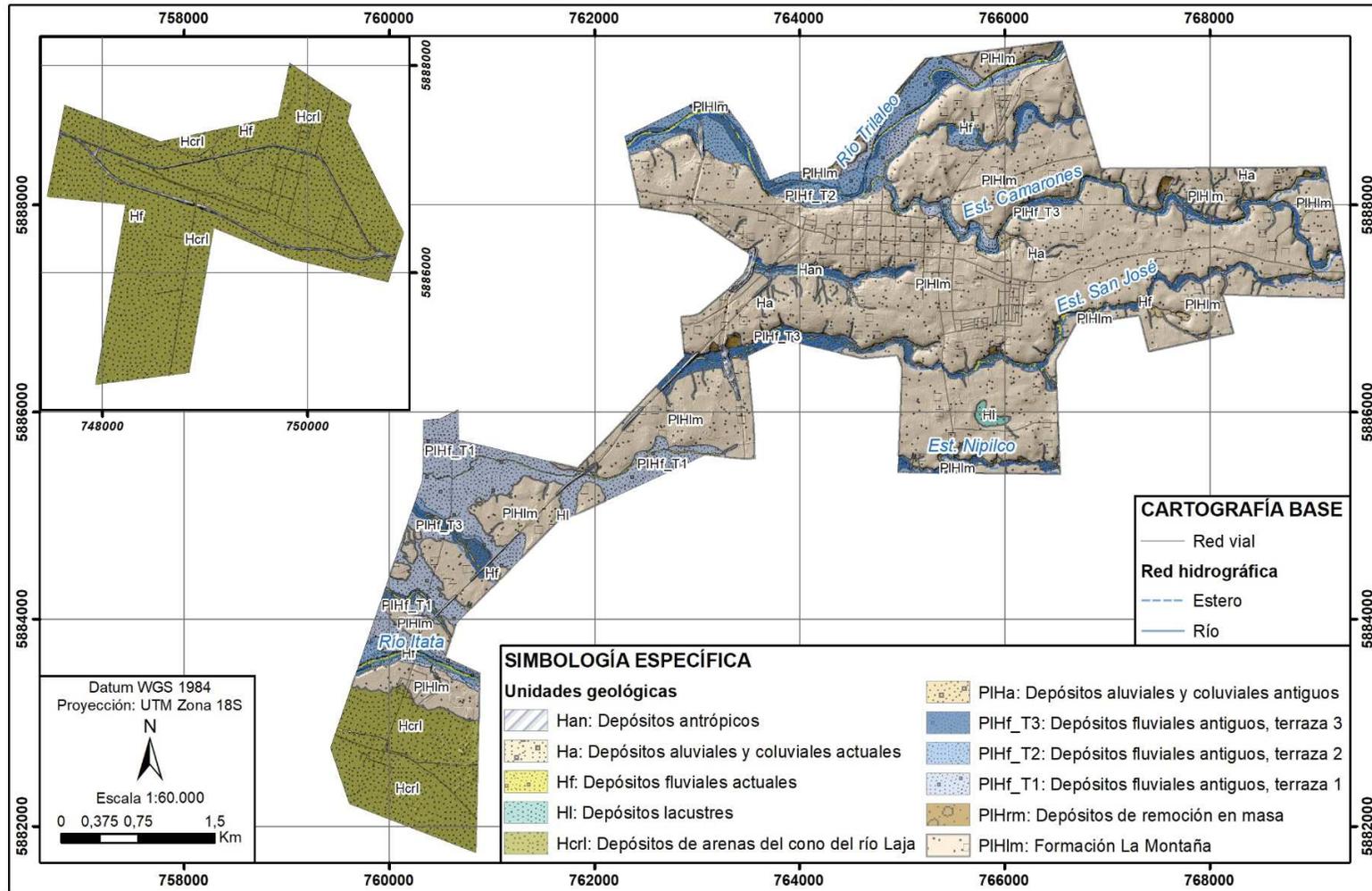


FIGURA N° 1.2—10 Depósito de Formación La Montaña.



FIGURA N° 1.2—11 Depósitos fluviales asociados al estero Camarones.

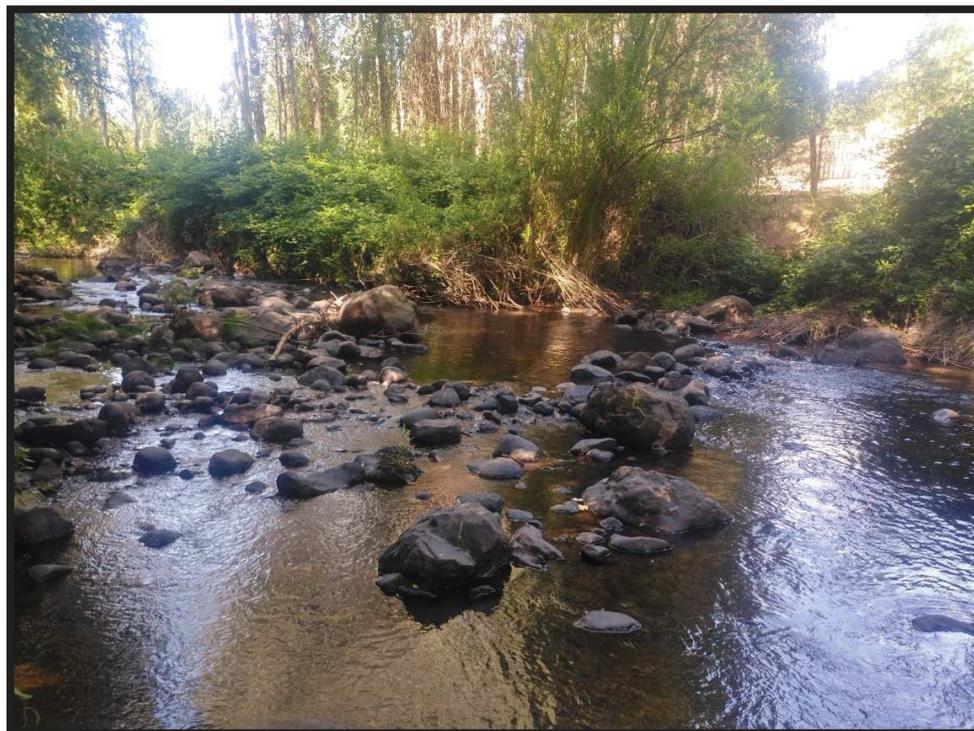


FIGURA N° 1.2—12 Distintos niveles de terraza asociados al Río Trilaleo. A la izquierda se presenta la terraza más joven (PIHf-2) y hacia la derecha la terraza más antigua (PIHf-1).



b) Estructuras

Dentro de la comuna no se han descrito estructuras geológicas activas que puedan afectar a la zona con sismos corticales u otros peligros asociados a ellos. A escala regional, la estructura más cercana es el Sistema de Fallas del Lago Laja (LLFS), situada en el margen oriental de la Cordillera Principal, a más de 60 km al este de Yungay.

El lago Laja es un lago con represas volcánicas del Cuaternario tardío ubicado cerca de la división de drenaje de los Andes centrales del sur. Distintos estudios y prospecciones revelan un sistema de fallas activo que corre paralelo al arco volcánico a lo largo del eje de la Cordillera Principal, el Sistema de Fallas del Lago Laja. Las fallas normales de este sistema extensional cortan depósitos volcánicos del Pleistoceno tardío, sedimentos lacustres de agua estancada datados en <7.100 años antes del presente, depósitos piroclásticos de 6.300 años antes del presente y abanicos aluviales del Holoceno.

Estudios realizados por Melnick, Charlet, Echter & De Batist (2006) indican fallas extensionales del Pleistoceno tardío-Holoceno a lo largo de la zona intraarco andina a los ~37°S. El patrón de deformación define el Sistema de Fallas del Lago Laja, que tiene una tasa de extensión mínima este-oeste del Holoceno de 1.2 mm/año. Las estructuras de deformación de sedimentos blandos en los depósitos glaciolacustres del Pleistoceno tardío se interpretan como sismitas y se relacionan con paleo-terremotos de $M > 6$.

Por otra parte, la Cordillera Principal en ~37°S es una estructura emergente a gran escala alzada por fallas inversas a sus pies. Considerando esto, se interpreta la extensión en la parte axial y más alta de los Andes como un colapso gravitacional sinorogénico incipiente en respuesta al levantamiento y engrosamiento de la corteza.

1.2.4 Clima e hidrografía

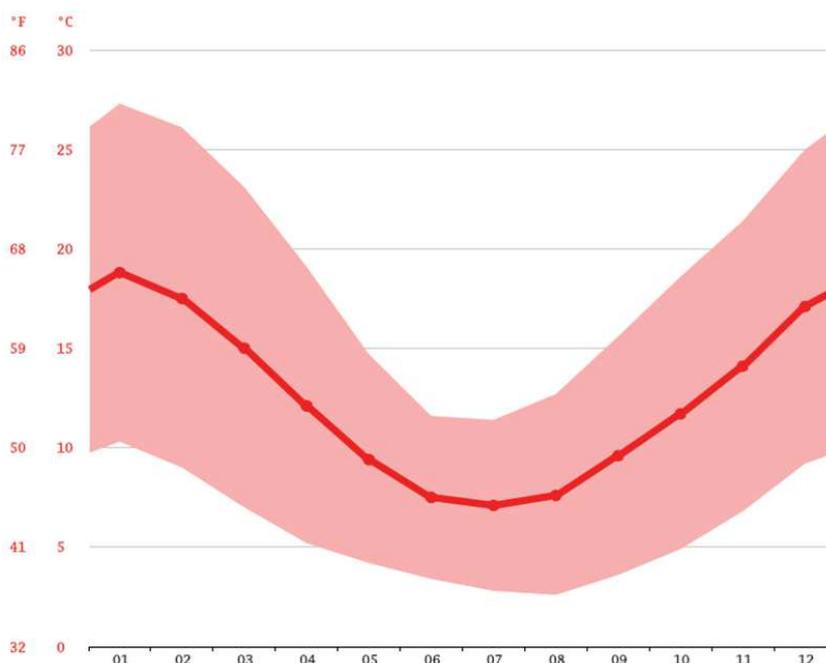
a) Clima

La Región de Ñuble, ubicada en el segmento central de Chile, marca la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que comienzan a desarrollarse desde el borde sur de la cuenca del Itata (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/BCN, 2021). En la franja costera y en los sectores altos y laderas occidentales de la Cordillera de la Costa se presenta un clima templado húmedo, mientras que hacia el interior el clima es templado mediterráneo.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen-Geiger, la comuna presenta dos climas predominantes. El primero, que se encuentra presente en casi todo el territorio comunal, corresponde al clima mediterráneo con lluvias invernales (Csb) y el segundo, se hace presente hacia el sector precordillerano de la comuna, correspondiendo al clima mediterráneo con lluvia invernal de altura (Csb(h)). Particularmente el promedio anual de temperatura de la comuna de Yungay es de 12,9°C y su precipitación media anual es de 1.431 mm (Climate-data.org, 2021).

La temperatura media anual es de 14,4°C, siendo la media del mes más cálido enero de 21,9°C y la media del mes más frío Julio de 9,1°C. Tal como ya se indicó, Yungay no presenta temperaturas frías tan extremas, sin embargo, son frecuentes las heladas en los meses de agosto y septiembre (FIGURA N° 1.2—13).

FIGURA N° 1.2—13 Diagrama de temperatura de Yungay durante los meses del año



Fuente: Climate-data.org. En el eje horizontal se representan los meses del año.

Debido al relieve de la comuna existen variaciones climáticas dentro de ella. El primero de ellos es el que se genera al oeste del río Itata, donde existe un clima templado cálido con altas temperaturas en verano con una sequedad atmosférica y fuertes vientos provenientes del sur, que junto al tipo de suelo presente se genera un ambiente seco. El segundo es el que se genera en la Depresión Central donde se ubica la localidad de Yungay, donde su morfología y ubicación permite un clima templado mediterráneo con fuertes contrastes térmicos entre el día y la noche. Por último, es el que se genera hacia la cordillera, donde aumentan las precipitaciones con un clima templado mediterráneo, con altas diferencias de temperatura entre el día y la noche (Duran Iligaray, 2009).

b) Hidrografía

La comuna de Yungay forma parte de la cuenca del río Itata, la cual posee una superficie de 11.100 km². Esta cuenca está conformada por dos cursos principales de agua: los ríos Ñuble por el norte (fuera de la comuna) e Itata por el sur. Este último río tiene una longitud de 180 km incluyendo dos ríos formativos, el Cholguán y Huépil (fuera de la comuna). El régimen del río Itata es mixto, ya que los principales afluentes nacen en la cordillera y precordillera de los Andes adquiriendo su aporte de los deshielos primaverales, además del aporte por las precipitaciones invernales (Oliva, 2019). Los principales ríos cordilleranos que atraviesan la comuna son, de norte a sur, el Dañicalqui, Trilaleo, Las Mulas, Cangrejo y Cholguán.

La comuna está fuertemente marcada por la presencia de redes de drenaje importantes que determinan sus límites, a la vez que permiten la presencia de importantes accidentes de interés como saltos, saltillos, valles y lagunas.

El límite norte de Yungay lo marca el río o estero Dañicalqui, el cual la separa de la comuna de Pemuco, desde su origen a media cordillera hasta su unión con el río Itata. El límite sur está dado por el río Cholguán en la parte más alta, el cual separa esta comuna de la de Tucapel y con el río Laja en su segmento más bajo, la cual separa a la comuna con la de Los Ángeles (FIGURA N° 1.2—14).

En particular, la ciudad de Yungay está rodeada de cursos de aguas superficiales que lo atraviesan de este a oeste, como se muestra en la FIGURA N° 1.2—14, generando cambios de pendiente y ondulaciones en el terreno. El río principal que la atraviesa es el Trilaleo, el cual nace en la cordillera media, posee un caudal moderado y presenta régimen mixto. También se destaca la presencia de cursos menores como el estero Camarones, río Panqueco, que recorre el límite norte de la ciudad de Yungay, estero Ñipilco, estero Huencheco, estero San José y el río Panquequillo por el sur.

El río Cholguán es uno de los cursos fluviales de mayor importancia en la comuna. De régimen pluvial-nival, en su parte superior se caracteriza por la profundidad y altura del valle (ECURED, s.f.). Este río confluye sus aguas con el río Huépil proveniente del sur, sector donde posterior a la confluencia pasa a denominarse río Itata, el cual pasa por el sector norte de la localidad de Cholguán (Niemeyer, 1980).

1.2.5 Sismicidad

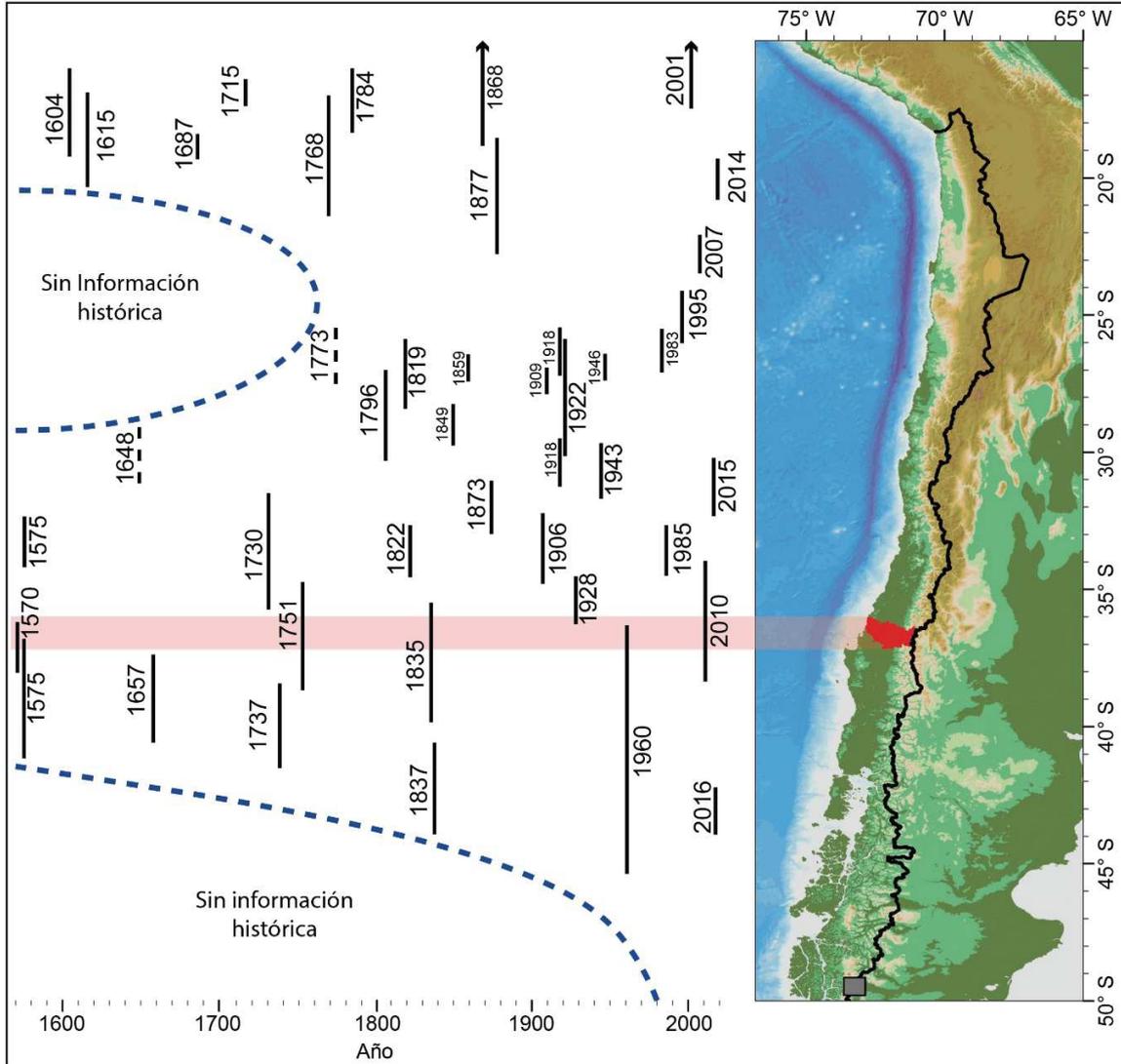
El contexto geodinámico de subducción, dado por la convergencia entre las placas Nazca y Sudamericana, posiciona al territorio chileno sobre un borde tectónicamente activo que ha caracterizado la historia sísmica del país. El fenómeno de convergencia de placas oceánica y continental produce un alto nivel de acoplamiento mecánico en la zona de contacto interplaca, lo que genera acumulación de energía 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.

a) 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.

En la Región de Ñuble, el contacto entre las placas se extiende desde la fosa hasta unos 35-51 km de profundidad (Tichelaar & Ruff, 1993), y es en esta zona donde tienen lugar la mayoría de los terremotos que han ocurrido en la zona centro-sur del país. Entre este tipo de terremotos destacan: 1751, 1835, 1960 y 2010, cuyos largos de ruptura se ilustran de manera esquemática en la FIGURA N° 1.2—15. Adicionalmente, la región ha sido afectada por sismos intraplaca de profundidad intermedia, destacando el Terremoto de Chillán de 1939, que se alza como la tragedia más mortífera en la historia de Chile.

FIGURA N° 1.2—15 Representación gráfica de los terremotos de subducción históricos con magnitud estimada superior a 7.0 y sus respectivos largos de ruptura (abajo, escala en años). En color rojo se resalta la región de Ñuble y en la franja los principales terremotos ocurridos frente a sus costas.



Antes de 1960, el registro de los sismos no cuenta con 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 Kausse & Ramírez (1992). En el CUADRO N° 1.2—1, se muestran cinco sismos históricos que generaron daños en la Región de Ñuble.

CUADRO N° 1.2—1 Datos de terremotos históricos con magnitud superior a 7.0 cuya zona de ruptura coincide con la comuna de Yungay

Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud Aprox.	Año	Mes	Día
-36.83	-73.03	-	8.5	1751	05	25
-36.83	-73.03	-	8.5	1835	02	20

-36.2	-72.2	60	8.3	1939	01	24
-39.5	-74.5	-	9.5	1960	05	22
-36.29	-73.24	30	8.8	2010	02	27

Exceptuando el terremoto de 1939, que corresponde a un terremoto intraplaca de profundidad intermedia, los cuatro sismos restantes citados en el CUADRO N° 1.2—1 corresponden a los denominados terremotos de subducción o interplaca tipo *thrust* por la ubicación de su fuente sísmica. Utilizando el registro de la red sísmológica internacional es posible visualizar la ocurrencia y distribución de las cuatro fuentes que se describirán a continuación.

En la FIGURA N° 1.2—16 se pueden observar cuatro franjas subparalelas de concentración de sismicidad según la profundidad del hipocentro. 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*, luego en continente, donde se desarrolla la Depresión Central, la fuente sísmica se denomina interplaca de profundidad intermedia, y en la zona cordillerana, de forma mucho más dispersa y generalmente de baja magnitud, se generan los sismos de fuente cortical. Los sismos *outer-rise*, interplaca tipo *thrust*, intraplaca de profundidad intermedia y corticales son claramente distinguibles a lo largo una franja oeste-este, de 50x350 km², que incluye a la comuna de Yungay (FIGURA N° 1.2—17). Las observaciones que se pueden realizar en la franja espacial, centrada en torno a los 37°S aproximadamente, son las siguientes:

1. La mayor concentración de sismicidad en el periodo registrado por el catálogo de la *National Earthquake Information Center* (NEIC) se dispone en la línea paralela a la costa y 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, es decir, corresponden a sismos interplaca tipo *thrust*. Ejemplo de este tipo de sismos es el terremoto del 27 de febrero del 2010, que tuvo una magnitud de 8.8 Mw y su hipocentro estuvo localizado a 30 km de profundidad.
2. En la zona centro-sur de la FIGURA N° 1.2—17, principalmente bajo la Depresión Central, existe una menor densidad de sismos y los que ocurren poseen profundidades hipocentrales que aumentan de oeste a este desde 60 a más de 100 km. Estos sismos corresponden a la fuente denominada intraplaca de profundidad intermedia. Dentro de esta categoría destaca el terremoto de Chillán de 1939, que tuvo una magnitud estimada de 7.8 Ms y cuyo hipocentro se localizó a 100 km de profundidad, aproximadamente.
3. En la Cordillera de los Andes tiene lugar la sismicidad de tipo cortical que, aunque mucho más escasa y dispersa que las otras fuentes, se asocia con la deformación actual del macizo montañoso.

FIGURA N° 1.2—16 Mapa regional del contexto de la comuna de Yungay con los epicentros de la sismicidad registrada de magnitud superior a 2,5 según el catálogo NEIC entre 1970 y 2020.

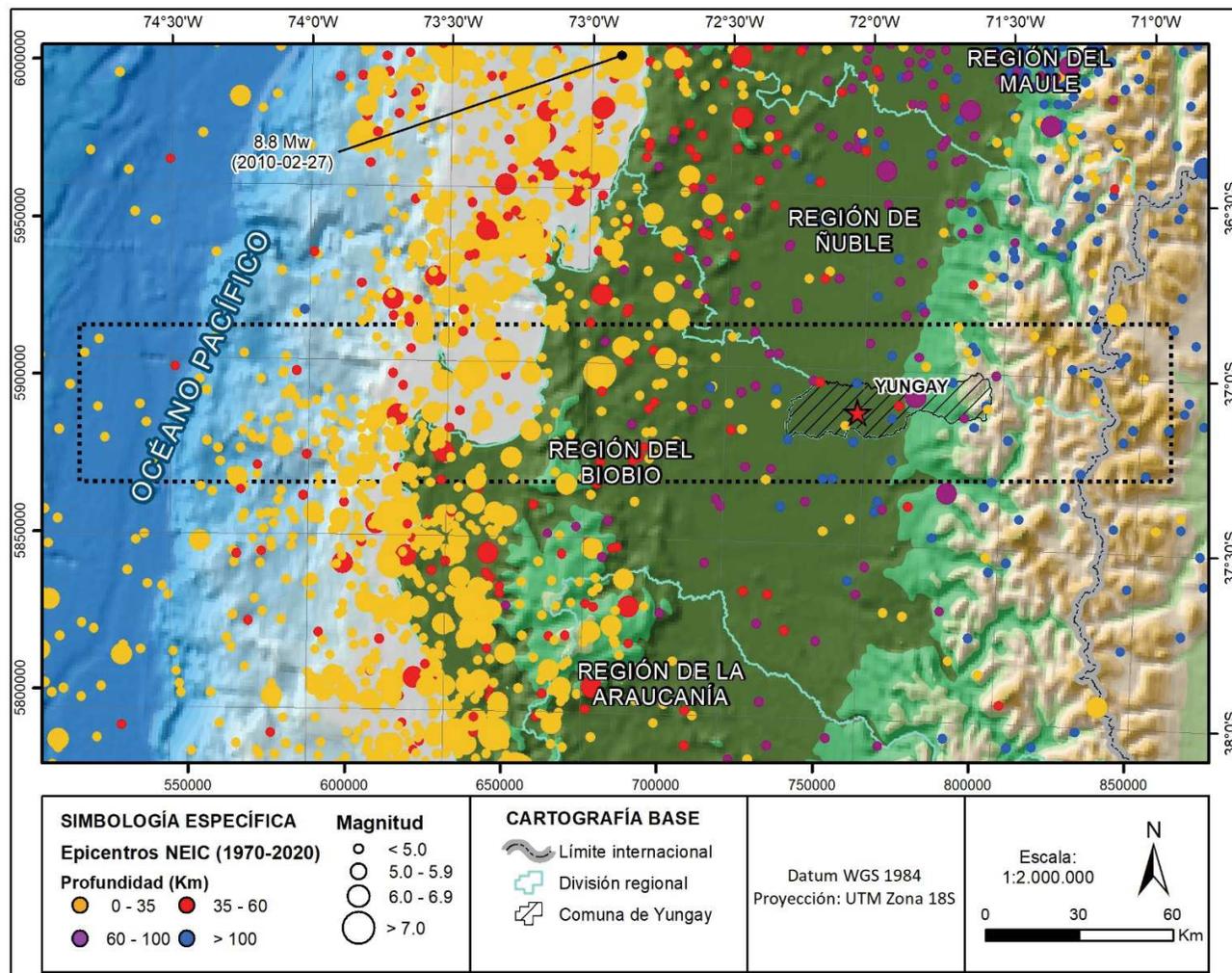
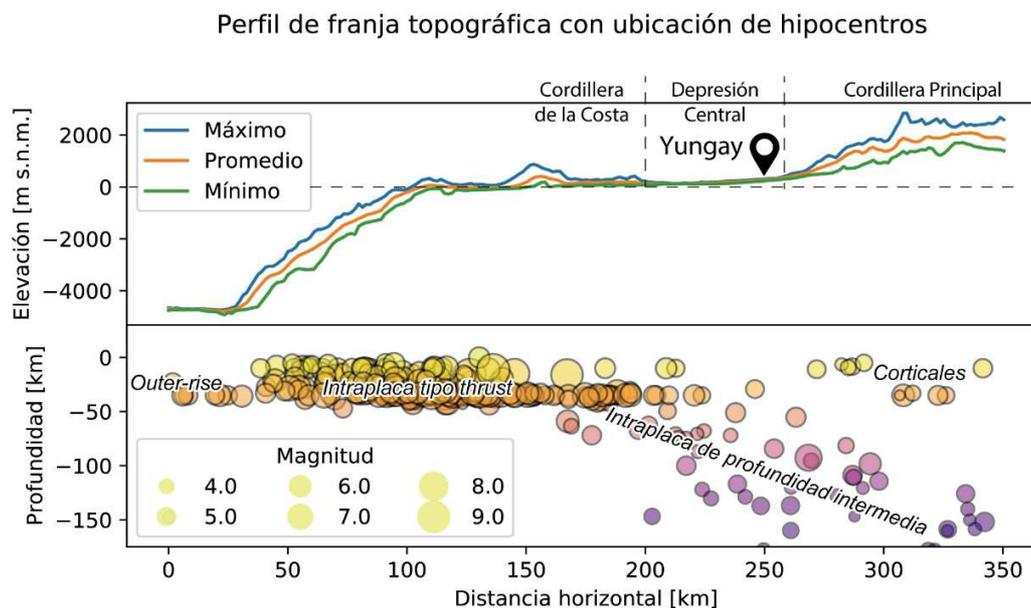


FIGURA N° 1.2—17 Perfil de franja topográfica sobre localización de hipocentros sísmicos a lo largo de una franja de 50 km de ancho por 350 km de largo demarcada con rectángulo punteado en la Ilustración 2. Notar diferencia en escala vertical de ambos gráficos.



En resumen, la comuna de Yungay se encuentra expuesta a la ocurrencia de tres tipos de sismos principales: (1) interplaca tipo *thrust*; (2) intraplaca de profundidad intermedia; y (3) sismos corticales cordilleranos. 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.

Diversos estudios han determinado una asociación entre las discontinuidades estructurales, a la escala litosférica, con la ubicación, composición y tipo de volcanismo de Chile centro-sur (Cembrano & Lara, 2009). Tanto al norte como al sur de la zona, fallas de movimiento inverso vergente al oeste han sido inferidas a lo largo del borde occidental de la Cordillera Principal y serían las responsables del alzamiento de ésta sobre la Depresión Central (González-Vidal, Obermann, Tassara, Bataille, & Matteo, 2018) (Sepúlveda, Cortés, Melnick, & Cisternas, 2018) y de la sismicidad cortical mencionada anteriormente.

1.3 INUNDACIONES TERRESTRES

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

- **Inundaciones por desborde de cauces:** Este tipo de fenómeno ocurre cuando el agua conducida a través de ríos, esteros o quebradas sobrepasa su cauce natural, desbordándose y causando inundación a partir del desborde.
- **Inundaciones por 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.

Catastro

CUADRO N° 1.3—1 se presenta un catastro construido a partir de los antecedentes revisados durante el desarrollo de este trabajo para inundaciones que han afectado la comuna de Yungay y alrededores. Para eventos antiguos y nuevos, se revisó los registros para la ciudad de Chillán, ciudad más antigua próxima a la comuna de Yungay. Cabe mencionar que, en los antecedentes, sobre todo en los más antiguos, se utiliza un lenguaje impreciso que no permite diferenciar los eventos de inundación por desborde de cauces con anegamientos, por lo tanto, los eventos catastrados deben ser interpretados considerando dicha imprecisión.

Solo en algunos casos es posible especificar los tipos de inundación, predominando las inundaciones por desborde de cauce del río Chillán. Destacan los eventos de 1679, 1748, 1751, 1900 y 1945 que provocaron gran destrucción en la ciudad de Chillán. Y de los eventos más recientes, el del 2006, durante el cual se decretó “Estado de Catástrofe” para la zona, donde se desbordó el río Trilaleo ocasionando daños a la comunidad de Yungay.

Además, en el Plan Regulador Comunal de Yungay 2009 (Duran Iligaray, 2009) se menciona que suelen ocurrir eventos de inundación por anegamiento en zonas deprimidas cercanas a cursos de agua en las localidades de Yungay, Cholguán y Campanario, pero no menciona si está relacionado a algún evento meteorológico en particular o alguna fecha de ocurrencia. Sin embargo, de acuerdo con las descripciones mencionadas en dicho documento, algunas zonas de anegamiento e inundaciones por desborde de cauce han sido identificadas geográficamente en la comuna (FIGURA N° 1.3—1).

En la visita a terreno donde se recorrieron las localidades de Yungay, Cholguán y Campanario (FIGURA N° 1.3—2) se identificaron zonas que han sido afectadas por algún tipo de inundación gracias información entregada por habitantes de las localidades en estudio, observación realizada en terreno y reunión con el encargado de emergencias.

CUADRO N° 1.3—1 Catastro de inundaciones que han afectado la comuna de Yungay y sus alrededores

Código	Fecha	Tipo	Descripción	Zonas Afectadas	Referencia
	1597	Inundación por desborde de cauce	El invierno de 1597 fue extraordinariamente lluvioso. En la mayor parte del territorio los ríos se desbordaron, causando daños de consideración.	Todo el territorio nacional	Urrutia y Lanza (1993)
	1679	Inundación por desborde de cauce	Las fuertes lluvias del mes de junio, en la zona centro sur del país, provocaron en 1679 la crecida del río Chillán, que se desbordó sobre la ciudad ocasionando una desastrosa inundación.	Zona Centro Sur	Urrutia y Lanza (1993)
	1748	Inundación por desborde de cauce	Hacia el sur, el río Chillán se desbordó no respetando cauces ni murallas. La ciudad de Chillán quedó casi en la ruina. Uno de los edificios más dañados fue la iglesia parroquial, que con la inundación quedó tan deteriorada que no pudo prestar servicios por largo tiempo.	Zona Central	Urrutia y Lanza (1993)
	1783	Inundación por desborde de cauce	El frente de mal tiempo se hizo sentir en todo el sector del valle central, desbordándose la mayoría de los ríos inundando los campos aledaños. Hubo también una gran mortandad de animales, entre caballos, mulas, ovejas y vacas, con el consiguiente perjuicio económico para los hacendados.	Zona Central	Urrutia y Lanza (1993)
	1877	Inundación por desborde de cauce	El río Bío Bío y el río Vergara formaron en las vegas de Nacimiento una inmensa laguna.	Desde la Región de Atacama a Los Lagos	Urrutia y Lanza (1993)
	1888	Inundación por desborde de cauce	Los ríos Bío Bío y Chillán se desbordaron interrumpiendo el servicio ferroviario. El río Bío Bío inundó sectores de Concepción, destruyó y botó parte del tendido de líneas telegráficas, interrumpiendo las comunicaciones con San Rosendo y Angol.	Desde la Región de Atacama al Biobío	Urrutia y Lanza (1993)

Código	Fecha	Tipo	Descripción	Zonas Afectadas	Referencia
	1895	Inundación por desborde de cauce	En Chillán se volaron los techos: las murallas quedaron humedecidas y desplomadas: el río Ñuble arrastró con animales, ranchos y maderas. En Concepción se desbordaron los ríos Bio Bío y Andalien, inundando las viviendas por decenas y el matadero municipal.	Desde la Región del Maule a la Araucanía	Urrutia y Lanza (1993)
	1900	Inundación por desborde de cauce	En Chillán, los desbordos de los ríos provocaron inundaciones en los poblados y en los caminos. La ciudad de Chillán quedó prácticamente bajo el agua y una persona pereció ahogada.	Desde la Región de Valparaíso a Los Ríos	Urrutia y Lanza (1993)
	1912	Inundación por desborde de cauce	El temporal azotó al centro y al sur del país. Se desbordaron los ríos Maule, Chillán, Bío Bío, Calle Calle y Cruces.	Desde la Región de Antofagasta al BioBío	Urrutia y Lanza (1993)
	1915	Inundación por desborde de cauce	La línea del tren también se deterioró a las alturas de Linares, de Chillán, de Talcamávida, de Gomero y de Concepción, por derrumbes en los cerros y desbordos de ríos.	Desde la Región de Coquimbo a la Araucanía	Urrutia y Lanza (1993)
	1921	Inundación por desborde de cauce	Los puentes, que eran más de mil en todo el país, resistieron en general el temporal, con excepción de los de Teno, Rauco, Ñuble, Huilleuco en la Frontera, Panguí, cerca de Talca y el que cruzaba el río Petorca en Chincolco.	Desde la Región de Coquimbo a Los Lagos	Urrutia y Lanza (1993)
	1922	Inundación por anegamiento	Un frente de mal tiempo azotó a la zona comprendida entre Concepción y Chiloé en 1922, dejando varios muertos, daños en las poblaciones, en la agricultura y decenas de damnificados. En Chillán se anegó una población obrera.	Desde la Región del Biobío a Los Lagos	Urrutia y Lanza (1993)
	1945	Inundación por desborde de cauce	En Chillán, alrededor de 2.000 personas quedaron sin hogar al desbordarse el río que anegó principalmente Chillán Viejo.	Desde la Región de Ñuble a Los Lagos	Urrutia y Lanza (1993)

Código	Fecha	Tipo	Descripción	Zonas Afectadas	Referencia
	1953	Inundación por desborde de cauce	En Chillán los más afectados fueron las barriadas populares, donde se rebalsaron los canales.	Desde la Región de Valparaíso al Biobío	Urrutia y Lanza (1993)
	1971	Inundación por desborde de cauce	En Ñuble, alrededor de cincuenta familias perdieron todos sus enseres, por las salidas de ríos y esteros.	Desde la Región de Ñuble a Los Ríos	Urrutia y Lanza (1993)
	1974	Inundación por desborde de cauce	Los ríos Teno, Claro, Maule, Cauquenes, Chillán, Andalien, sus afluentes y esteros se desbordaron en diferentes sectores, inundando pequeños poblados, fundos y principalmente las poblaciones periféricas de Curicó, Talca y Linares, Constitución, Maule, Cauquenes, Chillán, Concepción, Talcahuano Y Tomé-	Zona Central	Urrutia y Lanza (1993)
DC01 y A01		Inundación por desborde de cauce y anegamiento	Anegamientos en pequeños sectores al norte y sur de la ciudad de Yungay por acumulación de aguas lluvias en potreros bajos y asociados a pequeños cursos de agua. Estos anegamientos se desarrollan en potreros al norte y sur del río Panqueco y algunos márgenes del estero Huencheco y Ñipilco y en un sector al sur de ciudad (calle Angamos)	Yungay y alrededores	Capítulo 6. Análisis de sitio urbano (Etapa I Expediente y Diagnóstico comunal y urbano. PRC Yungay 2009
A02		Anegamiento	Sector norponiente del área urbana de Campanario un estero sin nombre da origen a anegamientos en los terrenos bajos aledaños	Campanario	Capítulo 6. Análisis de sitio urbano (Etapa I Expediente y Diagnóstico comunal y urbano. PRC Yungay 2009
A03		Anegamiento	Terrenos asociados a un estero sin nombre al norponiente de Cholguán	Cholguán	Capítulo 6. Análisis de sitio urbano (Etapa I Expediente y Diagnóstico comunal y urbano. PRC Yungay 2009
A04		Anegamiento	Inundación en sector rotonda de Cholguán	Cholguán	Participación ciudadana, noviembre 2008. PRC Yungay 2009

Código	Fecha	Tipo	Descripción	Zonas Afectadas	Referencia
DC02		Inundación por desborde de cauce	Inundación en calle Chipana entre Huamachuco y Tacna.	Yungay	Participación ciudadana, noviembre 2008. PRC Yungay 2009
DC03	Julio 2006	Inundación por desborde de cauce	Las precipitaciones de un sistema frontal causaron desborde del Río Trilaleo, sector El Molino, comuna de Yungay.	Yungay	Informe Sistema Frontal 10 al 13 de Julio 2006 (Departamento de Protección Civil, 2006)
DC04		Inundación por desborde de cauce	Hace más de 12 años en la zona donde se ubica el balneario municipal de Yungay se inundaba unos 50 m hacia el sur desde el eje central del río Trilaleo. Han dejado de ocurrir ante la disminución de las precipitaciones.	Yungay	Información recopilada en terreno
DC05		Inundación por desborde de cauce	Antes había inundaciones por desborde de cauce asociadas al río Panqueco, pero se hizo una intervención y ya no ocurre.	Yungay	Información recopilada en reunión con el encargado de emergencia
A06		Inundación por anegamiento.	En dicha zona había una laguna, pero actualmente se hizo un relleno para que no se inundara. Sin embargo, los colectores se tapan en invierno y generan inundaciones	Yungay	Información recopilada en reunión con el encargado de emergencia
A07		Inundación por desborde de cauce	Sector cercano a canal entre Yungay y Cholguán se inunda por mala mantención.	Yungay	Información recopilada en reunión con habitantes de la zona
DC06		Inundación por desborde de cauce	Puente Cholguán colapsó por ser alcanzado por el agua del río debido a intensas lluvias.	Cholguán	Información recopilada en reunión con el encargado de emergencia

FIGURA N° 1.3—1 Catastro de inundaciones por desborde de cauce, anegamiento y remociones en masa en la comuna de Yungay.

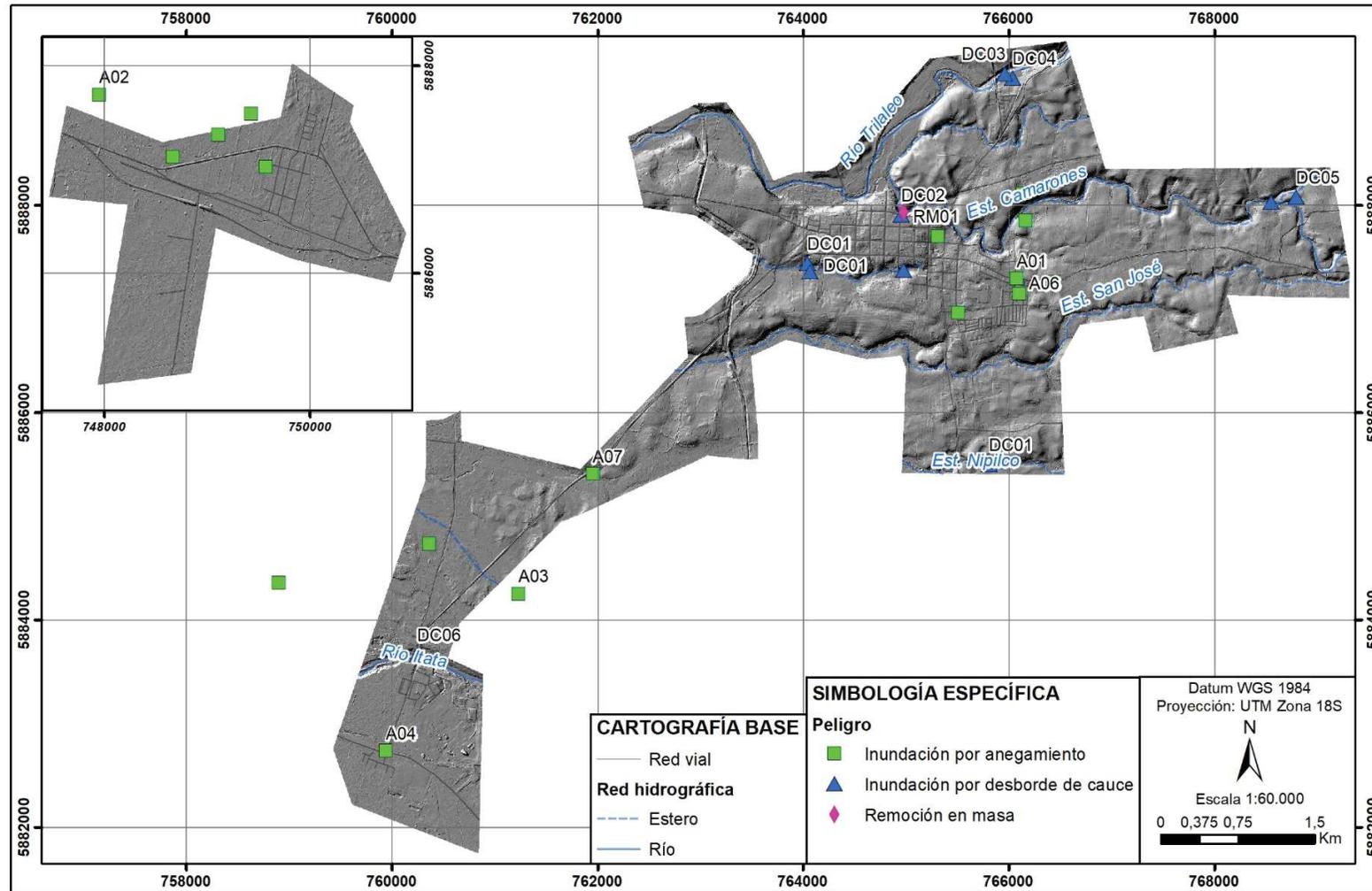
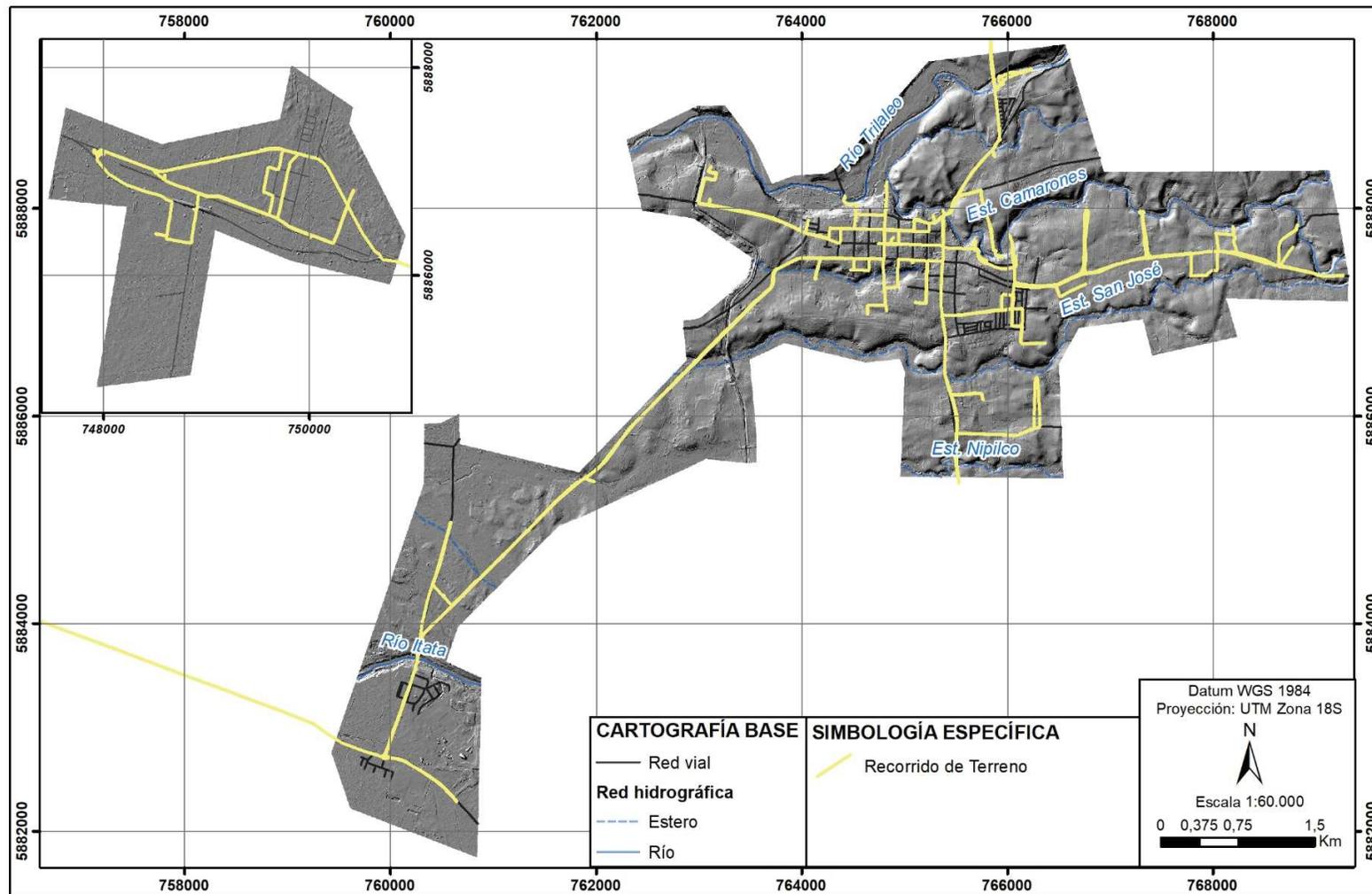


FIGURA N° 1.3—2. Recorrido de terreno durante los días 13 y 14 de diciembre del 2021.



1.3.1 Diagnóstico

El catastro de inundaciones terrestres evidencia que los diferentes sectores de ocurrencia tanto de desborde de cauces como de anegamientos dan cuenta de que el área de levantamiento es afectada por ambos procesos.

En el caso de desborde de cauces, este se origina en los ríos y esteros de la ciudad de Yungay y la localidad de Cholguán. Las principales evidencias geomorfológicas que dan cuenta de aquello son las características propias de las terrazas (sección 1.2.2) que se forman en cada uno de los cauces y el desnivel topográfico que existe entre ellas.

La ciudad de Yungay presenta una densa red hídrica, tanto en el área urbana como en sus alrededores. Sin embargo, esta red se encuentra bien restringida y las áreas construidas se encuentran principalmente en zonas de mayor elevación. Esto evita que las inundaciones por desborde de cauces afecten a zonas aledañas a los cauces, que sólo afectarían a la primera terraza (FIGURA N° 1.3—3) y, en caso de eventos muy extremos, alguna terraza de nivel superior, pero sin generar grandes inundaciones en la zona construida.

FIGURA N° 1.3—3 Terraza sur del río Trilaleo en el Balneario Municipal que hace años fue inundada debido a lluvias intensas.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

La localidad de Cholguán también se encuentra dividida por grandes cursos de agua como es el río Itata. Como su cauce está bien definido, no genera mayores inconvenientes a la localidad con relación al desborde del cauce. Sin embargo, en algunas ocasiones el río ha aumentado su nivel considerablemente como se evidencia en la FIGURA N° 1.3—4.

FIGURA N° 1.3—4 Puente Cholguán donde se observan ramas atoradas en la estructura del puente que evidencian los niveles que ha alcanzado el agua del río.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

Con respecto a las inundaciones por anegamiento, se identifican aquellos sectores que poseen depresiones topográficas y carecen de salida de drenaje. Estos se encuentran distribuidos de manera uniforme tanto en Yungay, como en Cholguán y Campanario. Los anegamientos pueden originarse producto de acumulación de aguas lluvias, saturación del suelo o ser consecuencia del desborde de cauces. No se ha dado mayor relevancia a este tipo de inundación, pues según el PRC de Yungay (Duran Iligaray, 2009) el suelo posee una buena pendiente de escurrimiento.

En Yungay existen zonas dentro de la ciudad que son afectadas recurrentemente por anegamientos como consecuencia de modificaciones artificiales a red de drenaje natural, un ejemplo de esto es lo que ocurre en la calle Ignacio Carrera Pinto (FIGURA N° 1.3—5), que se encuentra en zonas deprimidas, lo que favorece la acumulación de agua.

FIGURA N° 1.3—5 Calle Ignacio Carrera Pinto que es afectada por inundaciones debido a la modificación e intervención de un antiguo canal.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

Campanario es una zona prácticamente plana con pendientes que no superan los 10°. Si bien es atravesada por algunos canales que, en la fecha del terreno realizado para este trabajo, se encontraban sin agua (FIGURA N° 1.3—6), debido a la poca profundidad de estos se podrían anegar las zonas cercanas que rodean a los canales y algunos terrenos deprimidos (FIGURA N° 1.3—7).

FIGURA N° 1.3—6 Canales que atraviesan la localidad de Campanario

Fuente: Archivo fotográfico de terreno

Pese a lo anterior, el material del terreno es arenoso como se puede ver en la parte inferior de la FIGURA N° 1.3—7, lo que implica una alta permeabilidad y dificultad para la acumulación de agua. En consecuencia, Campanario podría ser afectada por inundaciones, pero de manera local y con una susceptibilidad alta en el sector de los canales construidos o moderada en sectores con depresiones de más de 10 cm, pero sin evidencia de inundación actual.

FIGURA N° 1.3—7 Zona deprimida al oriente dentro de Campanario que podría ser afectada por anegamiento. En la parte baja de la fotografía, adyacente a la vereda, se ve el material arenoso permeable que cubre la mayor parte de la localidad.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

A partir del catastro y diagnóstico realizado, las inundaciones por anegamiento en la comuna tienen una mayor importancia. Sin embargo, según el PRC Yungay 2009 y observaciones en terreno, no es de gran envergadura debido a la buena permeabilidad del suelo, no obstante, lo anterior bajo ningún aspecto descarta la posibilidad de que ocurran. Este tipo de inundación se genera en zonas deprimidas, generalmente en invierno por las lluvias que generan la saturación del suelo.

Con respecto a los factores desencadenantes, la ocurrencia de lluvias intensas corresponde al principal desencadenante natural, que puede activar tanto una pequeña parte de la red, sin escorrentía, o aumentar el caudal normal de un cauce activo, tal como lo evidencia el catastro. 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. La cercanía a la Cordillera Principal ocasiona que por procesos nivoglaciales ocurran crecidas estacionales. Adicionalmente, las lluvias intensas sobre las zonas de baja pendiente que dominan el sector occidental de la comuna pueden desencadenar anegamientos producto de la ineficiencia en la evacuación de la escorrentía superficial o la colmatación de las áreas deprimidas.

Según la información recopilada y los antecedentes entregados del PRC de Yungay 2009, la comuna no presenta grandes problemas con el peligro por anegamiento debido a las características físicas y geográficas de la zona, identificando lugares específicos donde puede ocurrir.

1.3.2 Susceptibilidad

a) Inundación por desborde de cauce

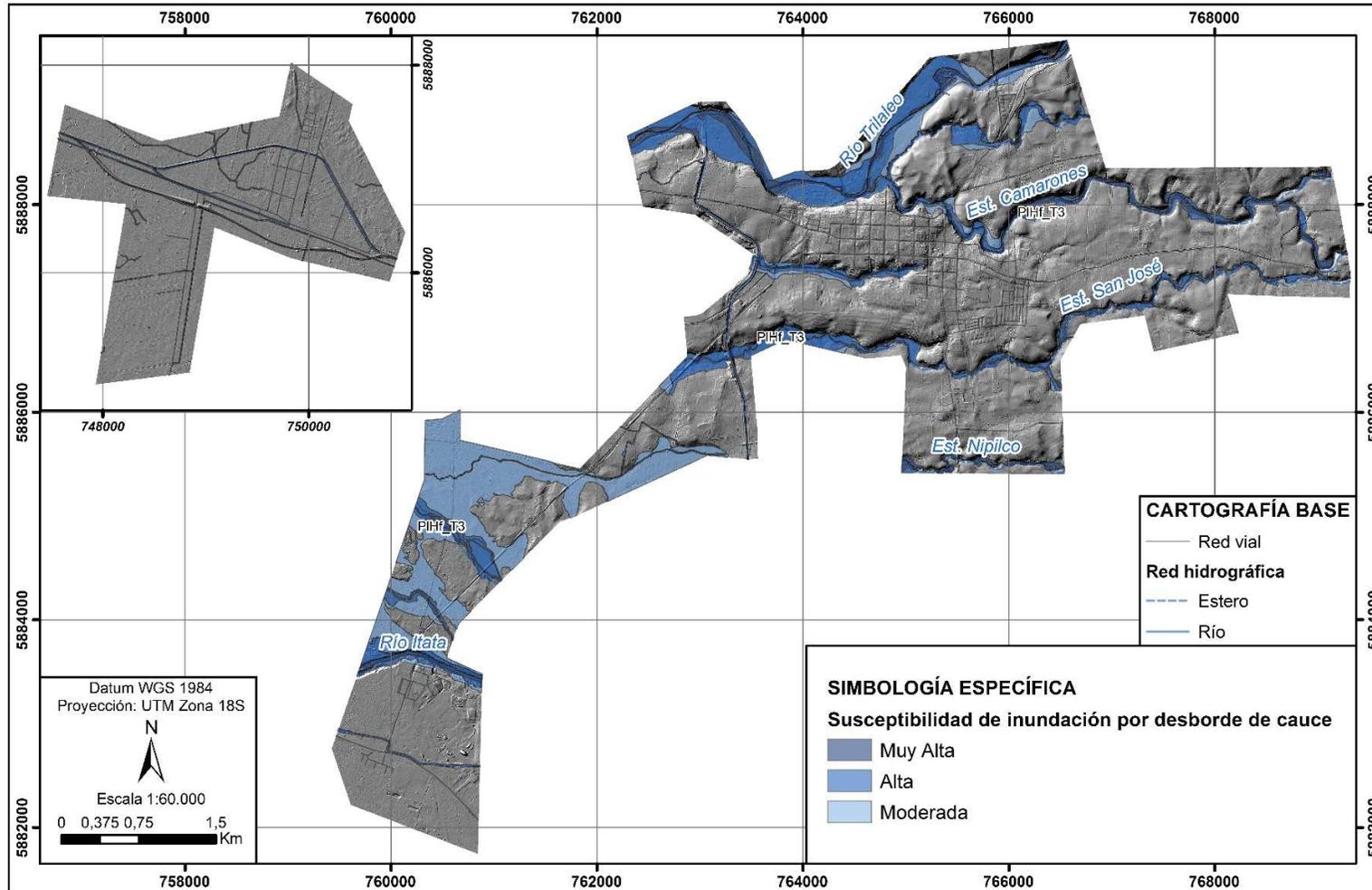
La definición de la susceptibilidad se desarrolló a partir de la geología y la geomorfología, las que, a su vez, consideraron el catastro de peligros y los parámetros morfométricos. De esta forma, los criterios que definen las zonas asociadas a diferentes grados de susceptibilidad son los siguientes:

- **Susceptibilidad Muy Alta:** corresponde al cauce activo y a parte de la terraza 3 (PIHf-3), según las observaciones de terreno, asociados al río Trilaleo y esteros Camarones y San José, por Yungay y, el río Itata y esteros Los Banos y Nipilco, por el norte de Cholguán.
- **Susceptibilidad Alta:** se representa mediante parte de la terraza 3 (PIHf-3), según las observaciones de terreno, y la terraza 2 (PIHf-2) que se muestran en los ríos Trilaleo e Itata y esteros Camarones, San José, Los Banos y Nipilco, que bordean y disectan Yungay y Cholguán. Además, los canales antrópicos construidos y reconocidos a escala del presente trabajo son parte de esta categoría. En ella se han reconocido los canales de Yungay y Campanario.
- **Susceptibilidad Moderada:** corresponde a la terraza 1 (PIHf-1) que se presentan en los ríos Trilaleo e Itata o Cholguán, además de la parte más occidental del estero Camarones y estero Los Banos.

A continuación, se presenta una figura esquemática representativa a escala 1:60.000, correspondiente al mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauce (FIGURA N° 1.3—8). Anexo a este informe se incorpora un Plano a escala 1:10.000 para cada una de las localidades por separado.

En Yungay y Cholguán, se puede observar que los principales ríos y esteros activos presentan una susceptibilidad Muy Alta y sus terrazas adyacentes de acuerdo con la elevación que se encuentran del cauce principal junto con la distancia determinan los distintos grados de susceptibilidad (Alta o Moderada). Para el caso de Campanario, no existen cauces naturales que la atraviesen, es por esto que solamente los canales presentes poseen algún grado de susceptibilidad.

FIGURA N° 1.3—8 Mapa de susceptibilidad de inundación por desborde de cauce



Fuente: Elaboración propia

b) Inundación por anegamiento

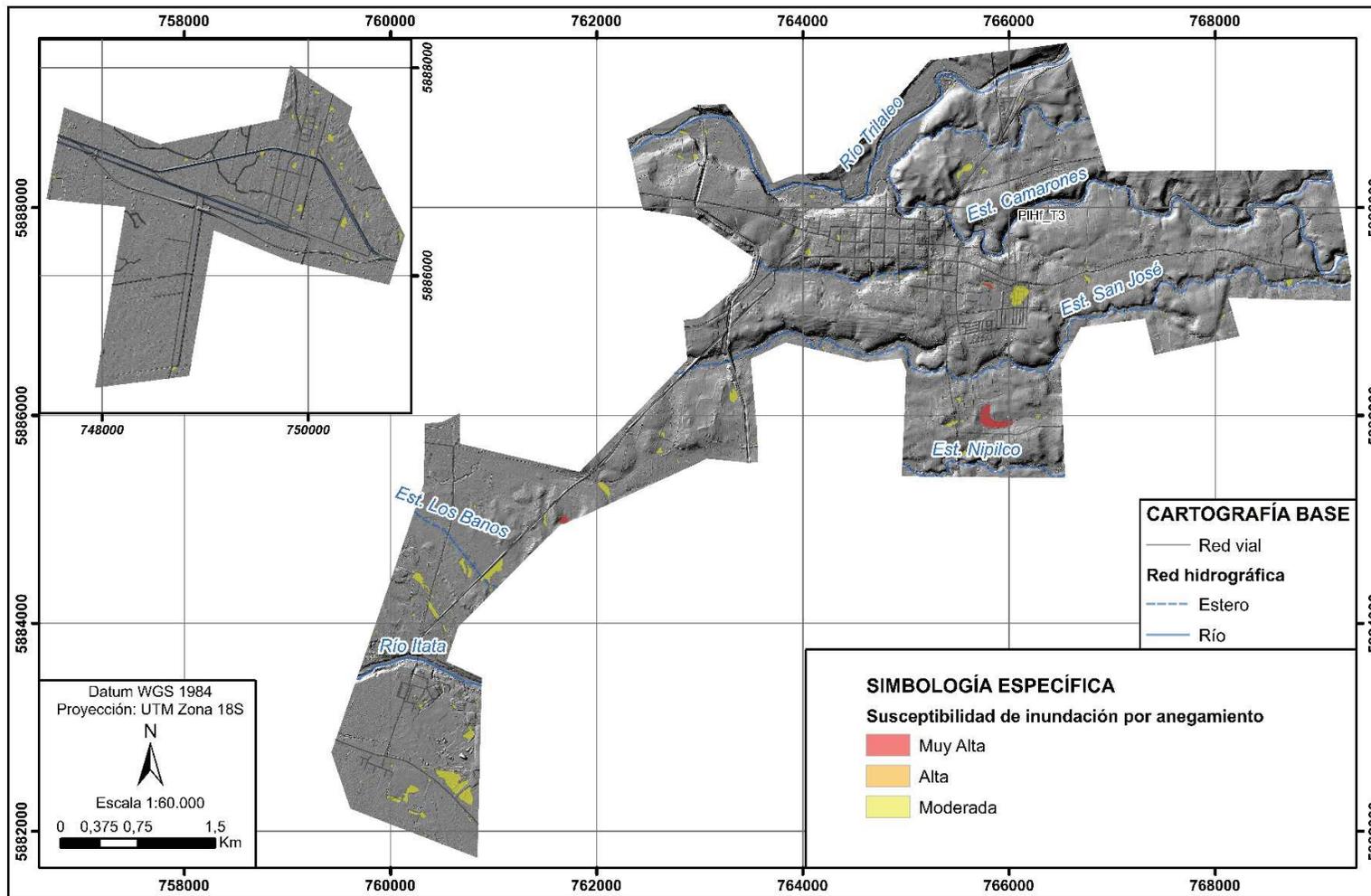
Las áreas susceptibles de ser afectadas por anegamientos se definieron con las zonas deprimidas, las que representan zonas cerradas de acumulación de flujo y han sido identificadas a partir del reconocimiento en terreno y el modelo de elevación digital. Este último, se obtuvo mediante la diferencia entre un ráster de relleno y el modelo digital de terreno original. Las áreas se delimitaron según los criterios que se describen a continuación.

- **Susceptibilidad Muy Alta:** aquellas zonas que presentan depresiones de más de 10 cm de profundidad según el ráster de zonas deprimidas y que actualmente se encuentran inundadas.
- **Susceptibilidad Alta:** aquellas zonas que presentan depresiones de más de 10 cm de profundidad según el ráster de zonas deprimidas adyacentes a zonas de susceptibilidad Muy Alta.
- **Susceptibilidad Moderada:** aquellas zonas que presentan depresiones de más de 10 cm de profundidad según el ráster de zonas deprimidas sin estar actualmente inundadas.

A continuación, se presenta una figura esquemática representativa a escala 1:60.000, correspondiente al mapa de susceptibilidad de inundación por anegamiento (FIGURA N° 1.3—9). Anexo a este informe se incorpora un Plano a escala 1:10.000 para cada una de las localidades por separado.

Del mapa se puede destacar que solo existen dos lugares con susceptibilidad Muy Alta que son ubicadas en centro y sur de Yungay, correspondientes a un humedal y laguna respectivamente. Solo una zona de susceptibilidad Alta adyacente al humedal. Por último, el resto son zonas deprimidas que podrían ser eventualmente inundadas, pero con baja probabilidad.

FIGURA N° 1.3—9 Mapa de susceptibilidad de inundación por anegamiento



Fuente: Elaboración propia

1.4 REMOCIONES EN MASA

El término “remoción en masa” incluye una amplia variedad de procesos que generan el movimiento, en sentido 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, referidos comúnmente como “aluviones”, son un tipo de remociones en masa que ocurren cuando una masa de sedimentos como detritos o barro, con mala clasificación, agitados y saturados con agua, se movilizan pendiente abajo como flujos viscosos de sedimentos concentrados (Antinao, Fernández, Naranjo, & Villarroel, 2002).
- **Procesos de ladera:** Se ha agrupado en esta categoría aquellos procesos asociados principalmente al transporte gravitacional de materiales a través de las laderas de los cerros. Se incluye la caída de rocas y los 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 definidas. Al superarse la resistencia al corte, se genera el movimiento del material en su conjunto (Hauser, 2000).

1.4.1 Catastro

De acuerdo con los antecedentes revisados durante el desarrollo de este trabajo no se reconocen grandes remociones en masa, solo uno en particular en las riberas del río Panqueco, en la localidad de Yungay. Al igual que para el estudio de inundaciones se tomaron eventos pasados que podrían haber afectado la zona, pero de acuerdo con su antigüedad no se puede especificar su tipo. Los dos eventos catastrados se muestran en el CUADRO N° 1.4—1 y la ubicación de uno de ellos se muestra en la FIGURA N° 1.3—1. Con relación al último evento catastrado y localizado espacialmente, durante la campaña de terreno y, en reunión con el encargado de emergencias, se da cuenta de cierta recurrencia de procesos de ladera que ocurren en el segmento de la ribera del estero Camarones.

CUADRO N° 1.4—1 Catastro de remociones en masa en la comuna de Yungay

Código	Fecha	Descripción	Zonas Afectadas	Referencia
	1915	La línea del tren se deterioró a las alturas de Linares, de Chillán, de Talcamávida, de Gómero y de Concepción, por derrumbes en los cerros y desbordes de ríos.	Desde la Región de Coquimbo a la Araucanía	Urrutia y Lanza (1993)
RM01		En Yungay en las riberas del Río Panqueco se han originado derrumbes o procesos de socavamiento de taludes en el sector norte urbano al norte de la calle Chipana a la altura de Chorrillos	Yungay	Capítulo 6. Análisis de sitio urbano (Etapa I Expediente y Diagnóstico comunal y urbano. PRC Yungay 2009

1.4.2 Diagnóstico

En el catastro se identificaron pocos eventos de remociones en masa, lo cual no implica que no hayan ocurrido o no vayan a ocurrir en la comuna.

De acuerdo con la geomorfología del sector, al oriente de la comuna (fuera del área de levantamiento) existen zonas con altas pendientes que podrían ser propensas a generar este tipo de procesos, donde se identifican grandes escarpes que son consecuencia de procesos gravitacionales en los cerros.

Por otro lado, en la zona de la Depresión Central, debido al encajonamiento de ríos y esteros, sus riberas presentan altas pendientes, lo que favorece el retroceso de las laderas. En consecuencia, estas zonas son más propensas a que ocurran procesos de ladera.

Las unidades geológicas identificadas en este trabajo como depósitos aluviales y coluviales son producto de la ocurrencia de caída de rocas, deslizamientos y flujos de barro y/o detrito, lo que evidencia de que procesos como los descritos sí pueden ocurrir.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, los mayores eventos de remociones en masa se generarían en las zonas rurales de la comuna, ubicadas al este de Yungay, mientras que las áreas urbanas y su entorno no son favorables para generar este fenómeno dada su geología, geomorfología y su ubicación dentro de la Depresión Central. No obstante, la incisión y morfología de la red de drenaje actual produce grandes pendientes. Esto favorece que, localmente, las laderas puedan ser susceptibles de generar procesos de ladera.

Por otro lado, el PRC de Yungay 2009, menciona que este peligro no es de mayor importancia en las zonas cercanas a los centros urbanos, pero sí pueden ocurrir en algunas riberas de ríos. Esto se pudo corroborar en terreno donde se observaron depósitos de deslizamientos generados en la ladera del estero Camarones, en la calle Chipana, entre las intersecciones de Chorrillos y Huamachuco.

Así, los factores condicionantes de los procesos de ladera y de flujos de barro y/o detritos, están determinados principalmente por las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas del terreno. El factor morfométrico principal es la pendiente y el relieve topográfico de las laderas, puesto que en el área de

levantamiento la geología es homogénea, los dos factores mencionados anteriormente son los preponderantes para la evaluación de la susceptibilidad.

En cuanto a los factores desencadenantes para los procesos de ladera y de flujos de barro y/o detritos, se identifican dos principales. Los grandes sismos y los eventos meteorológicos extremos, que disminuyen la cohesión de los materiales geológicos. En ambos casos, los sectores susceptibles se ven sometidos a estímulos externos que provocan inestabilidad en las rocas o depósitos, de tal manera que los materiales que componen las laderas pueden llegar a caer, deslizar pendiente abajo o fluir a través de los cauces.

1.4.3 Susceptibilidad

A partir del Modelo Digital de Terreno de las zonas urbanas se analizaron los parámetros morfométricos que, junto con la evaluación de las líneas de base de geomorfología, geología e hidrología (secciones 1.2.2, 1.2.3 y 1.2.4, respectivamente) dan cuenta de la determinación de zonas de susceptibilidad de procesos de ladera.

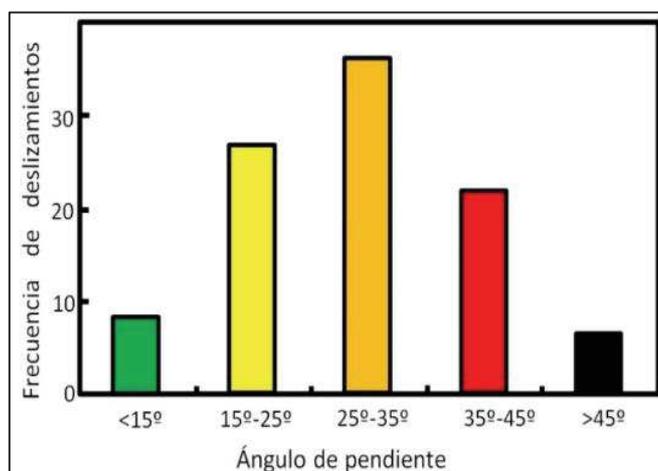
a) Procesos de ladera

Para determinar la susceptibilidad de los procesos de ladera de la comuna, se analizó la geología, el catastro y los productos generados a partir del modelo de elevación digital.

Varios estudios (por ejemplo, Lara (2007)) muestran que los parámetros que ejercen mayor control en la ocurrencia de procesos de laderas se relacionan con la pendiente y la litología. Como se describió anteriormente, ninguna de las tres localidades presenta afloramientos de rocas consolidadas por lo que se puede considerar que la litología es bastante homogénea. En consecuencia, el factor más relevante para el análisis de la susceptibilidad de remociones en masa es la pendiente.

Las pendientes fueron clasificadas considerando los intervalos propuestos por Esaki et al., (2005) que se basa en información compilada de diversas fuentes que han generado catastros de deslizamientos en distintos lugares del mundo, dando origen a la distribución de frecuencias de deslizamientos en función de la pendiente del terreno (FIGURA N° 1.4—1). De esta manera, los intervalos de categorización de las pendientes para el presente estudio corresponden a 15° - 25°, 25° - 35° y >35°, asociados a grados de susceptibilidad de generación moderada, alta, muy alta, respectivamente.

FIGURA N° 1.4—1 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno.



Fuente: Esaki et al. (2005)

A partir de esta ponderación se obtuvo una capa ráster de susceptibilidad de generación de procesos de ladera, la cual se clasificó considerando los siguientes intervalos:

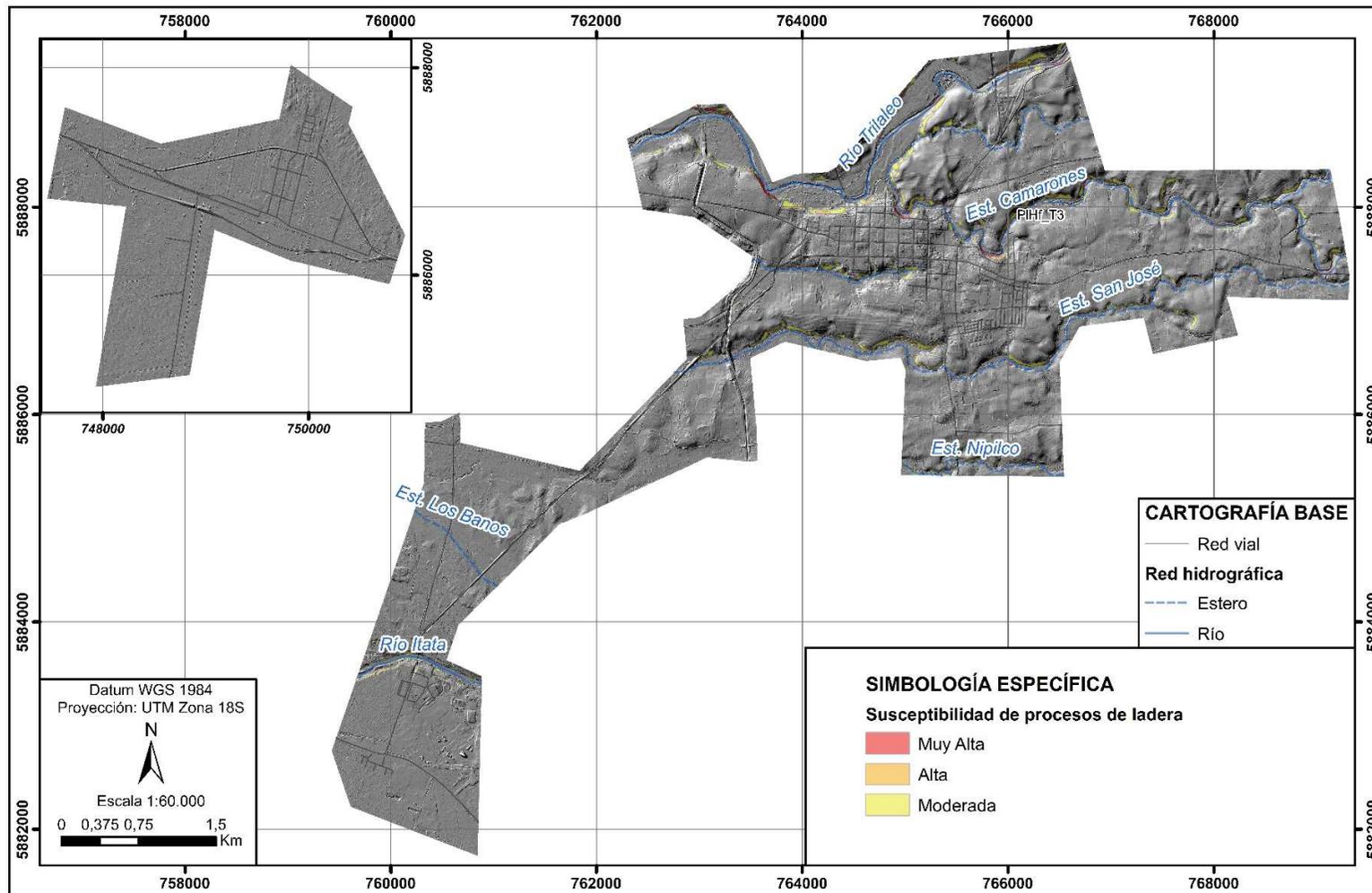
- **Susceptibilidad Muy Alta:** Pendientes mayores a 35°.
- **Susceptibilidad Alta:** Pendientes entre 25° y 35°.
- **Susceptibilidad Moderada:** Pendientes entre 15° y 25°.

Una vez obtenida la capa ráster de susceptibilidad por generación de procesos de ladera, se establecen criterios geológicos-geomorfológicos para detallar dichas zonas susceptibles. De esta manera, a partir del ráster del cual se generó la susceptibilidad, no se contemplan todas aquellas zonas que generan susceptibilidad que se encuentran las riberas de los ríos que tengan menos de dos metros de altura entre la ladera y el fondo del cauce, pues dada la dinámica fluvial, esta puede tener cambios geomorfológicos en el corto plazo. Del mismo modo, todas aquellas zonas que generen pendientes altas producto de la construcción de terraplenes, muros, taludes artificiales y cualquier elemento antrópico, el cual debe ser considerado por el organismo correspondiente salvaguardar tanto la estructura como sus posibles daños.

A continuación, se presenta una figura esquemática representativa a escala 1:60.000, correspondiente al mapa de susceptibilidad de procesos de ladera (FIGURA N° 1.4—2). Anexo a este informe se incorpora un Plano a escala 1:10.000 para cada una de las localidades por separado.

De esta manera del mapa de susceptibilidad se destaca que solo en las riberas de ríos y terrazas fluviales existen zonas con susceptibilidad de generar procesos de ladera. Cabe destacar que en la localidad de Campanario no existen zonas susceptibles debido al bajo relieve.

FIGURA N° 1.4—2 Mapa de susceptibilidad de procesos de ladera



Fuente: Elaboración propia

b) Flujos de barro y/o detritos

En el caso de los flujos, los insumos utilizados para el análisis fueron la caracterización geológica y geomorfológica a escala 1:5.000 realizada en este trabajo, el catastro, el modelo de elevación digital de este estudio y el procesamiento de este último, fotografías aéreas y un reconocimiento en terreno. Estos factores permitieron realizar una zonificación de susceptibilidad de ser afectada por dicha amenaza.

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. Por esta razón, solo se asignaron dos categorías de susceptibilidad, alta y moderada.

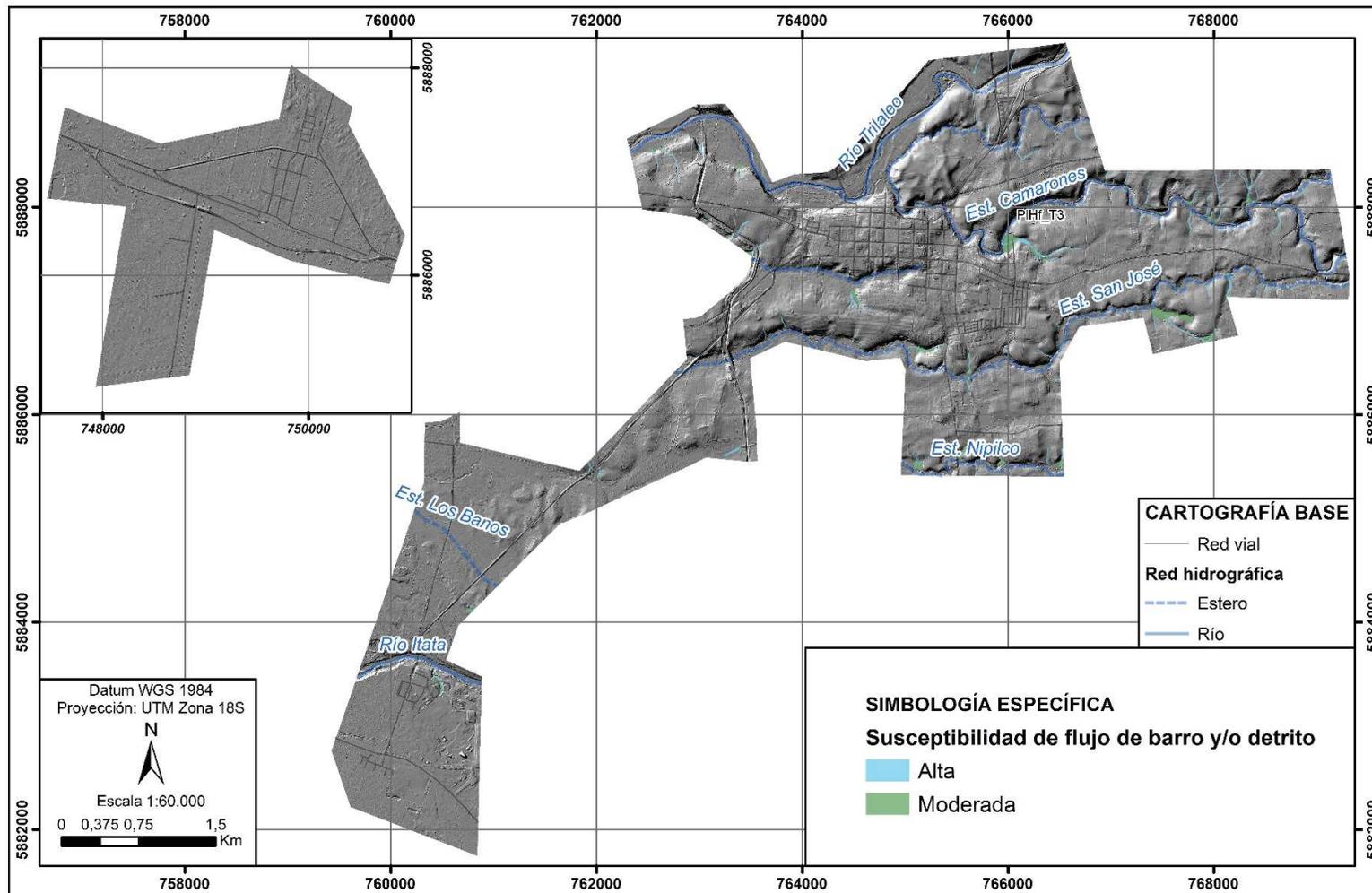
Las zonas susceptibles a flujos de barro y/o detritos se describen a continuación

- **Susceptibilidad Alta de flujos de barro y/o detritos:** Cauces de quebradas con depósitos aluviales y coluviales (Ha) actuales según la geología a escala 1:5.000 que terminan cercano a un cauce.
- **Susceptibilidad Moderada de flujos de barro y/o detritos:** Abanicos y planicies aluviales antiguas, correspondiente a la unidad de depósitos aluviales y coluviales antiguos (PIHa) que terminan cercanos a un cauce.

A continuación, se presenta una figura esquemática representativa a escala 1:60.000, correspondiente al mapa de susceptibilidad de flujos de barro y/o detrito (FIGURA N° 1.4—3). Anexo a este informe se incorpora un Plano a escala 1:10.000 para cada una de las localidades por separado.

Al igual que para el caso de procesos de ladera, se destaca que solo en algunas quebradas presentes en las riberas de ríos y terrazas fluviales existen zonas con susceptibilidad de flujos y el alcance que pueden tener también es limitado. Cabe destacar que en la localidad de Campanario no existen zonas susceptibles debido al bajo relieve e inexistencia de quebradas.

FIGURA N° 1.4—3 Mapa de susceptibilidad de flujos de barro y/o detrimento



Fuente: Elaboración propia

1.5 SISMICIDAD

1.5.1 Catastro

Se recopilaron los principales terremotos registrados en la zona central y sur que afectaron a la comuna de Yungay (CUADRO N° 1.5—1).

En la línea de base de la sismicidad (sección 1.2.5) se identifica una gran cantidad de sismos que han ocurrido en una zona que pueden sentirse o producir efectos en la comuna de Yungay. Estos registros son el resultado de recopilaciones históricas y de registros instrumentales. De esta forma, la amenaza sísmica en la comuna de Yungay se asocia a tres tipos de sismos:

- Sismos de interplaca, ocurridos en el contacto entre las placas Sudamericana y Nazca, con altas intensidades como consecuencia de un terremoto de gran magnitud a una escala regional, donde destacan los terremotos que afectaron a la zona en 1751, 1835, 1960 y 2010.
- Sismos intraplaca de profundidad intermedia, con epicentro en la plaza de Nazca bajo la depresión intermedia, cuyos efectos pueden ser muy destructivos, como lo ocurrido en 1939 en el “Terremoto de Chillán”.
- Sismos corticales, asociados a actividad que ocurre en el interior de la Placa Sudamericana, como resultado del movimiento a través de estructuras como fallas activas.

CUADRO N° 1.5—1 Catastro de sismos que han afectado la comuna de Yungay

Fecha	Intensidad y/o magnitud	Descripción	Referencia
Terremoto del 28 de octubre de 1562	X	Daños en la costa entre Concepción y Valdivia. El movimiento se sintió en más de 1500 km.	Petit-Breuilh (2004)
Terremoto del 8 de febrero de 1570	X, M:8,5	Un fuerte terremoto sacudió Concepción, la mayor parte de las casas se derrumbaron y la tierra se abrió en varios lugares.	Urrutia y Lanza (1993)
Terremoto del 16 de diciembre de 1575	X	El último terremoto del siglo causó los mayores destrozos en Valdivia. La Imperial, Villarrica, Osorno y Castro también fueron arrasadas por el sismo, sufriendo graves daños los campos vecinos.	Urrutia y Lanza (1993)
Terremoto del 15 de marzo de 1657	X -XI, M:8,0?	Un ruido ensordecedor precedió al terremoto que seguido de un maremoto asoló a Concepción. El fuerte movimiento sísmico impidió a los habitantes mantenerse en pie. Las casas, los edificios e iglesias empezaron a caerse con el movimiento. El movimiento sísmico se sintió desde Quillota a Cautín.	Urrutia y Lanza (1993)
Terremoto marzo de 1709	IX	Concepción/Centro-sur de Chile. Destrucción de las ciudades de Chillán y Concepción	Petit-Breuilh (2004)
Terremoto del 8 de julio de 1730		Un fuerte terremoto conmovió a la población entre La Serena y Valdivia. En Chillán sólo hubo daños menores en los edificios.	Urrutia y Lanza (1993)
Terremoto del 25 de mayo de 1751	IX-X, M:8,5	Se sintió un temblor el 23 de mayo y luego el 25 un terremoto en Concepción.	Urrutia y Lanza (1993)

Fecha	Intensidad y/o magnitud	Descripción	Referencia
Terremoto del 20 de febrero de 1835	XI, M:8,2	Terremoto se sintió desde Copiapó hasta Chiloé, dejando alrededor de doscientos muertos	Urrutia y Lanza (1993)
Sismo del 23 de julio de 1898		Sismo en la zona de Concepción. En Cauquenes. Chillán, Bulnes, Yungay, San Rosendo, Mulchén y Angol hubo sólo daños de menor consideración.	Urrutia y Lanza (1993)
Terremoto del 16 de agosto de 1906	8,6	Terremoto en zona central de Chile. Dos movimientos sísmicos se sintieron entre Tacna y Ancud. El epicentro estuvo situado entre Limache y Valparaíso y tuvo una magnitud de 8,6 en la escala de Richter. Hubo más de 2.000 muertes, más de veinte mil heridos, interrupción de servicios y daños en la propiedad. En Chillán hubo edificaciones con serios daños.	Urrutia y Lanza (1993)
Terremoto del 1 de diciembre de 1928		Terremoto con epicentro entre Talca y Constitución. Dejó trescientos muertos, centenares de heridos y daños. Chillán tuvo dos muertos y 17 heridos, además de numerosos daños en infraestructura local. En Chillán Viejo se agrietaron algunas murallas.	Urrutia y Lanza (1993)
Terremoto del 24 de enero de 1939	X-XI, MW=8,3	Sismo afectó principalmente las provincias de Maule, Linares, Ñuble y Concepción. Más de 5.000 muertos registrados, aunque se cree que fueron más de 30.000. Chillán fue la ciudad más afectada, se estima que el 60% de las viviendas y edificios se derrumbaron o quedaron semidestruidos. Según los efectos del sismo sobre las construcciones, el sismo fue clasificado con el grado X en Chillán.	Urrutia y Lanza (1993)
Sismo del 22 de septiembre de 1943	VII	Foco de Concepción. Sacudió Chillán, San Carlos y Bulnes. Se sintió desde Santiago a Temuco.	Petit-Breuilh (2004)
Sismo del 25 de junio de 1946	VII	Foco de Concepción. Deterioros en Chillán, Bulnes y alrededores.	Petit-Breuilh (2004)
Sismo del 6 de mayo de 1953	VIII, M: 7,6	Sismo con características de terremoto afectó a Chillán y Concepción. Hubo interrupción de los servicios básicos y daños estructurales. A este sismo se le dio grado diez en la escala de Mercalli.	Urrutia y Lanza (1993)
Terremoto del 21 y 22 de mayo de 1960	9,5	Dos terremotos afectaron trece provincias de país. En Chillán murieron cinco personas. El 20% de las edificaciones afectadas fueron seriamente dañadas.	Urrutia y Lanza (1993)
Sismo del 10 de mayo de 1975	7,8	El epicentro se localizó en la costa de Lebu. El sismo tuvo una intensidad grado 7-8 en la escala de Mercalli en Cañete, la provincia más afectada. El sismo tuvo una intensidad de grado 5 en Chillán.	Urrutia y Lanza (1993)

Fecha	Intensidad y/o magnitud	Descripción	Referencia
27 de febrero 2010	8,8	Un terremoto de magnitud 8,8, con epicentro a 59,4 kilómetros al suroeste de Cauquenes, devastó seis regiones del centro y norte chilenos, causó 525 muertos, 25 desaparecidos, 800.000 damnificados y pérdidas por 30.000 millones de dólares.	www.elmostrador.cl (consulta: 10/09/2020)

1.5.2 Diagnóstico

Las fuentes sismogénicas descritas anteriormente generan terremotos que afectan al territorio a una escala regional, en particular, los sismos interplaca, que corresponden a los más frecuentes y de mayor magnitud registrada, se encuentran considerados en la norma sísmica. Sin embargo, respecto a los sismos intraplaca, como el terremoto de Chillán de 1939, no se tiene información suficiente debido a su baja aparición en el registro. Debido a las características de estos tipos de sismos, no es posible zonificar la amenaza a escala del área urbana.

Por último, se tienen los sismos corticales generados por fallas activas alojadas en la corteza. Si bien, en la comuna de Yungay o cerca de ella, se han reconocido diferentes sistemas de fallas en la Cordillera Principal (ver línea de base de sismicidad en sección 1.2.3b) y 1.2.5), el conocimiento en torno a ellas es aún insuficiente para efectuar cualquier análisis relacionado a su peligrosidad.

En conclusión, la comuna se encuentra expuesta a la amenaza sísmica de tres fuentes sismogénicas, pero en ninguna de ellas se pueden establecer diferenciaciones en cuanto a la susceptibilidad, ya sea a escala comunal o de las áreas urbanas.

1.6 VOLCANISMO

Chile se dispone en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, en la costa occidental del Océano Pacífico, que se caracteriza por concentrar una intensa actividad sísmica y volcánica en las zonas que abarca. En particular, la Región de Ñuble se ubica en el segmento denominado Zona Volcánica Sur (ZVS) desarrollado a lo largo de 1.400 km del margen andino, desde los 33,3°S (Volcán Tupungatito) hasta los 45,9°S (Volcán Hudson).

1.6.1 Catastro

En la comuna de Yungay, así como en las cuencas que aportan a ella, no existen centros eruptivos. Para la evaluación de los peligros volcánicos se han considerado los volcanes que se encuentran en un radio de aproximadamente 100 km, que son el volcán Antuco en la región de Biobío y el Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNCh), que presenta una mayor actividad. Este último se encuentra en el sector cordillerano de la Región del Ñuble (36°52'S – 71°22'O) en el límite de las comunas de Coihueco y Pinto. El CVNCh tiene forma elíptica, un área basal de 150 km² y una altitud máxima de 3.212 m s.n.m. El edificio actual posee diecisiete centros de emisión reconocibles alineados principalmente en dirección NW-SE, distribuidos en dos subcomplejos "Cerro Blanco" y "Las Termas", y algunos centros de emisión satélites menores.

El CVNCh es considerado un volcán activo y ocupa la posición número 4 en el Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos en Chile 2019 de la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) del SERNAGEOMIN. El CVNCh se encuentra permanentemente monitoreado desde el 2011 por el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) y desde el 2015 ha presentado manifestaciones de actividad casi continua, por lo que ha fluctuado entre niveles de alerta amarilla a naranja.

En la bibliografía se reconocen varios eventos eruptivos históricos para ambos volcanes, siendo las erupciones más importantes las que se presentan en el CUADRO N° 1.6—1.

CUADRO N° 1.6—1 Registro de eventos eruptivos históricos cercanos a la comuna de Yungay

Volcán	Descripción	Fecha erupción	Referencia
Antuco	Erupción estromboliana de ocho días de duración, generación de espesas nubes de cenizas, piedras y lava.	1624	Urrutia y Lanza (1993)
Antuco	Caída de piroclastos y generación de coladas de lava	1752	Urrutia y Lanza (1993)
Antuco	Caída de piroclastos, emanación de vapor, ácidos y humo, generación de coladas de lava y lahares.	1820	Urrutia y Lanza (1993)
Antuco	Caída de piroclastos y generación de espesa columna de cenizas	1828-1829	Pöppig (1960)
Antuco	Erupción de gas	1839	Sernageomin (2018)
Antuco	Generación de columna de cenizas y coladas de lava.	1845	Domeyko (1978)
Antuco	Erupción fisural con emisión de piroclastos y flujos de lava que bloquearon el desagüe del río Laja.	1852-1853	Sernageomin (2018)
Complejo Volcánico Nevados de Chillán	Erupción explosiva con extensa depositación de tefra y posibles lahares. Posiblemente asociada al volcán Viejo.	1749-1752	Urrutia y Lanza (1993); Sernageomin (2016)
Complejo Volcánico Nevados de Chillán	Actividad estromboliana, generación del cono piroclástico Santa Gertrudis, generación de coladas de lava, eyección de bombas y lahares.	1861-1865	Urrutia y Lanza (1993); Sernageomin (2018)
Complejo Volcánico Nevados de Chillán	Erupción en el volcán Viejo, caída piroclástica y generación de lahares.	1891-1898	Sernageomin (2016)
Complejo Volcánico Nevados de Chillán	Actividad estromboliana, nacimiento del volcán Nuevo, caída de piroclastos, generación de coladas de lava y lahares.	1906-1942	Sernageomin (2018); Sernageomin (2016)
Complejo Volcánico Nevados de Chillán	Nacimiento del volcán Arrau, actividad estromboliana con generación de lahares y caída de piroclastos.	1973-1987	Sernageomin (2018); Sernageomin (2016)
Complejo Volcánico Nevados de Chillán	Inicio de ciclo eruptivo caracterizado por explosiones menores y creación de cráter Nicanor. En diciembre de 2017 se constató la formación de un domo de lava en este cráter.	2016-2018	Sernageomin (2018)

1.6.2 Diagnóstico

La revisión de la actividad eruptiva histórica del CVNCh y volcán Antuco da cuenta de la alta frecuencia eruptiva de ambos, especialmente el CVNCh en este último tiempo, destacándose periodos extensos de actividad relativamente continua, como la de 1861 a 1865, 1906 a 1948, 1973 a 1987 y 2016 a 2018.

Según la información geológica, en el sector cordillerano de la comuna, lejos de las áreas urbanas se encuentran depósitos de origen volcánico, donde se destacan lavas, depósitos laháricos y flujos piroclásticos de edades Pliocena-Pleistocena o anteriores. Con respecto a las lavas, si bien se reconocen algunas que

H A B I T E R R A L T D A

alcanzan una distancia de decenas de kilómetros proveniente de erupciones históricas, las correspondientes a las últimas erupciones no se extienden más allá de unos pocos kilómetros. Considerando su distribución y que, además, se desplazan a velocidades relativamente lentas, estas constituyen un peligro de relevancia a pocos kilómetros del centro de erupción y, dada la distancia de más de 60 km con el centro eruptivo más cercano, no estarían al alcance de la comuna.

Otros peligros relacionados con el volcanismo que podrían afectar al territorio estudiado son la proyección de piroclastos balísticos, que solo tienen un alcance de pocos kilómetros, y la caída de piroclastos o tefra que tienen mayor alcance. Con respecto a este último peligro, que está dado por la caída por gravedad de partículas desde una columna eruptiva, debe tenerse en consideración que el viento en la comuna de Yungay tiene una dirección predominante hacia el noreste, lo que reduce la probabilidad de que la tefra se dirija hacia el oeste de la comuna. Por otra parte, considerando la distancia que existe entre los centros volcánicos y las áreas urbanas, es poco probable que se acumule mucho material en las áreas urbanas o que el material acumulado sea de un íámetro considerable. Pese a lo anterior, lo anterior no se puede descartar que caiga tefra en las áreas urbanas de la comuna.

Por último, con respecto a los flujos piroclásticos y lahares, la distribución de este peligro se relaciona principalmente al colapso de una columna eruptiva y la orientación de esta dada por la dirección del viento; aunque también depende de la ubicación del cráter y el sistema de drenaje, ya que el flujo se desplazará siguiendo la pendiente de la ladera en la que se origine o para el caso de los lahares, avanzando a través de cauces ya existentes. Por lo tanto, si bien depósitos de este producto se han reconocido dentro de las unidades geológicas, los centros volcánicos se encuentran a una distancia de aproximadamente 100 km, por lo que no alcanzaría a afectar a la comuna.

En consecuencia, el único peligro relacionado con el volcanismo que presenta condiciones para afectar a la comuna de Yungay es la caída de tefra, aunque las condiciones climáticas dominantes no favorecen que esto ocurra. De esta forma, se ha asignado una susceptibilidad moderada a la totalidad de las áreas analizadas.

1.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez identificado los peligros y determinados los grados de susceptibilidad, se incorporan los resultados en los instrumentos de planificación. Lo anterior se materializa mediante la aplicación del artículo 2.1.17 de la OGUC y/o tomando otras medidas de planificación acorde a las atribuciones que otorgan la LGUC y a la OGUC a los instrumentos de Planificación Territorial como, por ejemplo, la diferenciación de usos de suelo y la regulación de la forma e intensidad de su ocupación.

A continuación, se proponen lineamientos generales para estas definiciones.

1.7.1 Zonificación de peligros

En un instrumento de planificación territorial, la determinación de las áreas que pueden ser afectadas por un determinado peligro es relevante, porque además de zonificar el peligro, estas áreas se utilizan como base para definir los diferentes usos que se le dará al territorio.

La zonificación de los peligros debe utilizarse a partir de criterios que minimicen la probabilidad de que un área de planificación sea afectada por un peligro determinado, considerando también áreas que actualmente se encuentran ocupadas y que presentan condiciones favorables para ser afectadas (o ya lo han sido) por el peligro en cuestión. En consecuencia, se debe definir el nivel de peligro aceptable, con una recurrencia suficientemente baja que la comunidad en su conjunto esté dispuesta a tolerar. Es necesario recalcar que en este trabajo solo se consideran las características del medio físico y sirve como un insumo más en el proceso de planificación.

De acuerdo con lo anterior, el análisis de susceptibilidad es un parámetro adecuado para zonificar los peligros. En este estudio, se determinó la susceptibilidad a partir del análisis de los factores condicionantes y desencadenantes. Los aspectos metodológicos que sustentan la distribución espacial de la zonificación de susceptibilidad se resumen en el CUADRO N° 1.7—1.

A partir del diagnóstico y la determinación de la susceptibilidad, la comuna sí se puede ver afectada a peligros naturales, tales como inundaciones y remociones en masa que pueden ser zonificables a escala local de acuerdo con la susceptibilidad de ocurrencia de dicho fenómeno.

Con relación a los peligros asociados a la sismicidad y volcanismo de Yungay, si bien la comuna sí está expuesta a ambos procesos, pero a escala regional, donde toda la comuna (y el área de levantamiento también) podría verse afectada de la misma manera, por lo que no sería zonificable a escala de este PRC.

A pesar de que el concepto de susceptibilidad no contempla la cuantificación de periodos de retorno, ni probabilidades de ocurrencia, si estipula niveles que indican de manera relativa la frecuencia con que ocurre un cierto fenómeno. En ese sentido, para este estudio, 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). Por último, las de Moderada susceptibilidad se asocian a eventos excepcionales, de los que muchas veces no existen registros históricos, pero si evidencias de otro tipo como geológicas o geomorfológicas.

CUADRO N° 1.7—1 Resumen de los aspectos metodológicos para la determinación de la susceptibilidad.

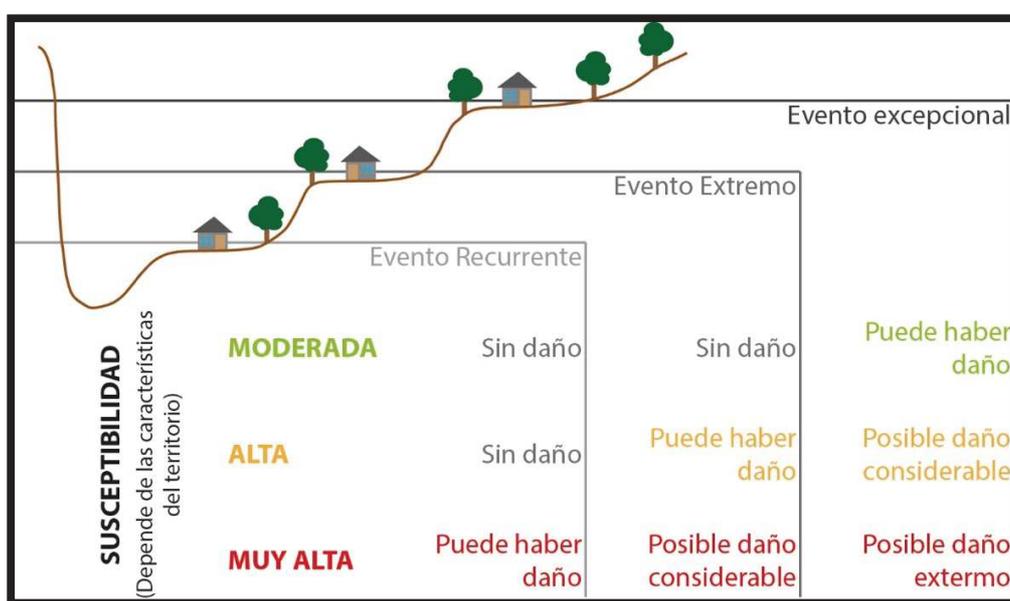
Peligro	Factores condicionantes	Factores desencadenantes	Elementos de zonificación
Inundaciones por desborde de cauce	<ul style="list-style-type: none"> - Características de la red de drenaje (morfología, relleno, tipo de escorrentía) - Presencia y características de terrazas fluviales 	<ul style="list-style-type: none"> - Lluvias intensas 	<ul style="list-style-type: none"> - Catastro de eventos de inundación por desborde de cauce - Unidades geológicas; terrazas fluviales - Características de la red de drenaje - Observaciones de terreno
Inundaciones por anegamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Características morfológicas del terreno (zonas deprimidas) 	<ul style="list-style-type: none"> - Lluvias intensas 	<ul style="list-style-type: none"> - Características morfológicas del terreno (zonas deprimidas) - Catastro de eventos de inundación por anegamiento - Observaciones de terreno
Procesos de ladera	<ul style="list-style-type: none"> - Geología - Características geomorfológicas (pendiente, forma, orientación) - Vegetación - Actividad antrópica 	<ul style="list-style-type: none"> - Sismos - Lluvias intensas 	<ul style="list-style-type: none"> - Unidades geológicas - Catastro de remociones en masa - Pendiente del terreno - Observaciones de terreno
Flujos de barro y/o detritos	<ul style="list-style-type: none"> - Morfología de las quebradas y sus zonas de descarga - Características de la cuenca aportante (tamaño, pendiente, altura, materiales) 	<ul style="list-style-type: none"> - Lluvias intensas - Sismos 	<ul style="list-style-type: none"> - Unidades geológicas - Catastro de remociones en masa - Características morfológicas de la red de drenaje (pendiente y forma de los cauces) - Observaciones de 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 es posible zonificar a escala del área de levantamiento.
Volcanismo	<ul style="list-style-type: none"> - Localización del centro eruptivo - Productos volcánicos - Morfología del volcán - Morfología de red de drenaje del volcán - Dirección del viento 	<ul style="list-style-type: none"> - Volcanismo 	<ul style="list-style-type: none"> - No es posible zonificar a escala del área de levantamiento.

Debe considerarse que los eventos extremos y excepcionales, si bien son los más destructivos, están asociados a recurrencias bajas y muy bajas, respectivamente. Sin embargo, las áreas donde ocurre la mayor destrucción

H A B I T E R R A L T D A

durante dichos eventos suelen coincidir con aquellas donde el peligro en cuestión es más recurrente. Tal como se ejemplifica en la FIGURA N° 1.7—1, las terrazas topográficamente más bajas de un río serían fuertemente afectadas durante eventos extremos o excepcionales de inundación por desborde de cauces, pues allí se alcanzarían las mayores profundidades de inundación. De esta forma, al definir las áreas que presentan una mayor susceptibilidad de ser afectadas por cierto peligro, se están delimitando también las áreas que pueden ser más intensamente dañadas durante eventos de naturaleza extrema (susceptibilidad Alta) o excepcional (susceptibilidad Moderada). De esta forma, al definir las áreas que presentan susceptibilidad Moderada, se están delimitando las áreas que pueden ser alcanzadas solo en eventos excepcionales. 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 N° 1.7—1 Esquema del daño provocado por eventos de inundación por desborde de cauces con diferentes magnitudes.



1.7.2 Definición de las áreas de riesgo

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 a las categorizaciones establecidas por la OGUC, se propone aplicar el concepto de “área de riesgo” (Artículo 2.1.17) a las zonas de Muy Alta y Alta susceptibilidad de los peligros, exceptuando sismicidad y volcanismo (CUADRO N° 1.7—2). Pese a esto, es necesario destacar que no se debe considerar que las zonas de susceptibilidad Moderada no puedan ser afectadas por los peligros analizados. Por el contrario, estas zonas si pudieran ser afectadas por eventos excepcionales y muy destructivos, pero de muy baja recurrencia, por lo que deberían tomarse en consideración, a lo menos, para la elaboración de planes de emergencia.

En lo que se refiere a las categorías de susceptibilidad, es importante mencionar que estas no son equivalentes entre los distintos peligros estudiados en cuanto a su magnitud, recurrencia y afectación. Por ejemplo, una zona de susceptibilidad Muy Alta de desborde de cauces puede implicar mucho más daño y ser más recurrente que los eventos en una zona de susceptibilidad Muy Alta de anegamientos. En este sentido, no se recomienda la comparación directa de categorías de susceptibilidad entre peligros.

CUADRO N° 1.7—2 Criterios de definición de las áreas de riesgo (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
Inundaciones por desborde de cauces	MUY ALTA	Cauce activo y a parte de la terraza 3 (PIHf-3), según las observaciones de terreno, asociados al río Trilaleo y esteros Camarones y San José, por Yungay y, el río Itata y esteros Los Banos y Nipilco, por el norte de Cholguán.	X
	ALTA	Parte de la terraza 3 (PIHf-3), según las observaciones de terreno, y la terraza 2 (PIHf-2) que se muestran en los ríos Trilaleo e Itata y esteros Camarones, San José, Los Banos y Nipilco, que bordean y disectan Yungay y Cholguán. Además, los canales antrópicos construidos y reconocidos a escala del presente trabajo son parte de esta categoría. En ella se han reconocido los canales de Yungay y Campanario.	X
	MODERADA	Terraza 1 (PIHf-1) que se presentan en los ríos Trilaleo e Itata o Cholguán, además de la parte más occidental del estero Camarones y estero Los Banos.	
Inundaciones por anegamiento	MUY ALTA	Zonas que presentan depresiones de más de 10 cm de profundidad según el ráster de zonas deprimidas y que actualmente se encuentran inundadas.	X
	ALTA	Zonas que presentan depresiones de más de 10 cm de profundidad según el ráster de zonas deprimidas adyacentes a zonas de susceptibilidad Muy Alta.	X
	MODERADA	Zonas que presentan depresiones de más de 10 cm de profundidad según el ráster de zonas deprimidas sin estar actualmente inundadas.	
Procesos de ladera	MUY ALTA	Zonas con pendientes mayores a 35°.	X
	ALTA	Zonas con pendientes entre 25° y 35°.	X
	MODERADA	Zonas con pendientes entre 15° y 25°.	
Flujos de barro y/o detritos	ALTA	Cauces de quebradas con depósitos aluviales y coluviales (Ha) actuales según la geología a escala 1:5.000 que terminan cercano a un cauce.	X
	MODERADA	Abanicos y planicies aluviales antiguas, correspondiente a la unidad de depósitos aluviales y coluviales antiguos (PIHa) que terminan cercanos a un cauce.	

1.7.3 Conclusiones y recomendaciones específicas

La comuna de Yungay, al emplazarse en una zona que mayoritariamente constituye una planicie, se encuentra expuesta a la ocurrencia de diversos peligros de manera localizada, especialmente en sectores adyacentes a los ríos y esteros que atraviesan la ciudad y las localidades de la comuna. Por esta razón, la planificación de la urbanización debe contemplar los peligros caracterizados en este trabajo.

Es necesario hacer énfasis en que la elaboración de los mapas de zonificación de susceptibilidad de los distintos tipos de peligros presentados se realizó en base a la evidencia recopilada y a modelos digitales. Dichos mapas consideran simplificaciones y supuestos, por lo que las áreas de susceptibilidad y sus límites **son aproximaciones, no poseen certeza absoluta ni indican una probabilidad de ocurrencia**. Al tratarse de fenómenos de origen natural, hay posibilidades de que ocurran eventos de los que no se tiene registro, relevando la importancia del monitoreo asociado a la gestión del riesgo.

A) Inundaciones por desborde de cauces

Los factores considerados para definir la susceptibilidad asociada a inundación por desborde de cauces fueron las unidades geológicas y geomorfológicas asociadas a los procesos fluviales en conjunto con la evidencia histórica de eventos de desbordes contenida en el catastro.

El factor más relevante en la definición de este peligro es la elevación del terreno con respecto al cauce principal de los esteros y ríos. De este modo, las zonas más susceptibles se encuentran a lo largo del lecho del cauce y en las terrazas de inundación topográficamente más bajas.

De igual manera, se han considerado los canales antrópicos, pues estos pueden fallar y generar el desborde del cauce que canaliza. Estos han sido categorizados como "Alta".

Se recomienda destinar las áreas de susceptibilidad Muy Alta y Alta, solo a actividades que no impliquen grandes pérdidas ni ponga en riesgo a la población.

B) Inundaciones por anegamiento

La definición de las áreas con susceptibilidad de inundación por anegamiento se basó en el catastro y en la presencia de depresiones cerradas o potencialmente cerradas, sin drenaje natural, derivadas del análisis topográfico. Estas depresiones se encuentran distribuidas de manera uniforme en el área de levantamiento y responden, más bien, a factores antrópicos. A pesar de su persistencia y del tipo de suelo que puede garantizar buen drenaje del suelo, la mayoría de estas áreas no presentan evidencia catastral de anegamiento, por lo que este parece ser un peligro poco relevante para el territorio. No obstante, se recomienda considerar las inundaciones por anegamiento ya que, en caso de mayor urbanización se requerirá la construcción de futuros sumideros, colectores, entre otros, que permitan la evacuación del agua.

C) Procesos de ladera

Los factores considerados para definir la susceptibilidad asociada a procesos de ladera fueron la pendiente del terreno, las unidades geológicas y el catastro. El parámetro que domina entre estos factores es la pendiente, por lo que las zonas más susceptibles a estos peligros se concentran en las laderas con muy altas pendientes generadas por la incisión fluvial. Según antecedentes de terreno, en los sectores convexos del meandro del estero Camarones, entre las calles Chorrillos y Huamachuco se generan caídas de menor volumen con mayor recurrencia.

Se sugiere regular la urbanización en las zonas definidas con susceptibilidad Muy Alta y Alta, tanto por el riesgo intrínseco que implican, como por el aumento de susceptibilidad que puede conllevar la misma intervención

antrópica, porque promueve la erosión al eliminar la vegetación, generar taludes de mayor ángulo y exponer rellenos de material suelto.

D) Flujos de barro y/o detritos

La zonificación de los flujos de barro y/o detritos se realizó en base a las características geológicas y geomorfológicas de la zona de estudio.

A partir del diagnóstico y zonificación, los flujos de barro y/o detritos son un peligro que puede afectar principalmente a la ciudad de Yungay, proveniente de las zonas deprimidas de las riberas de los ríos y esteros del sector. Las características morfológicas constituyen depresiones adyacentes o cercanas a los cursos de agua. Sin embargo, su impacto, en principio, sería de baja magnitud y de extensión acotada a las mismas quebradas que las originan, aunque no se descarta su influencia en cauces fluviales donde estas desembocan.

Se recomienda evitar la intervención antrópica en las quebradas asociadas a susceptibilidades Alta, ya que dicha intervención modificaría las condiciones de erosión, el normal drenaje de las quebradas y posible acumulación de material antrópico, situación que favorece las condiciones naturales que generan este peligro.

Tanto para flujos de barro y/o detritos, como para los procesos de ladera, es importante señalar que la conservación de la vegetación nativa, que actúa como un factor de mitigación (o de atenuación) natural ante fenómenos, ya que ayuda a preservar de mejor manera los suelos y, por lo tanto, contribuye a disminuir el riesgo.

e) Sismicidad

La comuna de Yungay posee un Alta susceptibilidad ante el peligro sísmico. Como las fuentes sismogénicas (sismos interplaca, sismos interplaca de profundidad intermedia, sismos corticales) generan terremotos que afectan al territorio a una escala regional, no es posible zonificarla a escala de las áreas urbanas.

Por otra parte, las normas chilenas NCh433 y NCh 2369 cuentan con herramientas mucho más eficientes que los instrumentos de planificación territorial para enfrentar esta amenaza.

f) Volcanismo

Tanto la ciudad de Yungay como las localidades de Cholguán y Campanario se encuentran a más de 60 km de distancia de cualquier centro de emisión volcánica. Entre los más cercanos se encuentran el CVNCh, hacia el noreste y el volcán Antuco hacia el este. No existen cuencas ni microcuencas asociadas a algunos de estos dos volcanes que drenen hacia la comuna, por lo tanto, no pareciera tener exposición ante fenómenos peligrosos tales como lahares o coladas de lava. Ante fenómenos como caída de tefra, los vientos que generalmente predominan en la zona poseen una vergencia hacia el noreste, razón por la cual hace poco probable que la zona se vea altamente perjudicada por productos volcánicos como la caída de tefra. Sin embargo, no debe dejar de considerarse que pueden suceder eventos extremos que potencialmente afecten a la zona de estudio. De ser así, la zona estaría completamente afectada por este peligro, razón por la cual, a la escala de trabajo, no es posible generar zonificación de este peligro.

1.8 REFERENCIAS

- 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.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/BCN. (2021). *Clima y Vegetación, Región de Ñuble*. Obtenido de <http://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region16/clima.htm>
- Cembrano, J., & Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: a review. *Tectonophysics*, 471, 96-113.
- Centeno, J., Fraile, M., Otero, M., & Pividal, A. (1994). *Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental*. Madrid: Ed. Rueda.
- Climate-data.org*. (2021). Obtenido de <http://es.climate-data.org/americadel-sur/chile/viii-region-del-bio-bio/yungay-21758/>
- Coloma, F., Valin, X., Oliveros, V., Vásquez, P., Creixell, C., Salazar, E., & N. Ducea, M. (Mayo de 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*, 44(2), 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* (págs. 268-317). Berlin: Springer-Verlag.
- 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), 2191-2194.
- Departamento de Ciencias de la Tierra. (2000). *Mapa Geológico - Metalogénico VIII Región del Bío-Bío*. Universidad de Concepción.
- Departamento de Protección Civil. (2006). *Informe sistema frontal 10 al 13 de julio 2006*.
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L., & Llorente-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.
- Duran Iligaray, M. (2009). *Plan Regulador Comunal de Yungay*.
- ECURED. (s.f.). http://www.ecured.cu/Comuna_de_Yungay.
- 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.

- Ferraris, F. (1979). *Hoja Los Ángeles - Angol. Escala 1:250.000*. Carta Geológica de Chile N°5 (Preliminar), Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Gajardo, A. (1981). *Hoja Concepción-Chillán, Región del Biobío*. Mapas Geológicos Preliminares de Chile, No. 4, escala 1:250.000., Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferre, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica* (Segunda ed.). Madrid: Pearson Educación.
- González-Ferrán, O. (1995). *Volcanes de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 410 pág.
- González-Vidal, D., Obermann, A., Tassara, A., Bataille, K., & Matteo, L. (2018). Crustal model of the Southern Central Andes derived from ambient seismic noise Rayleigh-wave tomography. *Tectonophysics*, 744, 215-226.
- Hasanzadeh Nafari, R., Ngo, T., & Mendis, P. (2016). An assessment of the effectiveness of tree-based models for multi-variate flood damage assessment in Australia. *Water*, v. 8(n. 282), p. 1-18.
- 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*, 25-26, 125-133.
- Hauser, A. (2000). *Remociones en masa en Chile* (2da ed.). Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 59, versión actualizada, 89 pág.
- JTC-1. (2008). Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), 85-98.
- Kausse, E., & Ramírez, D. (1992). Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos. *Revista geofísica*, 37, 159-193.
- Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of América Bulletin*, 95(4), 406-421.
- Keller, E., & Blodgett, R. (2004). *Riesgos Naturales*. Madrid: Pearson Education S.A., 448 pág.
- Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwartz, J., . . . Thieken, H. (2009). Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*(n. 9), p. 1679-1692.
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*, 10, 221-258.
- 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.
- Melnick, D., Charlet, F., Echtler, H., & De Batist, M. (2006). Incipient axial collapse of the Main Cordillera and strain partitioning gradient between the central and Patagonian Andes, Lago Laja, Chile. *Tectonics*(25(5)).
- Merz, B., Kreibich, H., & Lall, U. (2013). Multi-variate flood damage assessment: a tree-based data mining approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v. 13, p. 53-64.

- Mpodozis, C., & Ramos, V. A. (1989). *The Andes of Chile and Argentina In: Ericksen, G. E.; Cañas, M. T.; Reinemund, J. A. (eds) Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Energy Resources. Circum-PACIFIC Council for Energy and Hydrothermal Resources, American Association of Pet (11 ed.)*. Houston, Texas: Earth Science Series.
- Myers, B., & Brantley, S. (1995). *Hazardous phenomena at volcanoes*. Vancouver, Washington.: USGS Open File Report, pág. 95-231.
- 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.
- Niemeyer, H. (1980). *Hoyas Hidrográficas de Chile: Octava Región*. Santiago de Chile: Dirección General de Aguas.
- Oliva, C. (2019). *Informe final. Actualización Plan de Desarrollo Comunal PLADECO Yungay. "Versión completa"*.
- 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.
- Orozco, G., Jara, G., & Bertin, D. (2016). *Peligro del Complejo Volcánico Nevados de Chillán. Región del Biobío*. Carta Geológica de Chile, Serie Ambiental, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Pain, C. (1986). *Scarp Retreat and Slope Development Near Picton, New South Wales, Australia*. Braunschewig.
- Petit-Breuilh, M. (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), 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.
- 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.
- Pöppig, E. (1960). *Un testigo de la alborada en Chile: 1826 - 1829*. Santiago: Zig-Zag.
- Sancho, C. (1997). Los mapas de riesgos. En J. Peña (Ed.), *Cartografía geomorfológica básica y aplicada* (págs. 181-200). Zaragoza: Geomorfa.
- 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*, 80, 336-348.

- Sepúlveda, S., Serey, A., Lara, M., Pavez, A., & Rebolledo, S. (2010). Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia. *Landslides*, doi: 10.1007/s1034VI-010-0203-2.
- Sepúlveda, T., Cortés, J., Melnick, D., & Cisternas, M. (2018). Neotectónica y paleosimología del cabalgamiento Andino Occidental (WAT) en la región del Maule, Chile Central, 36°S. *XV Congreso Geológico Chileno*, (pág. 1). Concepción.
- SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa geológico de Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- SERNAGEOMIN. (2018). *Chile: territorio volcánico*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- 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*(11), 211-215.
- SUBDERE. (2011). *Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial*. Subsecretaría de Desarrollo Regional, Santiago.
- Taulis, E. (1938). *Terremotos y grandes temblores habidos en Chile*.
- Tichelaar, B., & Ruff, L. (1993). Depth of Seismic Coupling Along Subduction Zones. *Journal of Geophysical Research*, 98(B2), 2017-20137.
- Urrutia, R., & Lanza, C. (1993). *Catástrofes de Chile 1542-1992*. Editorial La Noria.
- Urrutia, R., & Lanza, C. (1993). *Catástrofes de Chile 1542-1992*.
- 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*, 3, 1-61.

ANEXOS

- Definiciones de peligros y riesgos utilizadas en este estudio

Los procesos geodinámicos producen modificaciones de diversas magnitudes en la superficie terrestre que constituyen peligros geológicos y 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 catastro, 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 la zona estudiada.

El concepto de **amenaza** o **peligrosidad** (*hazard**) 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, Ferre, Ortuño, & Oteo, 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; Gonzalez de Vallejo, Ferre, Ortuño, & Oteo, 2002; JTC-1, 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

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

económicas directas o indirectas, daños en infraestructura, etc. (Gonzalez de Vallejo, Ferre, Ortuño, & Oteo, 2002).

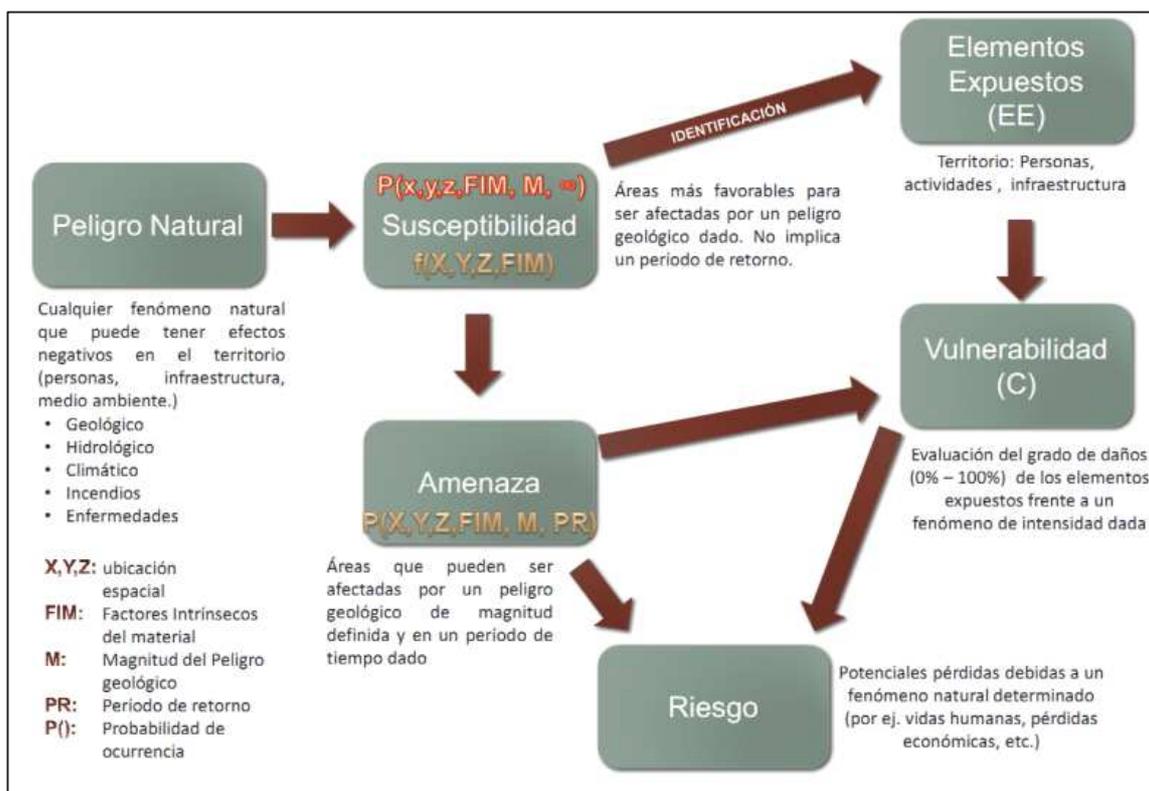
Según Varnes (1984), se denomina riesgo específico al grado de pérdidas esperado durante un período de tiempo dado, como consecuencia de la ocurrencia de un determinado proceso, expresado en términos de probabilidad. Puede ser expresado como el producto $A \times V$, donde A corresponde a la amenaza y V a la vulnerabilidad. En este caso no es posible obtener una evaluación cuantitativa de las pérdidas (Gonzalez de Vallejo, Ferre, Ortuño, & Oteo, 2002).

De acuerdo con 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:

$$R_t = R_e \times E = A \times V \times E$$

Donde R_t corresponde al riesgo total, R_e al riesgo específico y E a los elementos expuestos considerados. La FIGURA 0—1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo.

FIGURA 0—1: Etapas de evaluación de un evento geológico peligroso



Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984).

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 de riesgo utilizado 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.

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.

- Revisión de antecedentes

A continuación, se listan y describen brevemente los antecedentes a revisar durante este estudio.

Topografía base

- Fotografías aéreas (ortofoto) de tres localidades de la comuna: Yungay, Campanario y Cholguán (formato .jpg) del PRC Yungay, 2009.
- Cartografía en formato shape (.shp) útiles para el estudio de riesgo de tres localidades de la comuna: Yungay, Campanario y Cholguán. En el CUADRO N° 0—1 se resumen los archivos con la información que existe de cada localidad.

CUADRO N° 0—1 Lista de antecedentes en formato shape de localidades de la comuna de Yungay

Archivo	Localidad		
	Yungay	Campanario	Cholguán
Caminos de tierra (caminos de tierra.shp)	X	X	X
Caminos pavimentados (caminos pavimentados.shp)	X	X	X
Puntos con distintas cotas altimétricas (cota altimétrica.shp)	X	X	
Curvas de nivel (cotas de nivel.shp)	X	X	
Ubicación de edificaciones (edificaciones.shp)	X	X	X
Hidrografía (hidrografía.shp)	X	X	
Límite de la localidad (límite.shp)		X	X

- Cartografía en formato CAD donde se muestra el plano (layer) de las localidades de acuerdo con PRC Comuna Yungay del 2009.
- Imágenes satelitales de Google Earth y mapa base de ArcGIS.
- DEM SRTM de 30 m de resolución.
- Cartografía del PRC Comuna Yungay del 2009 a nivel comunal en distintos formatos que se muestra en el CUADRO N° 0—2.
- Modelo Digital de Terreno (DTM) de tres localidades de la comuna: segmento Yungay-Cholguán y Campanario.

CUADRO N° 0—2 Lista de antecedentes en formato shape (.shp) a nivel comunal del PRC Yungay 2009.

Archivo	Nombre archivo y formato
Límite de áreas urbanas	areas urbanas.shp
Canales de la comuna	canales.shp
Construcciones	construcciones.shp
Ubicación de cerros	cerros.shp
Curvas de nivel cada 50 m	curvas.shp
Líneas de drenaje	drenaje.shp
Escarpes	escarpa.shp
Toponimia	toponimia.shp
Trazados comunales	trazados comunales.shp
Red vial de la comuna	red vial comunal.shp

Geología y geomorfología

- **Mapa geológico de Chile. Versión digital. Publicación geológica digital N°4. Base geológica escala 1:1.000.000** (SERNAGEOMIN, 2003). En este trabajo se presenta la geología de todo Chile de manera que entrega información respecto del contexto geológico general en que se desarrolla la comuna. En el área comprendida por la comuna de Yungay se reconocen rocas y depósitos del Cenozoico superior, desde el Oligoceno al Holoceno, que corresponden principalmente a secuencias volcano-sedimentarias asociadas a colapsos de edificios de volcánicos, coladas de lava y depósitos piroclásticos, y en menor medida, a secuencias sedimentarias como depósitos aluviales, coluviales, fluviales y glaciales.
- **Geología de la Hoja Los Ángeles – Angol, escala 1:250.000** (Ferraris, 1979). Este trabajo cubre la totalidad de la comuna de Yungay, ubicándose esta última en el extremo noreste de la carta. De acuerdo con la información contenida en esta carta, la geología de la comuna se compone principalmente de rocas de las formaciones La Montaña al oeste y Cola de Zorro al este, siendo esta última intruida por rocas ígneas. Estas formaciones son erodadas y rellenadas por arenas y gravas de los valles actuales y cauces. En el extremo oeste se encuentran arenas asociadas al cono del Río Laja.
- **Mapa Geológico – Metalogénico VIII Región del Bío-Bío.** (Departamento de Ciencias de la Tierra, 2000). Este trabajo cubre toda la comuna de Yungay, donde se reconocen principalmente las formaciones La Montaña al oeste y Cola de Zorro al este, siendo esta última intruida por rocas ígneas. Son erodadas y rellenadas por depósitos no consolidados, gravas y arenas de terrazas fluviales. En el extremo sur afloran estratos de Polcura Cholguán.
- **Plan Regulador Comunal Yungay 2009.** Dentro del plan regulador vigente se hace descripción de la geología y geomorfología de la comuna basándose en las Geología de la Hoja Los Ángeles – Angol.

Peligros geológicos

- **Peligros del Complejo Volcánico Nevados de Chillán, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 28:34p., 1 mapa escala**

1:75.000, Santiago (Orozco, Jara, & Bertin, 2016). Contiene un registro de la actividad prehistórica e histórica del Complejo Volcánico Nevados de Chillán y presenta un mapa con las zonas susceptibles a ser afectadas por los productos que pudiera generar este complejo volcánico, divididas en “muy alto peligro”, “alto peligro”, “moderado peligro” y “bajo peligro”. El mapa fue realizado en base a los antecedentes geológicos y geomorfológicos y a modelaciones numéricas realizadas para cada tipo de producto.

- **Libros, artículos de revista y científicos.** “Catástrofes en Chile: 1541-1992” (Urrutia & Lanza, 1993), “Terremotos y grandes temblores habidos en Chile” (Taulis, 1938). Sismicidad en Chile (Madariaga, 1998), Chile: Territorio Volcánico (SERNAGEOMIN, 2018), Un testigo de la alborada en Chile (Pöppig, 1960).
- **Registros de prensa.** Información que haya sido publicado en artículos de prensa como diarios que entreguen información relevante de eventos que hayan ocurrido en la comuna de Yungay.
- **Servicio Sismológico Nacional CSN.** Datos sismológicos.
- **Plan Regulador Comunal Yungay 2009.** Se identifican peligros de origen natural tanto a nivel comunal como local (ciudad de Yungay y localidades de Cholguán y Campanario).

Clima e hidrología

- **“El clima de la Región de Ñuble: factor determinante para el progreso agrícola” (Orrego, Campos y Fuentes, 2020).** Capítulo del libro “Agricultura de la nueva Región de Ñuble: una caracterización sectorial”. Describe las características climáticas de la región y los factores que lo definen, el comportamiento de variables de impacto agrícola y escenarios climáticos esperados ante el fenómeno del cambio climático.
- **Zonas climáticas de Chile según Köppen-Geiger, escala 1:1.500.000.** Cobertura en formato SHP, realizado por el Departamento de Geografía de la Universidad de Chile, con la clasificación climática de Köppen-Geiger para el territorio nacional.
- **Explorador Climático (CR)².** Plataforma en línea (<https://explorador.cr2.cl/>) del Centro de Ciencia de Clima y la Resiliencia (CR)² para el acceso a bases de datos de variables hidrometeorológicas de diversas estaciones de medición (meteorológicas y fluviométricas).

Antecedentes generales

- **Declaración de impacto ambiental.** Proyecto de Plan Regulador Comunal de Yungay. Documento donde se describe espacio físico de la comuna y se identifican peligros de origen natural que puedan ocurrir en la comuna y localidades.
- Descripción de los peligros geológicos analizados

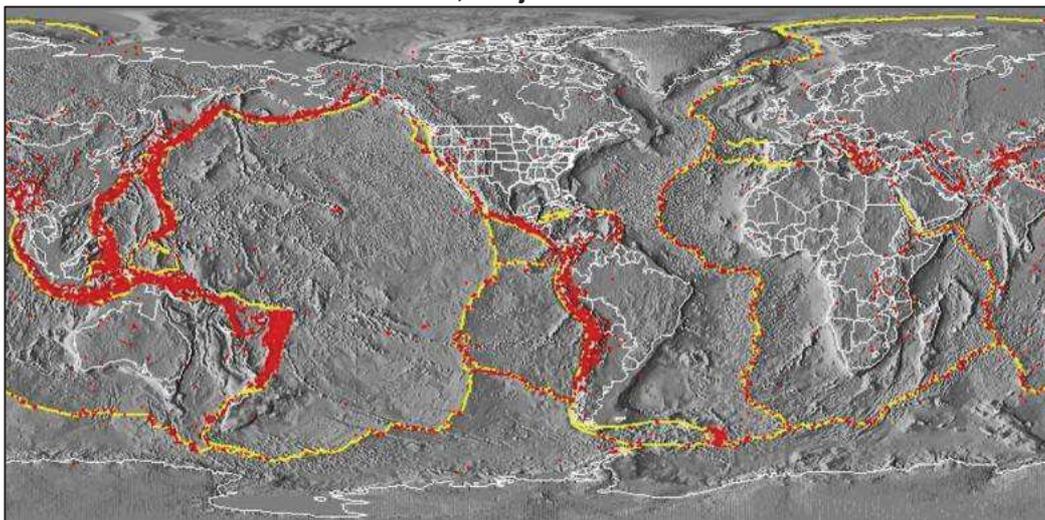
Procesos internos o endógenos de la Tierra

Sismicidad

1.1.1.a.i...1.1 Tipos de sismos en Chile

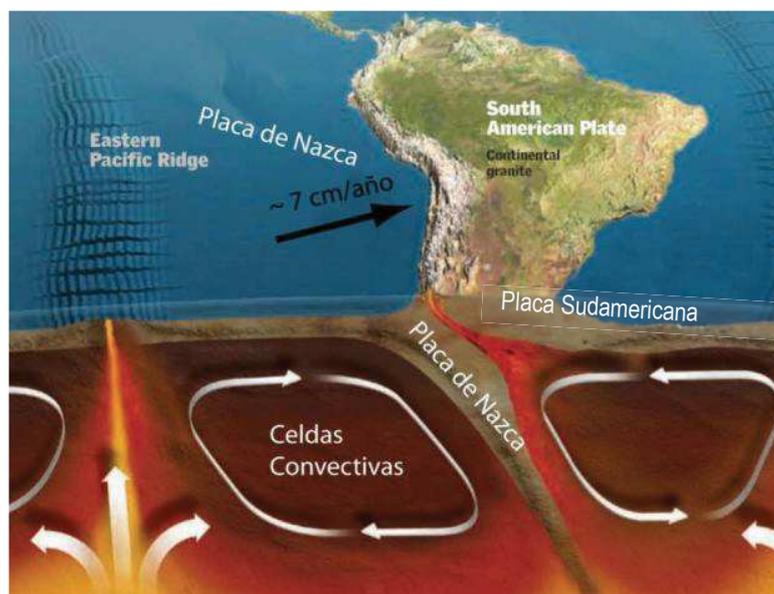
La costa oeste de Sudamérica está delimitada por el borde occidental de la placa Sudamericana y se caracteriza por una intensa sismicidad debido a su convergencia con la placa de Nazca. En planta se aprecia una banda sísmica activa muy angosta (100-150 km) y de profundidad variable (~5-200 km) entre el cordón montañoso de los Andes y la fosa Perú-Chile. La FIGURA 0—1 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 0—1: Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990. Se representan en puntos rojos los epicentros con magnitud mayor que 5. Notar cómo la sismicidad destaca los límites de las placas tectónicas, dibujados 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, Gordon, Argus, & Stein, 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 0—2). 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).

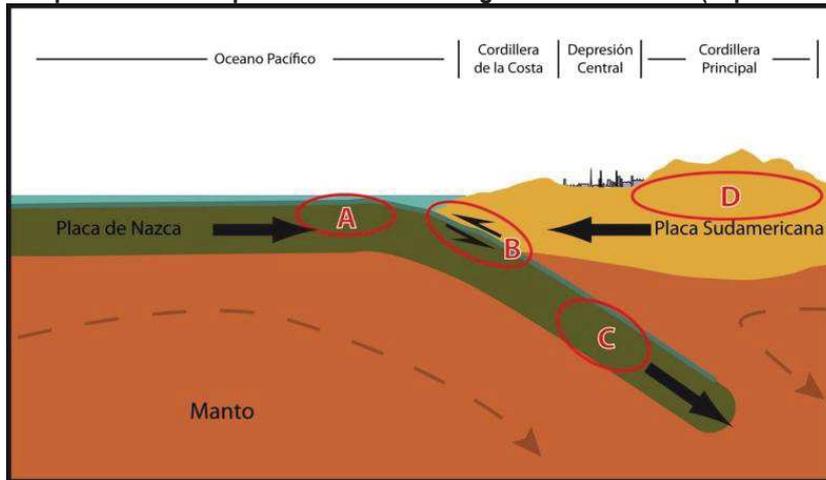
FIGURA 0—2: Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile.

Fuente: Modificado de Enciclopedia 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 0—3, que corresponden 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 $M_w = 6$, 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 0—3: Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto).

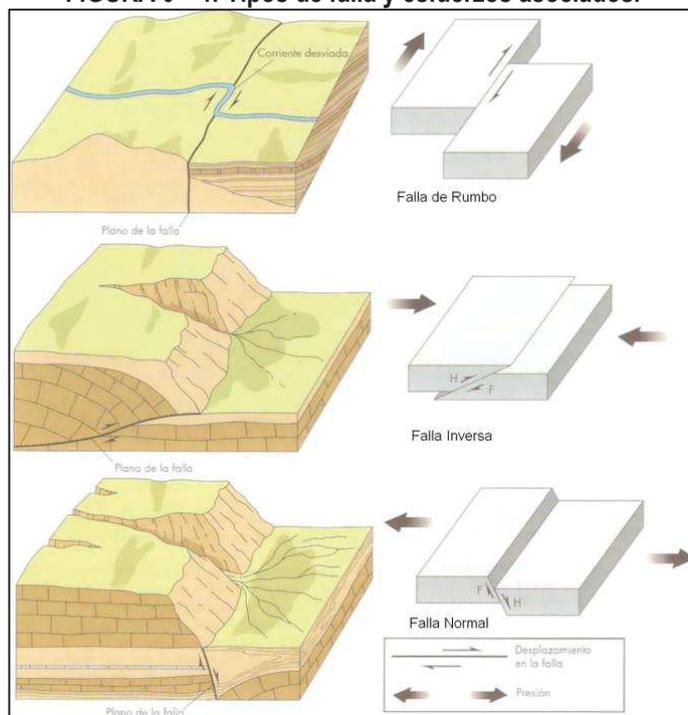


Fuente: Elaboración propia.

1.1.1.a.i...1.2 Mecanismos de daño asociados a los sismos

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 con su geometría, generará diferentes tipos de movimientos (FIGURA 0—4). A su vez, esta ruptura conlleva una liberación de energía que se propaga por medio de ondas sísmicas.

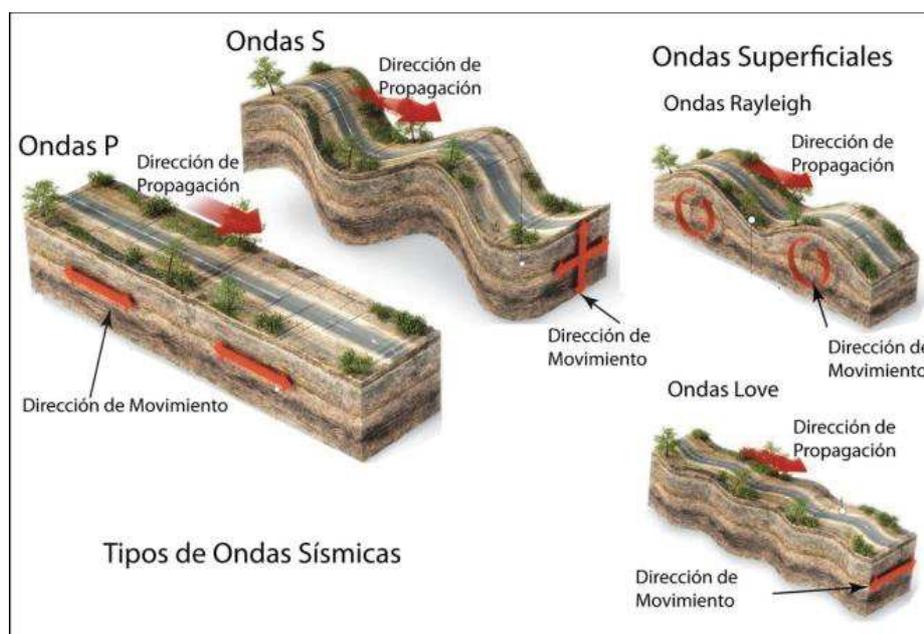
FIGURA 0—4: Tipos de falla y esfuerzos asociados.



Fuente: Keller y Blodgett (2004).

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 0—5). 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.

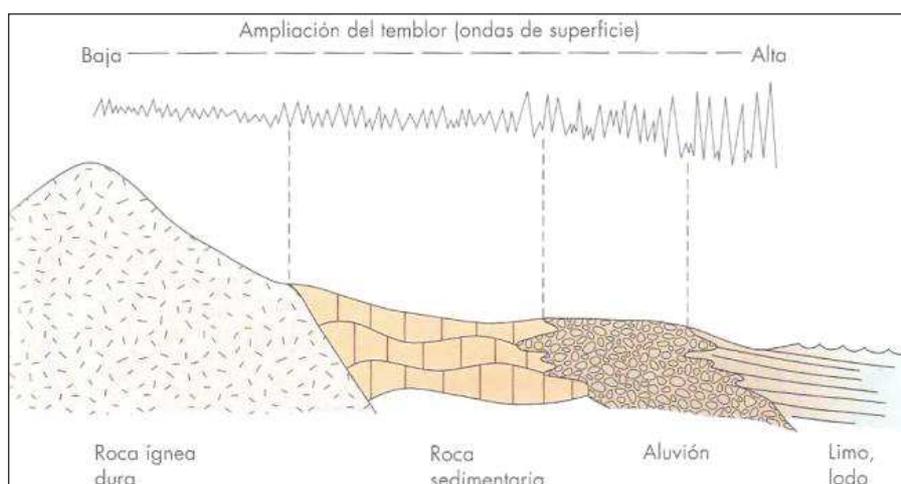
FIGURA 0—5: Tipos de ondas sísmicas.



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

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.).

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 0—6).

FIGURA 0—6: Amplificación de la vibración generada por un terremoto.

Fuente: Keller y Blodgett (2004).

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. Asimismo, en muchos casos estos fenómenos afectan asentamientos en la superficie, muchas veces irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías. Esto implica en una alta vulnerabilidad estructural, económica y social. Particularmente, y 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 provoca 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 (Keefer, 1984; Sepúlveda, Murphy, Jibson, & Petley, 2005; Sepúlveda, Serey, Lara, Pavez, & Rebolledo, 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, Fraile, Otero, & Pividal, 1994; Sancho, 1997). Para más detalle acerca de estos procesos ver el Anexo 0 "Procesos de remoción en masa".

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

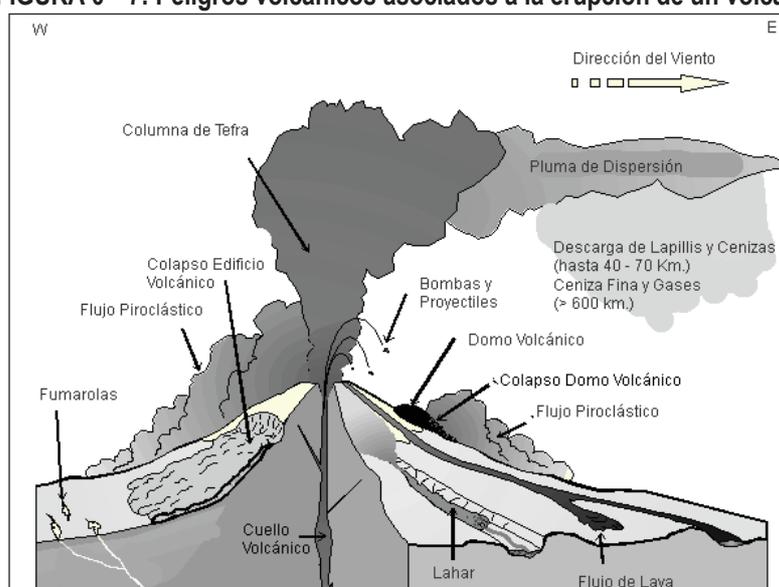
vibración. Las ondas sísmicas hacen aumentar la presión de agua presente en el sedimento, de forma que los granos de arena o limo pierden el contacto entre ellos causando una pérdida de resistencia del sólido y permitiendo que el depósito pueda fluir. Bajo estas condiciones, el suelo puede perder su capacidad de soporte de estructuras, producir deslizamientos (incluso en superficies con muy bajas pendientes) y formar volcanes de arena. Muchos de estos fenómenos afectan asentamientos, muchas veces 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.

Volcanismo

El peligro volcánico deriva de los procesos asociados a la erupción de un volcán. En Chile el volcanismo activo se distribuye a lo largo de la Cordillera de los Andes, pero de forma discontinua. En la zona entre los 18° y 27°S y aquella al sur de los 33°S se ubica el volcanismo activo, mientras que entre los 27°-33°S está ausente. Los principales peligros asociados a una erupción volcánica se resumen en la FIGURA 0—7.

FIGURA 0—7: Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán.



Fuente: Myers y Brantley (Myers & Brantley, 1995).

La lluvia de ceniza y tefra se produce durante erupciones explosivas en las que una gran cantidad de material volcánico se inyecta en la atmósfera a gran altura, generando columnas de tefra, compuestas por piroclastos y gases. Estas columnas, ascienden velozmente alcanzando en pocos minutos alturas estratosféricas, siendo dispersadas por el viento y esparcidas las cenizas y piroclastos alrededor de una gran área. En caso de colapso de esta columna se producen flujos y oleadas piroclásticas que pueden alcanzar centenares de kilómetros, en función de la altura de la columna de tefra (energía potencial transformada en energía cinética) y la dirección del viento, generando grandes depósitos de ceniza y piroclastos incandescentes. Adicionalmente, es común que se produzca contaminación de aguas superficiales en todo el sector afectado por la caída de cenizas, así como también de los acuíferos en los alrededores del volcán por la inyección de aguas hidrotermales, además del envenenamiento por dispersión de gases tóxicos hacia la atmósfera.

Los flujos de lava se producen cuando material magmático se desplaza aguas abajo del centro de emisión. El alcance que tendrán estos flujos está determinado por la tasa de efusión (emisión del centro volcánico), la pendiente del terreno sobre el cual la lava escurre y la viscosidad de la lava. Además, en las cercanías del centro de emisión, se producen comúnmente temblores de magnitud inferior a 6 en la escala de Richter y a poca profundidad (entre 1 y 20 km), asociados a intensidades mayores a VI en las cercanías del epicentro. Estos sismos provienen de diversos procesos, tales como ascenso del magma y fracturamiento de la corteza, explosiones volcánicas y esfuerzos tectónicos compresivos y expansivos asociados al ciclo eruptivo (González-Ferrán, 1995).

Los procesos de remoción en masa asociados a una erupción volcánica se pueden clasificar en tres grandes grupos: lahares, colapso parcial o total del edificio volcánico y deslizamientos de laderas (González-Ferrán, 1995). Los lahares se producen por el brusco derretimiento de hielo y nieve durante una erupción volcánica. Corresponden a una mezcla de rocas fragmentadas preexistentes en las laderas de un volcán con materiales efusivos frescos y una gran cantidad de agua. Esta mezcla desciende aguas abajo a altas velocidades y de manera turbulenta, arrasando e incorporando a su flujo todo lo que encuentra en su trayecto (árboles, casas, etc.). Reportes históricos describen que las velocidades que alcanzan estos flujos van desde los 1,3 m/s hasta los 40 m/s, recorriendo decenas de kilómetros aguas abajo del valle, y en casos en que la velocidad sea mayor a 150 Km/h pueden remontar barreras topográficas.

El colapso, total o parcial, del edificio volcánico puede producirse como consecuencia de una gran cantidad de energía liberada durante la erupción. Este proceso puede provocar tsunamis si ocurre en la cercanía de lagos o embalses, ya que puede producir el desplazamiento de volúmenes importantes de agua en pocos minutos generando olas destructivas de gran energía. Finalmente, asociado a la sismicidad producida por la erupción, pueden generarse deslizamientos de terreno en la cercanía del centro eruptivo, lo que puede dar paso a flujos de barro y/o detritos aguas abajo.

En cuanto al impacto de estos fenómenos volcánicos en la población y sus actividades, este es muy alto en las cercanías de los centros volcánicos, ya que pueden generar grandes catástrofes en la vida diaria e infraestructura de las comunidades. Los efectos más directos para la población, aunque la erupción se encuentre a distancia, son:

- a) Pérdida de tierras cultivables
- b) Colapso de techos y obras civiles
- c) Pérdidas de vidas humanas y forraje
- d) Contaminación de aguas y problemas sanitarios derivados.

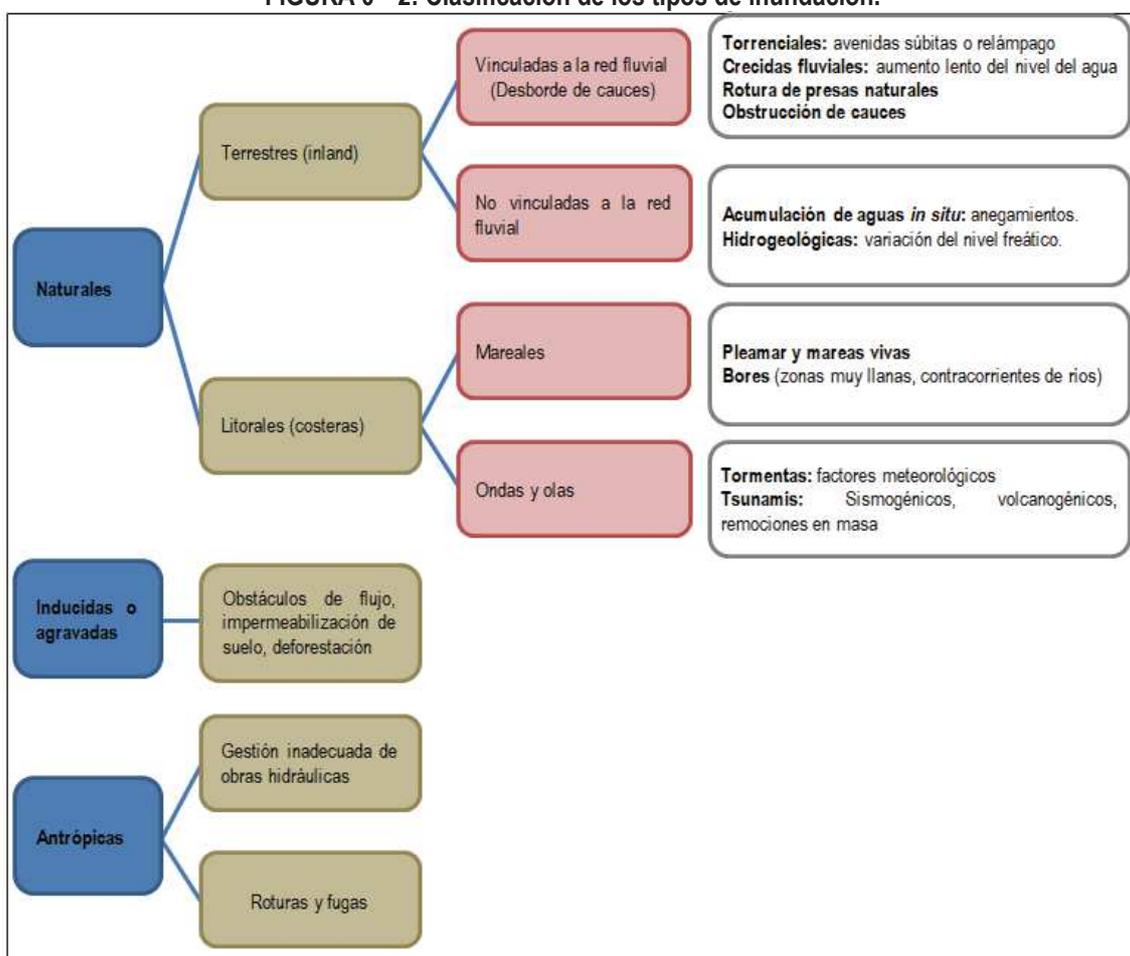
Se debe destacar que, la duración de una catástrofe por actividad volcánica puede ser considerable dado que un ciclo eruptivo puede extenderse por meses o años (por ejemplo, el ciclo eruptivo del volcán Chaitén), y pueden afectar grandes áreas de terreno, como por ejemplo la erupción del volcán Quizapú en el año 1932, cuya pluma de ceniza alcanzó la ciudad de Johannesburgo, Sudáfrica o la erupción del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle, cuya pluma de ceniza dio la vuelta al mundo.

Procesos externos o exógenos de la Tierra

Inundaciones terrestres y litorales

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (FIGURA 0—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 (por las características de la comuna, éstas no se analizan). 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.

FIGURA 0—2: Clasificación de los tipos de inundación.



Fuente: Modificado de Díez Herrero et al. (2008).

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.

1.1.1.a.i...1.3 Inundaciones por desborde de cauces

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:

- 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.
- 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 que se pueden generar como consecuencia de una inundación estarán dados por varios factores. Naturalmente, los efectos dependen de la intensidad de la inundación, sin embargo, se deben diferenciar los efectos sobre los edificios, que se correlacionan mejor con la altura de inundación, de la afectación a la infraestructura vial, que se correlaciona mejor con la velocidad de escurrimiento (Kreibich, y otros, 2009), aunque, se debe tener en consideración que existe una buena correlación entre ambas variables. Por otra parte, existen otras variables que inciden en el nivel de daño que generan las inundaciones (Merz, Kreibich, & Lall, 2013; Hasanzadeh Nafari, Ngo, & Mendis, 2016):

- Superficie de las construcciones (que se correlaciona con la densidad de población y con el nivel socioeconómico de los habitantes), valor de las propiedades y calidad de la construcción.
- Medidas preventivas, asociadas a la construcción.

1.1.1.a.i...1.4 Inundación por acumulación de aguas lluvia 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. Se asocian 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. Solo 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.

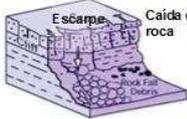
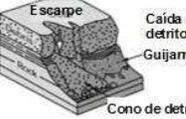
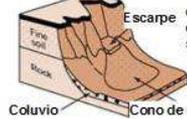
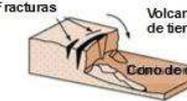
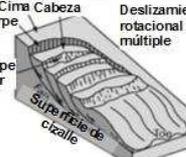
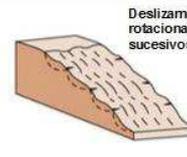
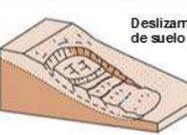
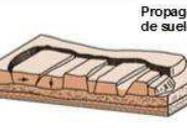
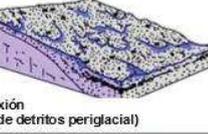
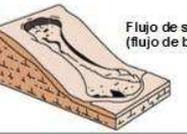
En las zonas urbanas consolidadas, las acumulaciones de aguas lluvia ocurren especialmente en cruces viales, donde la evacuación de las aguas lluvias es insuficiente, ya sea por el colapso de los sistemas de colección,

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 periodo de retorno no adecuado.

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 0—3). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA-GCA, 2007).

FIGURA 0—4: Clasificación de tipos de remociones en masa en relación con el movimiento que lo origina y el tipo de material constituyente de la ladera.

Material		ROCA	DETRITO	SUELO
Tipo de movimiento				
CAIDA				
				
DESPLAZAMIENTO	Rotacional			
	Traslacional (planar)			
PROPAGACION				
FLUJO				
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

1.1.1.a.i...1.5 Flujos de detritos y barro

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, Fernández, Naranjo, & Villarroel, 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. Solo durante las últimas décadas se han instalado pluviógrafos que miden la intensidad instantánea u horaria de precipitaciones (mm por hora). Solo 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 (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 de la comuna, 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.

1.1.1.a.i...1.6 **Desprendimientos o caídas 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). Estos ocurren cuando existe una discontinuidad en la roca (por ejemplo, fracturas, planos de estratificación u otras estructuras propias de las características de la roca) 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 este 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 este 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 este. 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.

1.1.1.a.i...1.7 **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 0—5). Esto implica que las superficies de ruptura son ya sea curvas y cóncavas o a lo largo de un plano o superficie ondulada, respectivamente.

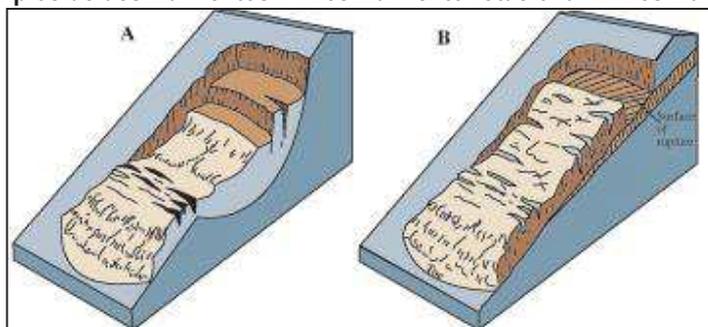
Adicionalmente, los deslizamientos que ocurren en escarpes de terrazas fluviales producto de la erosión fluvial, o el retroceso de acantilados costeros por erosión marina basal, se les denomina como “Retroceso de laderas”, que corresponde a la retirada del escarpe en dirección aguas arriba, sin que esta sufra cambios en sus rasgos geométricos, es decir, con posterioridad al movimiento de material, la forma del escarpe permanece constante (Pain, 1986).

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.

FIGURA 0—6 Ejemplos 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>

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

- 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.
- La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno: En general, dado que estos procesos son de alta velocidad los daños potenciales son altos.
- 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.

- Tiempo de aviso: Sin estudios de detalle en los que se conozca el comportamiento de deslizamientos respecto a los procesos desencadenantes no hay forma de predecir este tipo de procesos. Si se realizan estudios específicos, es posible identificar y caracterizar el o los factores gatillantes de las remociones en masa en un área determinada. Y, 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 sobrepase dicho umbral.